

Guía para el diseño y dimensionamiento de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas destinadas al consumo humano (PPCSb)

Reglamento del Dominio Público Hidráulico
R.D. 849/1986 – R.D. 665/2023



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS



IGME
INSTITUTO GEOLOGICO
Y MINERO DE ESPAÑA

Guía para el diseño y dimensionamiento de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas destinadas al consumo humano (PPCSb)

**Reglamento del Dominio Público Hidráulico
R.D. 849/1986 – R.D. 665/2023**

Madrid, noviembre de 2025

Título:

Guía para el diseño y dimensionamiento de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas destinadas al consumo humano (PPCSb).
Reglamento del Dominio Público Hidráulico R.D. 849/1986 – R.D. 665/2023
Edición 2025

Autor/Autores:

Por parte del Instituto Geológico y Minero de España CN-IGME (CSIC):

Luis Moreno Merino
Inmaculada García Moreno
Almudena de la Losa Román
José María Ruiz Hernández
David Pulido Velázquez
Raquel Morales García

Por parte de la Subdirección General para la Protección de las Aguas y Gestión de Riesgos:

Laura Garrido Sobrados
Paloma Crespo Iniesta
Francisco Javier Sánchez Martínez
José Luis Núñez Muñoz
M^a Dolores Pascual Vallés

Por parte de Tragsatec:

María Jesús Minaya Ovejero
Jesús del Pozo Tejado

Colaboradores:

Esta guía no se hubiera realizado sin la inestimable colaboración de los técnicos de las Confederaciones Hidrográficas a los que agradecemos sus valiosas aportaciones.

Fotografía de cubierta:

Portada: Manantial Juan Bueno, Cuenca. Foto cedida por L. Moreno
Entradilla capítulo 1: Unsplash / Foto de Mrjn Photography (<https://unsplash.com/es>)
Entradilla capítulo 2: Museo Geominero, calle Ríos Rosas, 23, 28003 Madrid. Foto cedida por el CN- IGME.
Entradilla capítulo 3: Unsplash / Foto de Raymond Setzer (<https://unsplash.com/es>)
Entradilla capítulo 4: Nacimiento del río Huecar, provincia de Cuenca. Foto cedida por Tragsatec, S.A., S.M.E, M.P.
Entradilla bibliografía: Biblioteca IGME, calle Ríos Rosas, 23, 28003 Madrid. Foto cedida por el CN-IGME.



MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL
RETO DEMOGRÁFICO

Edita:
© SUBSECRETARÍA
Gabinete Técnico

© De los textos e imágenes: sus autores

NIPO (papel en castellano): 665-25-066-7
NIPO (línea en castellano): 665-25-067-2
Depósito Legal: M-24257-2025

Prólogo

Las aguas subterráneas constituyen un recurso esencial, tanto para los usos privativos del dominio público hidráulico como para la conservación de los ecosistemas acuáticos que dependen de ellas. Su protección frente a la contaminación representa un desafío permanente, debido a la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos frente a las actividades humanas, su carácter invisible desde la superficie y las dificultades técnicas que conlleva su descontaminación. En este contexto, el desarrollo, delimitación e implementación de perímetros de protección se ha consolidado como una de las herramientas más eficaces para gestionar los riesgos asociados a las captaciones destinadas al consumo humano.

Basados en los principios de prevención y mitigación, los perímetros de protección definen áreas específicas alrededor de las captaciones, con el fin de preservar la calidad del recurso en su origen y garantizar el suministro a poblaciones históricas y consolidadas. Se trata de una herramienta que no solo permite aplicar medidas preventivas para evitar el deterioro de la calidad, sino también identificar problemas ya existentes.

El propósito de esta publicación es ofrecer un apoyo práctico a las administraciones competentes, operadores y profesionales que gestionan captaciones de aguas subterráneas para consumo humano. Su finalidad es facilitar la elaboración de estudios técnicos homogéneos, adaptados a las particularidades de cada captación, y que sirvan de base para la tramitación de los perímetros de protección exigidos por el Real Decreto 665/2023, de 18 de julio, mediante el cual se modificó el Reglamento del Dominio Público Hidráulico.

Tras casi cuatro décadas desde la primera delimitación de estos perímetros en España, el país afronta una nueva etapa marcada por las exigencias comunitarias. En este camino, la implantación de perímetros de protección de captaciones subterráneas destinadas al consumo humano constituye un avance decisivo hacia un modelo de gestión más resiliente, eficiente y respetuoso con el medio ambiente. Un modelo que garantice la calidad de nuestras aguas para el consumo humano —uso prioritario reconocido en la normativa— y que asegure su disponibilidad para las generaciones presentes y futuras.

María Dolores Pascual Vallés
Directora General del Agua

ÍNDICE

Prólogo	5
Objetivo y alcance de este documento	14
1. Introducción	17
1.1. ¿Qué son los perímetros de protección de captaciones de agua destinadas al consumo humano? ..	17
1.2. ¿Cómo funcionan los perímetros de protección?	18
1.3. Procedimiento administrativo.....	21
1.3.1. Tipos de perímetros recogidos en el RDPH.....	21
1.3.2. Marco normativo	23
1.3.3. Tramitación administrativa de los perímetros de protección.....	24
1.3.4. Actividades que afectan a la calidad y cantidad de las aguas ubicadas dentro de un perímetro de protección.....	25
2. Conceptos básicos.....	27
2.1. Acuíferos, definición, tipos y funcionamiento.....	27
2.1.1. ¿Qué es un acuífero?	27
2.1.2. ¿Qué diferencia un acuífero de una masa de agua subterránea?	29
2.1.3. ¿Cómo se clasifican los acuíferos?	30
2.2. Parámetros hidrogeológicos e hidrodinámicos	34
2.2.1. Área de alimentación, zona de captación y área de recarga de un acuífero.....	35
2.2.2. Parámetros hidrogeológicos e hidrodinámicos básicos	37
2.3. Captaciones de agua subterránea.....	41
2.3.1. Captaciones de agua subterránea destinadas al consumo humano	41
2.3.2. Captaciones verticales	41
2.3.3. Captaciones horizontales	43
2.3.4. Captaciones mixtas	46
2.3.5. Sistemas de Captaciones de Agua Subterránea (SCAS) destinadas al consumo humano	46
2.4. Vulnerabilidad a la contaminación, relación con los perímetros de protección.....	47
2.4.1. Origen y evolución del concepto de vulnerabilidad de los acuíferos.....	47
2.4.2. El concepto de vulnerabilidad y los perímetros de protección.....	48
3. Directrices para el dimensionamiento de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas destinadas al consumo humano	53
3.1.1. Clasificación de la captación y del tipo de acuífero	55
3.1.2. Establecimiento del modelo conceptual	56
3.2. Etapa II: Selección del método de dimensionamiento.....	60
3.2.1. Métodos recomendados en acuíferos porosos o asimilados	60
3.2.2. Métodos recomendados en acuíferos kársticos o fisurados.....	61
3.3. Etapa III: Zonificación.....	62
3.3.1. Métodos para acuíferos porosos y asimilables a porosos.....	63
3.3.2. Métodos para acuíferos kársticos y fisurados	68
3.3.3. Casos especiales.....	77
3.3.4. Ajuste del perímetro al modelo conceptual y zonificación práctica.....	90
3.3.5. Tabla de equivalencias.....	92

3.4. Etapa IV: Propuesta de restricciones	94
3.4.1. Zona inmediata o de restricciones absolutas	95
3.4.2. Zona de protección general	96
3.4.3. Zona próxima o de restricciones máximas	96
3.4.4. Zona alejada o de restricciones moderadas	97
3.4.5. Zona de restricciones mínimas o envolvente.....	97
3.4.6. Recomendaciones acerca de la interpretación de las actividades enumeradas en el anexo VIII.....	97
3.4.7. Consideraciones a tener en cuenta en la propuesta de restricciones de actividades específicas.....	99
3.5. Etapa V: Informe técnico y propuesta de perímetro	102
3.5.1. Informe técnico: contenido y estructura.....	102
3.5.2. Propuesta de perímetro.....	107
4. Recomendaciones sobre el control de calidad del agua en los perímetros de protección.....	109
4.1. ¿Qué sustancias es necesario controlar?	109
4.2. ¿Cuál debe ser la ubicación de los puntos de control, y cuántos son necesarios?.....	110
4.3. ¿Cuál es la frecuencia de muestreo recomendable?.....	110
4.4. ¿Cómo deben ser tomadas las muestras?	111
4.5. Documentación, base de datos y GIS.....	111
4.6. Plan de contingencias	111
Bibliografía recomendada	113
Síntesis metodológicas	113
Software específico	114
Webs.....	115
Textos de hidrogeología general.....	115
Textos que profundizan en temas específicos	116
Publicaciones sobre métodos de diseño de perímetros y métodos paramétricos de estimación de la vulnerabilidad intrínseca	117
Vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas	119
Otras publicaciones interesantes	120
Legislación.....	120
Referencias bibliográficas	121
Mapas y recursos web.....	123

Índice de figuras

Fig.		pág.
1.1	En acuíferos porosos, la contaminación se propaga en forma de pluma.	19
1.2	Se muestra la zonificación teórica de un perímetro de protección diseñado mediante isócronas para una captación situada sobre un acuífero poroso.	20
1.3	La contaminación puede alcanzar una captación cuando el bombeo induce la entrada de agua de mala calidad.	21
1.4	Tramitación administrativa extraordinaria para la aprobación de los perímetros de protección de captaciones de agua subterráneas destinadas al consumo humano.	25
2.1	Ilustración de los conceptos acuífero, acuitardo, acuífero libre y acuífero confinado.	28
2.2	Masas de agua subterránea definidas en el tercer ciclo de planificación hidrológica.	29
2.3	Relación entre un cuerpo de agua superficial, en este caso una laguna, el acuífero libre superior, y un acuífero semiconfinado inferior.	31
2.4	Estructura típica de un sistema complejo con presencia de acuíferos confinados, no confinados, libres, colgados etc.	31
2.5	Ejemplo de plano piezométrico representando isopiezas y direcciones de flujo.	32
2.6	Representación esquemática de la Ley de Darcy.	34
2.7	Comparación de los conceptos área de alimentación de una captación y zona de influencia.	36
2.8	Tipos de porosidad en sedimentos bien y mal clasificados, rocas fracturadas y huecos de disolución	38
2.9	Rangos típicos de las velocidades de movimiento del agua subterránea para diversos tipos de acuíferos.	40
2.10	Simulación matemática de la forma que pueden tomar las isócronas en un acuífero poroso.	41
2.11	Ejemplos constructivos de captaciones de aguas subterráneas mediante pozos de gran diámetro.	42
2.12	Ejemplos de técnicas de perforación de sondeos para la captación de aguas subterráneas.	42
2.13	Etapas a realizar para la ejecución, puesta en marcha y abandono de un sondeo.	43
2.14	Esquema de un qanat.	44
2.15	Esquema de galerías de captación, mayras o qanats, de diferente grado de complejidad.	44
2.16	Diferentes tipos de galerías interceptan y captan el agua de los acuíferos en su zona saturada, o del agua en tránsito en la zona no saturada.	45
2.17	Esquema constructivo de una captación tipo manantial concentrado.	45
2.18	Ejemplo de captación mixta, mediante pozos tipo Ranney.	46
2.19	Sección esquemática de un pozo de Gran Canaria, con diversas galerías, campana y sala de máquinas.	46
3.1	Etapas en el diseño de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas destinadas al consumo humano.	54
3.2	Etapa I. Clasificación de la captación en función de la población abastecida, el caudal extraído y la naturaleza del acuífero. Elaboración del modelo conceptual.	55
3.3	Evolución del número de habitantes en la localidad de Torrejón de la Calzada (Madrid).	56
3.4	Representación de los parámetros que debe incluir el modelo conceptual de un acuífero.	57
3.5	Etapa II. Selección del método de dimensionamiento del perímetro en función de la clase y del tipo de acuífero asignados en la etapa I.	60
3.6	Esquema de flujo del desarrollo de la etapa III en el diseño de perímetros de protección.	62

3.7	Esquema de flujo que muestra los pasos necesarios para elaborar un perímetro de protección mediante modelación matemática.	65
3.8	Delimitación de la zona inmediata (S1) teniendo en cuenta: a) la presencia de drenajes; b) la presencia de fracturas próximas a la captación.	68
3.9	Importancia de considerar la topografía, la estratigrafía y la estructura geológica para establecer el flujo del agua subterránea en un sistema acuífero kárstico.	69
3.10	Esquema que muestra la forma en que se clasifica el territorio con el método EPIK según las categorías del factor P (cubierta de protección).	71
3.11	Ejemplos de relación entre acuíferos de diferente naturaleza explotados por una misma captación.	78
3.12	La cuenca hidrográfica e hidrogeológica con frecuencia no coinciden.	79
3.13	Zonificación de un perímetro de protección en un manantial situado en un contacto geológico entre un acuífero y un material menos permeable.	80
3.14	Curvas de llegada de dos ensayos de trazadores con uranina, monitoreadas en el mismo manantial kárstico, pero realizadas en diferentes condiciones hidrológicas.	81
3.15	Algunos ejemplos de tipos constructivos tradicionales de galerías de captación de aguas subterráneas.	83
3.16	Relación hidráulica natural y con bombeo entre el acuífero libre superior y el acuífero semiconfinado inferior.	85
3.17	Flujo a través del acuitardo por variación de la transmisividad vertical.	85
3.18	Acuífero confinado profundo con una formación confinante de baja permeabilidad situada a techo.	86
3.19	Lógica de diseño de los perímetros de protección cuando se trata de proteger varias captaciones situadas muy próximas y se sitúan sobre un acuífero poroso.	88
3.20	Lógica de diseño de los perímetros de protección cuando se trata de proteger varias captaciones situadas muy próximas que se sitúan sobre un acuífero kárstico o fisurado.	89
3.21	Ejemplos de cuestiones a considerar en la etapa de ajuste del perímetro teórico al perímetro práctico en coherencia con el modelo conceptual del acuífero.	91
3.22	Representación esquemática de la zonificación de los perímetros de protección según la población abastecida, caudal extraído y tipo de acuífero.	92
a	Una vista del interfaz de usuario de la aplicación "PEPOTE" y a la derecha de la aplicación "ZAPPEL"	114

Índice de tablas

Tabla		pág.
1.1	Tipos de perímetros de protección recogidos en la legislación	22
2.1	Valores representativos de la porosidad total, porosidad efectiva y conductividad hidráulica de diferentes tipos de material.	38
3.1	Método de Wyssling. Recomendaciones acerca del origen de los datos para el cálculo de perímetros de protección.	67
3.2	Método de Jacobs y Bear. Recomendaciones acerca del origen de los datos para el cálculo de perímetros de protección.	67
3.3	Recomendaciones para la determinación de las zonas de protección en captaciones de tipo 4, situadas en acuíferos poroso y muy poco vulnerables.	68
3.4	Método EPIK. Recomendaciones acerca del origen de los datos para el cálculo de perímetros de protección.	70
3.5	Método COP. Recomendaciones acerca del origen de los datos para el cálculo de perímetros de protección.	74
3.6	Método DISCO. Fuentes de datos recomendadas para la aplicación del Método Disco en función de la clase de captación.	76
3.7	Recomendaciones de equivalencia entre las zonas de protección en acuíferos kársticos o fisurados, delimitadas con criterios de vulnerabilidad a la contaminación, las zonas de protección en acuíferos porosos, delimitadas en función de tiempos de tránsito hasta la captación y la zonificación recogida en el RDPH.	93
3.8	Relación entre las zonas de un perímetro de protección y la gradación en la restricción de actividades potencialmente contaminantes sobre su superficie.	95
3.9	Actividades potencialmente contaminantes de las aguas subterráneas. (Basado en el anexo VIII del RDPH).	100

Índice de acrónimos

En la presente guía se hace referencia a textos legales de la normativa española y europea que conforman el marco de regulación para los perímetros de protección, así como a otros términos relacionados con las aguas subterráneas que, para facilitar la lectura y dada su repetición en el texto o su uso en gráficos o esquemas, se utilizarán en forma de acrónimos. Se presentan a continuación:

AAPP	administraciones públicas.
DMA	Directiva Marco del Agua, es la Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.
DPH	dominio público hidráulico.
IGME	Instituto Geológico y Minero de España.
MSBT	masa de agua subterránea.
OCCC	Organismos de cuenca.
PPCSb	perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas destinadas al consumo humano.
RDAC	Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro.
RDPH	Reglamento del Dominio Público Hidráulico. Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos Preliminar, I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas.
RDPH₂₀₂₃	Real Decreto 665/2023, de 18 de julio, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por Real Decreto 849/1986, de 11 de abril; el Reglamento de la Administración Pública del Agua, aprobado por Real Decreto 927/1988, de 29 de julio; y el Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados.
RPH	Real Decreto 907/2007, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Planificación Hidrológica.
SCAS	sistemas de captaciones de aguas subterráneas.
SIG	sistema de información geográfica.
TRLA	texto Refundido de la Ley de Aguas, aprobado por Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas, y sus sucesivas modificaciones.

Objetivo y alcance de este documento

El presente documento está dirigido tanto a los profesionales responsables de supervisar y validar los perímetros, como a quienes se encargan de su diseño. En él se identifican y desarrollan los aspectos técnicos y legales involucrados en el proceso, ofreciendo un enfoque práctico que facilita la aplicación de lo dispuesto en la normativa vigente. Tiene como objetivo proporcionar un marco metodológico que sirva de guía para el diseño y dimensionamiento de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas destinadas al consumo humano de acuerdo, exclusivamente, con lo dispuesto en el artículo 243 ter.1 del Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RDPH):

“1. Las administraciones competentes en el abastecimiento urbano y los organismos de cuenca deberán determinar perímetros de protección para todas aquellas captaciones de agua destinada a consumo humano incluidas en el registro de zonas protegidas al que se refiere el artículo 99 bis del TRLA, que proporcionen un volumen medio de, al menos, 10 metros cúbicos diarios o abastezca a más de 50 personas.”

El documento se estructura en cuatro capítulos que abordan de manera progresiva los elementos esenciales del diseño de los perímetros de protección:

- **Introducción:** se presenta la definición de “perímetro de protección de captaciones de agua subterránea destinadas al consumo humano”, el principio de funcionamiento de esta figura y el marco normativo que la regula, proporcionando una base conceptual clara para su posterior desarrollo.
- **Conceptos básicos:** se describen los principios fundamentales relacionados con la estructura y el funcionamiento de los acuíferos, así como las nociones básicas de hidrogeología y vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, indispensables para diseñar perímetros de protección eficaces.
- **Directrices para el dimensionamiento:** en este apartado se detalla, de forma progresiva, el proceso de diseño de los perímetros, se divide en cinco etapas, que abarcan desde la clasificación de los acuíferos y las captaciones, hasta la selección y aplicación del método de dimensionamiento más adecuado, la determinación de restricciones y limitaciones sobre su superficie, y la redacción del informe técnico correspondiente.
- **Recomendaciones sobre el control de calidad del agua asociada a las captaciones protegidas mediante perímetros:** se expone la importancia del monitoreo periódico de la calidad del agua dentro del perímetro de protección, así como las estrategias para su implementación efectiva.

Finalmente se incluye un apartado de bibliografía con las referencias necesarias para profundizar en los temas tratados, facilitando el acceso a información complementaria y especializada.

Este documento se centra exclusivamente en el diseño de perímetros de protección cuyo objetivo es garantizar la calidad de las aguas subterráneas destinadas al consumo humano. La protección de la cantidad del recurso hídrico, si bien es un aspecto fundamental en la gestión del agua, requiere metodologías y criterios específicos que no se abordan en esta guía que pretende ser una herramienta práctica y rigurosa que contribuya a una gestión más eficiente y sostenible de los recursos hídricos subterráneos, garantizando su seguridad y disponibilidad para las generaciones presentes y futuras.

El diseño de perímetros de protección para captaciones de aguas subterráneas destinadas al consumo humano es una labor muy compleja. El técnico responsable debe ser capaz de comprender cómo se mueve el agua en el acuífero, determinar su origen y destino, y establecer cómo interactúa con otras masas de agua subterránea o superficial. A partir de la información disponible debe ser capaz de elaborar un modelo conceptual que explique el funcionamiento hidrogeológico del acuífero y la forma en que es afectado cuando se extrae agua, por ejemplo, por la captación que se pretende proteger. Además, es necesario tener una imagen clara de la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, y de su variabilidad espacial.

El mayor reto al que se enfrenta el técnico es, en la mayoría de los casos, la escasez de información, tanto sobre las captaciones como sobre el propio medio físico subterráneo. En otras ocasiones la información disponible es muy desigual, de modo que algunas zonas pueden estar bien estudiadas y otras no. Se trata de un problema inherente a la geología, y que se agrava en el campo de la hidrogeología, donde se requieren valores cuantitativos precisos de variables como la permeabilidad, el

coeficiente de almacenamiento o la porosidad eficaz, entre otros.

Con frecuencia, para suplir la carencia de datos objetivos, es necesario recurrir al llamado “conocimiento experto”. Este término hace referencia al grado de entendimiento que se tiene sobre los acuíferos y el modelo conceptual de circulación de las aguas subterráneas en una zona determinada. Dicho conocimiento solo es posible cuando al conocimiento teórico, se suma una larga experiencia en el análisis de problemas hidrogeológicos reales en un área concreta.

En conclusión, la delimitación de los perímetros de protección – así como su supervisión y validación – debe ser realizada por expertos en hidrogeología. Estos profesionales deben dominar tanto los principios teóricos del funcionamiento de los acuíferos y su interacción con el entorno físico y humano, como tener un conocimiento detallado de las condiciones locales, lo cual incluye no solo la geología y la hidrogeología, sino también la edafología, el clima, el uso actual y potencial del territorio, y numerosos factores ambientales.



1. Introducción

1.1. ¿Qué son los perímetros de protección de captaciones de agua destinadas al consumo humano?

La figura del perímetro de protección ha sido concebida como una herramienta que permite proteger la calidad del agua subterránea destinada al consumo humano. Este concepto está presente tanto en la legislación europea (Directiva Marco del Agua - DMA) como en la normativa nacional (Reglamento del Dominio Público Hidráulico - RDPH). Sin embargo, se trata de una figura que carece de una definición oficial explícita, de forma que su significado preciso debe inferirse a partir de la descripción de sus características y del modo de aplicación recogido en la normativa.

Para evitar confusiones, en este documento se entenderá que el **perímetro de protección de una captación de agua subterránea destinada al consumo humano** es una superficie del terreno dividida en zonas claramente delimitadas, sobre las cuales se restringen o prohíben, de forma gradual, aquellas actividades que puedan poner en riesgo la calidad del agua subterránea. El número de zonas que componen el perímetro, así como el tipo y grado de las restricciones aplicables en cada una de ellas, están determinados por lo establecido en la legislación vigente (artículo 243 quinquies del RDPH).

La figura del perímetro de protección no es estática. Una vez diseñado y aprobada legalmente su delimitación cartográfica y zonificación pueden sufrir modificaciones si algún parámetro crítico del diseño cambia. Entre las causas más frecuentes que hacen necesaria la revisión de un perímetro de protección se encuentran:

- Variación del caudal extraído por la captación que implique su reclasificación, principalmente en los casos de modificación del título concesional para aumentar el volumen y caudal.
- Variación de la población abastecida. Esto puede afectar tanto a la extensión como a las restricciones del perímetro.
- Reubicación de la captación o modificación de sus características técnicas constructivas como diámetro, profundidad, disposición de las rejillas, etc.
- Actualización del conocimiento geológico o hidrogeológico del acuífero captado.
- Mejora sustancial en la calidad de los datos empleados para el cálculo de isócronas o de la vulnerabilidad, que permitirá una delimitación más precisa y un mejor ajuste de la propuesta de restricciones a las actividades.
- Información aportada por la red de vigilancia de la calidad del agua subterránea o por los controles del agua suministrada que sugiera la conveniencia de modificar los límites de las zonas que componen el perímetro.
- Modificación del patrón de flujo debido a la explotación del acuífero.

Esta flexibilidad en la delimitación de los perímetros permite adaptar la protección bajo condiciones cambiantes y garantizar la eficacia de las medidas de protección establecidas.

1.2. ¿Cómo funcionan los perímetros de protección?

La función principal de un perímetro de protección es garantizar la calidad del agua destinada al consumo humano. Cuando el perímetro está correctamente diseñado y acompañado de las medidas adecuadas de vigilancia y control de la calidad del agua, protege a los consumidores mediante tres mecanismos:

1. Impidiendo que la contaminación llegue al suelo o al acuífero.

Si la contaminación llega al suelo o al acuífero:

2. Garantizando que los mecanismos naturales de dilución, inactivación o retención de contaminantes tengan tiempo para actuar y reducir su concentración hasta niveles aceptables conforme a la normativa sobre aguas de consumo.

Si el contaminante llega al suelo o el acuífero y la degradación natural no es posible o es insuficiente:

3. Dando tiempo a la aplicación de medidas paliativas o correctoras por parte de las autoridades responsables de la gestión del recurso que eviten que la población se vea afectada.

La depuración de los contaminantes en los acuíferos responde a numerosos procesos: filtración mecánica, adsorción, absorción, intercambio iónico, biodegradación, procesos de óxido-reducción, precipitación química, etc. pero, salvo en algunos sistemas kársticos con conductos de gran tamaño, la dilución no constituye un mecanismo eficaz de depuración.

Entre los factores que limitan la eficacia de la dilución como mecanismo de depuración en los acuíferos porosos destacan: velocidad de flujo muy baja, de centímetros a metros por día, esto impi-

de que los contaminantes se mezclen rápidamente con grandes volúmenes de agua limpia, condición necesaria para que la dilución sea efectiva. Medio poroso limitado, a diferencia de los ríos o lagos, el agua subterránea fluye a través de espacios pequeños entre los poros del suelo o las grietas de la roca; esta geometría restringida reduce la capacidad de dispersión y mezcla, lo que provoca que los contaminantes se mantengan concentrados durante mucho tiempo. Además, muchos contaminantes con carga, como los metales pesados, pueden adsorberse a la matriz sólida persistiendo durante años o décadas.

Para que un perímetro de protección sea eficaz, es imprescindible delimitar correctamente el área de alimentación de la captación (ver apartado 2.2), así como dimensionar y clasificar las zonas de protección en el interior de esta área. Sobre cada una de las zonas, en una etapa posterior, se impondrán de forma gradual restricciones o prohibiciones a las actividades que puedan comprometer la calidad del agua.

El correcto dimensionamiento de las zonas en las que se divide un perímetro de protección es clave para lograr la compatibilidad entre la preservación del recurso hídrico y el desarrollo de la actividad económica.

Es recomendable incluir en el diseño de los perímetros de protección un sistema de monitoreo de la calidad del agua (apartado 4). Su finalidad es detectar la presencia de contaminantes con tiempo suficiente para aplicar medidas paliativas, como la interrupción temporal del bombeo, antes de que la pluma contaminante afecte a la captación (figura 1.1).

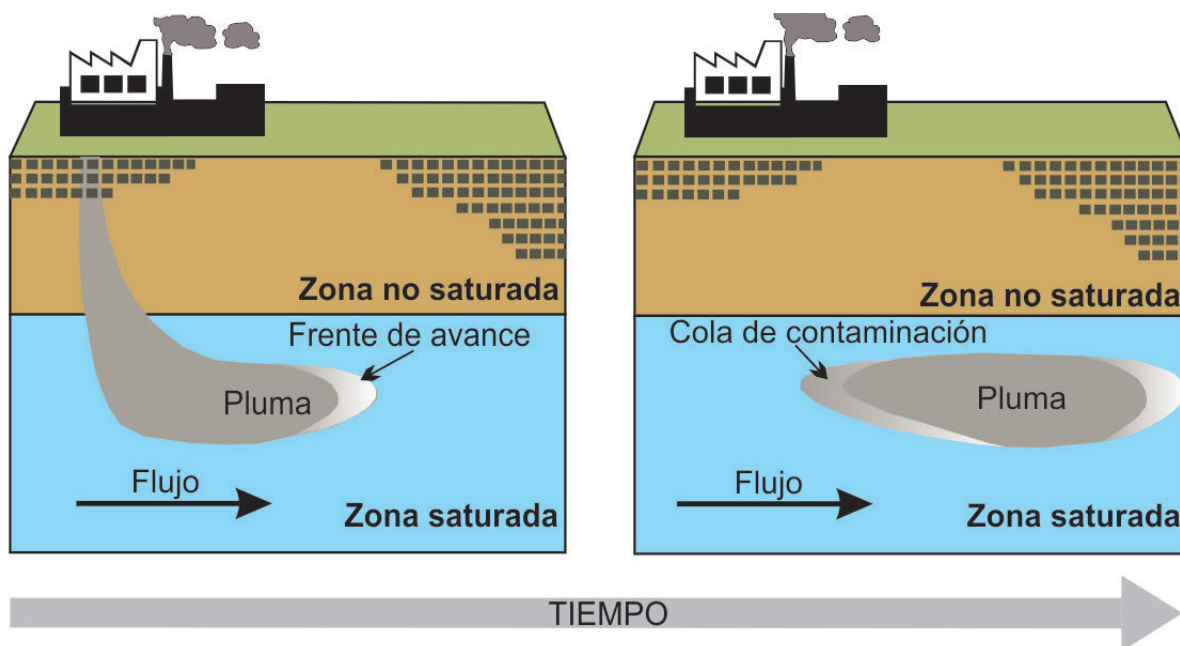


Figura 1.1 En acuíferos porosos, la contaminación se propaga en forma de pluma. La extensión de dicha pluma está controlada, predominantemente, por la velocidad del agua, los procesos de difusión molecular y la dispersión hidrodinámica, siendo la dilución un mecanismo poco eficiente en la atenuación de la concentración del contaminante.

Modificado de: https://www.enviro.wiki/index.php?title=File:Denham-Article_3-Figure_1.PNG

El establecimiento de un perímetro de protección conlleva un conjunto de restricciones sobre la actividad económica. Para minimizar el impacto de estas restricciones, los perímetros se dividen en zonas, de modo que las más próximas a la captación o más vulnerables están sujetas a limitaciones más estrictas, mientras que las más alejadas presentan restricciones menos severas. El artículo 243 quinquies del RDPH establece el número de zonas a definir, así como las limitaciones aplicables en cada una, que dependerán del volumen de agua extraída y de la población abastecida. En todo caso, deben delimitarse al menos dos zonas:

- **La zona inmediata o de restricciones absolutas:** se trata de una zona de acceso restringido, su objetivo es la protección sanitaria, en esta zona sólo se permitirán actividades asociadas con el mantenimiento de la captación.
- **La zona de protección general:** las dimensiones y limitaciones asociadas a esta zona se determinarán conforme a sus características y a los criterios establecidos en cada plan hidrológico de cuenca.

En el caso de captaciones de aguas subterráneas que abastezcan a más de 50.000 habitantes o que proporcionen un promedio de más de 10.000 m³/día, que dispongan de, al menos, una captación de agua subterránea, así como de otros aprovechamientos que el organismo de cuenca considere necesarios en función de la evaluación de riesgos de la zona de captación, se diferenciarán, al menos, cuatro zonas de protección asociadas a las captaciones de agua subterráneas existentes:

- **La zona inmediata o de restricciones absolutas:** similar a la definida en el apartado anterior.
- **Zona próxima o de restricciones máximas:** deberá garantizar que cualquier contaminante persistente degradable no pueda salir por la captación en un tiempo inferior al necesario para su inactivación.

- **Zona alejada o de restricciones moderadas:** esta zona debe garantizar que todo contaminante persistente que se infiltre a través de ella no pueda salir por la captación en tiempo inferior al necesario para desarrollar medidas para la protección de la captación. Además el tiempo de tránsito en el acuífero debe permitir la disolución y atenuación de contaminantes persistentes.
- **Zona de restricciones mínimas o envolvente:** tiene como objetivo proteger a la captación de contaminantes de larga persistencia. Las restricciones de esta zona pueden extenderse a toda el área de alimentación, incluso en muchos casos pudiera coincidir con los límites de la formación permeable del acuífero.

La norma además deja abierta la posibilidad de considerar la existencia de zonas satélites de protección cuando la tipología del acuífero así lo precise, como por ejemplo las áreas de recarga en acuíferos confinados, o zonas alejadas de conexión preferente en acuíferos kársticos.

En la figura 1.2 se presenta un esquema que muestra la idea de zonificación, según el RDPH, de los perímetros de protección de captaciones situadas sobre acuíferos porosos.

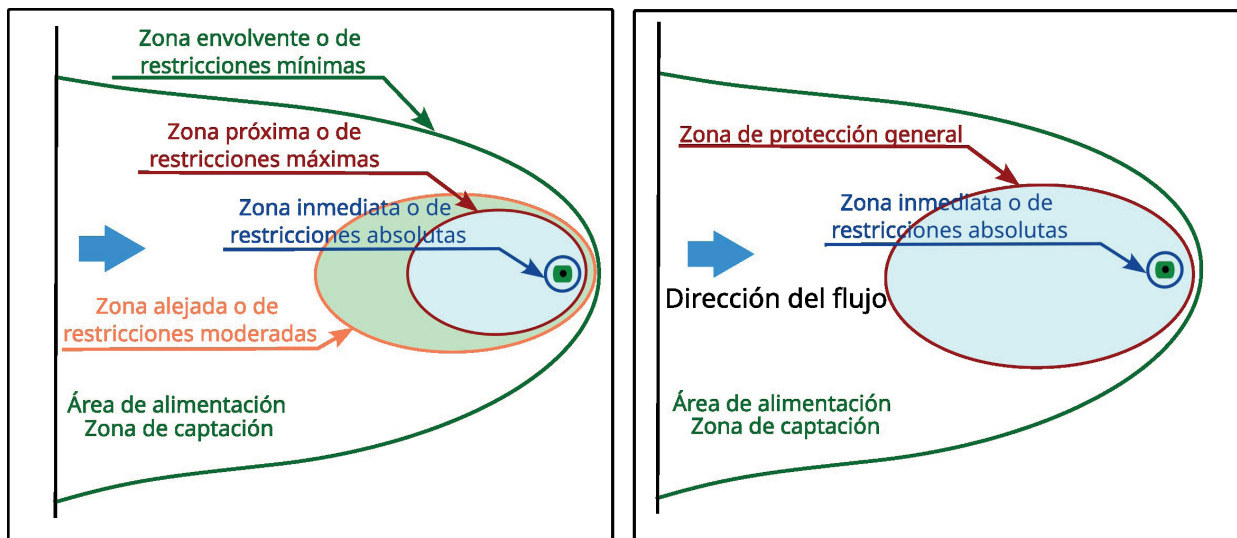


Figura 1.2 Se muestra la zonificación teórica de un perímetro de protección diseñado mediante isócronas para una captación situada sobre un acuífero poroso. A la izquierda la zonificación y restricciones corresponden a una captación que abastece a una población de más de 50.000 habitantes o bombea más de 10.000 m³/día, a la derecha un sondeo que abastece a una población igual o menor a 50.000 habitantes, o que bombea 10.000 m³/día o menos.

Los perímetros de protección están diseñados para prevenir la contaminación causada por vertidos de sustancias contaminantes sobre la superficie del acuífero. No obstante, existe otro tipo de contaminación frente al cual estos perímetros no resultan efectivos: la provocada por un bombeo excesivo. En este caso particular, una acción que afecta a la cantidad de agua extraída repercute también en su calidad, al modificar el patrón natural de flujo subterráneo e inducir la llegada a la captación de aguas

contaminadas o con una calidad inadecuada para el consumo. Este mecanismo es responsable, por ejemplo, de la salinización de acuíferos costeros debido a procesos de intrusión marina, o de la contaminación de captaciones cercanas a cuerpos de agua superficial de baja calidad. La figura 1.3 muestra un ejemplo de afección a la calidad de una captación de aguas subterráneas situada en las proximidades de un curso superficial contaminado.

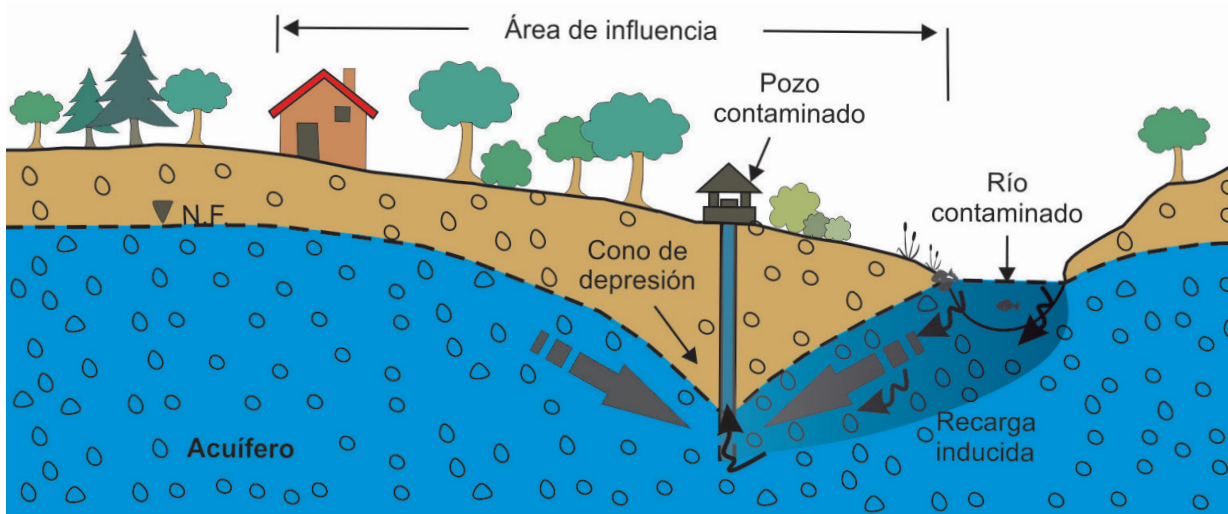


Figura 1.3 En la figura se ilustra como la contaminación puede alcanzar una captación cuando el bombeo induce la entrada de agua de mala calidad, por ejemplo, la procedente de masas de agua superficiales en mal estado. En el caso representado un río contaminado. En condiciones naturales el río representado se comportaría como ganador, incrementando su caudal a partir del acuífero. El bombeo cambia la dirección del flujo del agua, induciendo la recarga del acuífero con agua de mala calidad.

Modificado de: <https://www.ksre.k-state.edu/foodsafety/produce/resources/docs/Wells-Construction.pdf>

En cada una de las zonas se establecerán limitaciones al desarrollo de actividades potencialmente contaminantes (art. 243 ter. del RDPH):

“2. Dentro de los perímetros de protección, y conforme al artículo 97 del TRLA, queda prohibida, con carácter general y sin perjuicio de lo dispuesto en el artículo 100 de la citada ley, el ejercicio de actividades susceptibles de provocar la contaminación o degradación del dominio público hidráulico.”

“4. Los perímetros de protección podrán imponer condicionamientos a otras actividades o instalaciones que puedan afectar a la calidad y cantidad de las aguas, de forma directa o indirecta, poniendo en riesgo la consecución de los objetivos establecidos en la normativa sobre calidad de las aguas de consumo humano. Estas limitaciones se basarán en las recomendaciones incluidas en el anexo VIII que vincularán del mismo modo a las autoridades competentes en la elaboración de los instrumentos de ordenación urbanística, los cuales contendrán las previsiones adecuadas para garantizar la no afección de la calidad del agua en estas captaciones, cuestión que será evaluada a la hora de emitir el informe del artículo 25.4 del TRLA que habrán de solicitar dichas autoridades al organismo de cuenca.”

1.3. Procedimiento administrativo

1.3.1. Tipos de perímetros recogidos en el RDPH

El RDPH aborda varios tipos de perímetros como instrumentos de protección del DPH mediante la mitigación o la prevención (tabla 1.1).

Por un lado, regula en su artículo 172 la figura de los **perímetros para la ordenación de extracciones en masas de agua declaradas en riesgo de no alcanzar el buen estado** cuantitativo o químico como una medida que se puede incluir en el programa de actuación, con el objeto de la regulación conjunta del recurso disponible de una masa.

En la misma línea, se definen en el artículo 173 los **perímetros de protección para limitación de actuaciones en masas de agua subterránea declaradas en riesgo de no alcanzar el buen estado** que, como en el caso anterior, se podrán incluir en el programa de actuación. Siendo estos perímetros delimitados al amparo de los artículos 172 y 173, medidas de mitigación al amparo del artículo 56 del TRLA, relativo a las masas de agua subterránea declaradas en riesgo.

Por otro lado, en los artículos 243 ter, quater, quinquies y el anexo VIII, se regulan los **perímetros de protección de captaciones de agua destinadas al consumo humano, basados en la protección del estado químico**, con el objeto de mitigación y prevención de la calidad de captaciones tanto superficiales como subterráneas, teniendo en cuenta el mandato impuesto en el artículo 243 quater.1.:

“Los perímetros de protección de captaciones de agua, tanto de aguas superficiales como de aguas subterráneas, destinadas al consumo humano se recogerán en los planes hidrológicos. Para el caso de las aguas subterráneas destinadas al consumo humano se deberán delimitar perímetros de protección de calidad, siguiendo las directrices marcadas en el anexo VIII, que serán orientativas en el caso de las aguas superficiales”.

La presente guía trata exclusivamente sobre el diseño de perímetros para captaciones de aguas subterráneas destinadas al consumo humano.

Además, en los artículos 278 y 243 sexies se regulan los **perímetros de protección para zonas de especial interés y en los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas**, que sirven para proteger el estado del recurso con carácter preventivo en la mayor parte de los casos. Estos espacios incluyen las reservas naturales subterráneas.

Finalmente, el RDPH reconoce perímetros de protección delimitados al amparo de otra normativa que afecta al recurso hídrico fuera del dominio público hidráulico, por un lado, los **perímetros de protección para recursos mineros**, recogidas en el artículo 178, que reconocen las explotaciones mineras concedidas en virtud de la legislación de minas y, por otro, los **perímetros de protección de aguas minerales y termales**, recogidas en el anexo IV del RDPH y en el artículo 99bis.2.h del TRLA.

Tabla 1.1 Tipos de perímetros de protección recogidos en la legislación.

Perímetros	Estado cuantitativo	Estado químico	Tipo	Artículos del RDPH
Ordenación de extracciones en masas de agua declaradas en riesgo	X	X	Mitigación	172
Perímetros de protección	Estado cuantitativo	Estado químico		Artículos del RDPH
Captaciones superficiales y subterráneas para consumo humano		X	Mitigación y prevención	243 ter, quater, quinquies y anexo VIII
Zonas de especial interés y EDAS	X	X	Mayoritariamente prevención	278, 243 sexies y anexo VIII
Limitación de actuaciones en masas de agua declaradas en riesgo	X	X	Mitigación	173 y anexo VIII
Recursos mineros	—	—	—	178
Aguas minerales y termales	—	—	—	Cuadro del anexo IV

1.3.2. Marco normativo

El marco normativo en el que se encuadra la presente guía la componen estas normas:

- TRLA,
- RDPH₂₀₂₃, destaca la modificación llevada a cabo con el RD 665/2023, de 18 de julio,
- RPH y
- los planes hidrológicos vigentes de cada demarcación.

1.3.2.1. TRLA

El texto refundido de la ley de aguas recoge en varios artículos referencias a los perímetros de protección, algunas ya presentes en la ley de aguas de 1985 y otras incluidas como trasposición de la Directiva Marco del Agua. De este modo, fija dentro del contenido de los planes hidrológicos de cuenca, en concreto, en los programas de medidas, detalles de las medidas complementarias consideradas necesarias para cumplir los objetivos medioambientales establecidos, entre otras, los perímetros de protección, en su artículo 42.1 g).

Además, en su artículo 97 c) prohíbe las actividades susceptibles de constituir un peligro de contaminación o degradación del dominio público hidráulico dentro de los perímetros de protección fijados en los planes hidrológicos de cuenca.

Por otro lado, en su artículo 99 bis.2.a) relativo a las zonas protegidas, se incluyen las zonas en las que se realiza una captación de agua destinada a consumo humano, siempre que proporcione un volumen medio de al menos 10 metros cúbicos diarios o abastezca a más de cincuenta personas, así como, en su caso, los perímetros de protección delimitados.

Por su parte, en el artículo 99 bis.5 se recoge que los instrumentos de ordenación urbanística contendrán las previsiones adecuadas para garantizar la no afección de los recursos hídricos de las zonas incluidas mencionadas y los perímetros de protección que al efecto se establezcan por la Administración Hidráulica.

Por último, en la disposición final cuarta ap. 1, determina que el Gobierno, a propuesta de los ministros de Medio Ambiente, Sanidad y Consumo, regulará los requisitos básicos de calidad de las aguas de consumo, incluyendo las medidas de protección de las captaciones, con la finalidad de garantizar la protección de la salud.

1.3.2.2. RDPH₂₀₂₃

La modificación normativa del RDPH que entró en vigor el 20 de septiembre de 2023 incorpora los artículos 243 ter, 243 quater, 243 quinquies y 243 sexies, así como el anexo VIII, con el objetivo de dar la adecuada continuidad a los perímetros de protección vigentes y ser una herramienta esencial para agilizar la tramitación de los nuevos.

1.3.2.3. RPH

Los perímetros de protección de captaciones de agua, tanto de aguas superficiales como de aguas subterráneas, destinadas al consumo humano se fijarán en los planes hidrológicos de cuenca, de acuerdo con el artículo 57.1 del RPH. Y se incluirán dentro del registro de zonas protegidas, de acuerdo con los artículos 24.2 y 57.3 del RPH.

En el artículo 35 c) a') del RPH se establece que en las zonas en las que se realiza una captación de agua destinada a la producción de agua de consumo humano, tanto presentes como futuras, se velará por la necesaria protección de estas masas de agua con objeto de evitar el deterioro de su calidad y, cuando sea preciso, se podrán establecer perímetros de protección para esas masas de agua.

1.3.2.4. Planes hidrológicos de cuenca

Los planes hidrológicos de cuenca son instrumentos esenciales de la planificación hidrológica en España. Incluyen, entre sus contenidos, la identificación de las masas de agua que requieren protección especial, así como la designación de los perímetros de protección y la definición de las medidas específicas a aplicar en ellos para alcanzar los objetivos medioambientales y garantizar la calidad del agua. Son la base para la implementación de las medidas de protección a nivel de demarcación hidrográfica.

1.3.3. Tramitación administrativa de los perímetros de protección

La aprobación del perímetro de protección permite la protección en origen del DPH destinado al consumo humano desde el punto de vista de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero o de las tomas superficiales y se llevará a cabo de acuerdo con la tramitación y las características descritas en los artículos 243 ter y siguientes del RDPH. La priorización de las captaciones se establecerá teniendo en cuenta las establecidas en el propio RDPH, a las que se unirán las captaciones que decidan los organismos de cuenca, ayuntamientos o administraciones con competencias en abastecimiento, y aquellas para las que se establezca la necesidad de delimitar el perímetro de protección de acuerdo con el artículo 35 c) a') del RPH.

Las obligaciones prioritarias del RDPH se centran en las nuevas concesiones y las novaciones de abastecimientos, tanto de captaciones superficiales como subterráneas, de acuerdo con lo establecido en el artículo 243 ter.6 del RDPH, y para los sistemas de captaciones a más de 50.000 habitantes o más de 10.000 m³/día con al menos una toma subterránea, en los que se establece un plazo temporal que concluye el 20 de septiembre de 2027, en la disposición transitoria séptima del RDPH.

Para la aprobación de los perímetros de protección está prevista de forma ordinaria su tramitación conjunta con la revisión del plan hidrológico de la demarcación en la que se encuentre. Este procedimiento es por el que se recomienda optar, salvo que el organismo de cuenca o administración hidráulica competente, decidan que es más conveniente para la preservación del recurso el procedimiento excepcional.

De forma excepcional, se mantiene la tramitación por Junta de Gobierno (figura 1.4), previa información pública, para períodos entre planes hidrológicos. Este procedimiento se recomienda cuando se trate de casos de extrema urgencia o puntuales que no se puedan ajustar al calendario del ciclo de planificación.

Los perímetros de protección para captaciones de aguas subterráneas destinadas a consumo humano tienen carácter público por lo que el organismo de cuenca los tendrá disponibles en su cartografía en sus portales web, siempre garantizando la protección de las referencias geográficas de los puntos de extracción de acuerdo con lo dispuesto en el artículo 53 del RDAC, cuya información se comunicarán exclusivamente a las autoridades y operadores del agua correspondientes.

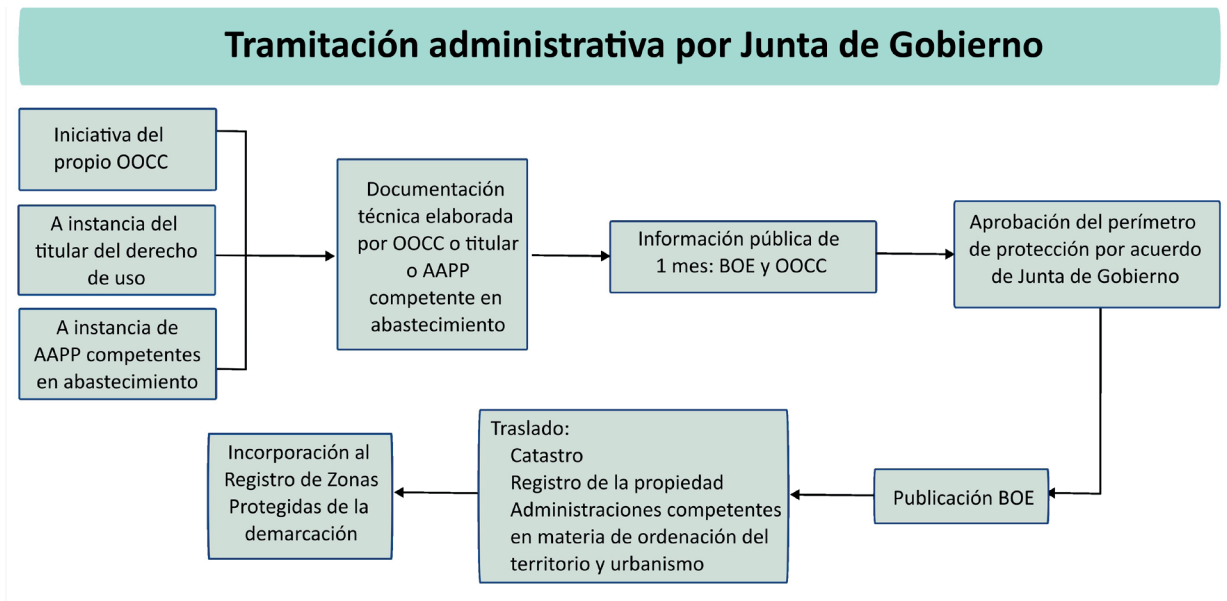


Figura 1.4 Tramitación administrativa extraordinaria para la aprobación de los perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas destinadas al consumo humano

1.3.4. Actividades que afectan a la calidad y cantidad de las aguas ubicadas dentro de un perímetro de protección

En el caso de que dentro del perímetro de protección existan actividades previas a su declaración que sean susceptibles de provocar la contaminación o degradación del dominio público hidráulico, de acuerdo con el artículo 243 ter del RDPH, los organismos de cuenca informarán a los titulares de las actividades y al resto de las administraciones cuyas competencias estén implicadas (como mínimo abastecimiento y ordenación del territorio) e instarán al establecimiento de un régimen transitorio, en la medida de lo posible, con el objeto de garantizar lo previsto en el artículo 92 bis del TRLA relativo a los objetivos medioambientales de las zonas protegidas establecidas para los abastecimientos afectados.

Las administraciones competentes informadas pueden decidir la adaptación o restricción de la actividad o, en última instancia, ordenar su cese o la reubicación de la captación.

Por su parte, los organismos de cuenca con sus competencias en la protección del DPH participarán, haciendo uso de los mecanismos jurídicos disponibles en virtud del reparto competencial vigente, emitiendo los correspondientes informes legalmente establecidos, como los informes urbanísticos, para garantizar la disponibilidad del recurso para el uso de abastecimiento.

En todo caso, los instrumentos de planificación urbanística (Planes Generales de Ordenación Urbana, etc.) deben recoger las limitaciones de uso del suelo establecidas por los perímetros de protección para asegurar su cumplimiento.



2. Conceptos básicos

2.1. Acuíferos, definición, tipos y funcionamiento

2.1.1. ¿Qué es un acuífero?

En hidrogeología se conoce como acuífero a toda formación geológica capaz de almacenar y transmitir agua. El término acuífero no hace referencia ni a la litología ni a la edad geológica del material sobre el que se desarrolla, únicamente a su capacidad para contener y transmitir agua. Dependiendo de la naturaleza y propiedades de los materiales que forman el acuífero, éste podrá contener más o menos agua, se moverá a mayor o menor velocidad y será más o menos fácil su aprovechamiento. El agua puede ser extraída de los acuíferos mediante obras de captación como pozos, sondeos, zanjas, galerías, o captada a partir de las surgencias naturales.

La hidrogeología es la ciencia que estudia el agua subterránea, su movimiento a través de los acuíferos, sus propiedades físicas y químicas, y su interacción con el medio ambiente. Gracias a esta disciplina científica, ha sido posible comprender y modelar tanto la disponibilidad como la calidad del agua subterránea. Entre sus principales aplicaciones se encuentran: la localización y explotación de acuíferos para el suministro de agua potable, agrícola e industrial; el apoyo a la gestión de recursos

hídricos, incluido el uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas; la regulación del consumo y el control de la sobreexplotación de acuíferos; la protección del medio ambiente evaluando la contaminación del agua subterránea y diseñando estrategias de prevención y remediación; la optimización del uso de la energía geotérmica somera y profunda como fuente de energía renovable; y el análisis del comportamiento e impacto del agua subterránea en túneles, presas, cimentaciones y otras estructuras.

Los acuíferos pueden estar formados por sedimentos sueltos, como arenas o gravas, pero también por rocas originalmente compactas que han desarrollado una red de huecos y grietas debido a procesos de disolución o fracturación. Asimismo, algunas rocas ígneas pueden funcionar como acuíferos cuando presentan en la superficie una capa alterada, de espesor variable, conocida como lehm, que permite el almacenamiento y circulación del agua subterránea.

La importancia de los acuíferos en la gestión de los recursos hídricos ha hecho necesario disponer de una definición legal, así el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas define:

- **Acuífero:** una o más capas subterráneas de roca o de otros estratos geológicos cuya porosidad y permeabilidad permiten un flujo significativo del agua subterránea o su extracción en cantidades significativas.
- **Masa de agua subterránea:** un volumen claramente diferenciado de agua subterránea en un acuífero o acuíferos.

- **Aguas subterráneas:** todas las aguas que se encuentran bajo la superficie del suelo en la zona de saturación y en contacto directo con el suelo o el subsuelo.

Estas definiciones legales añaden matices al significado puramente hidrogeológico, así, desde la perspectiva del TRLA una formación, para ser acuífero, además de contener agua debe de ser capaz de cederla en cantidades significativas.

Si bien la norma no define explícitamente qué se entiende por “cantidad significativa”, esta puede interpretarse como un volumen de agua lo suficientemente grande como para tener una utilidad práctica en el abastecimiento, el riego o el uso industrial. Lo relevante no es tanto una cifra absoluta de extracción, sino el contexto de necesidad o la falta de fuentes alternativas de suministro. Así, un manantial que aporta 0,06 l/s puede ser significativo para el abastecimiento de una aldea, pero irrelevante en

el caso de una ciudad. En el marco de la normativa europea –concretamente, en el Technical Report on Groundwater Body Characterisation Issues, discutido en el taller del 13 de octubre de 2003– se considera que una formación geológica es un acuífero cuando es capaz de suministrar al menos 10 m³/día o abastecer a más de 50 habitantes. Este umbral también se emplea para definir zonas protegidas según la Directiva Marco del Agua (DMA).

Cuando la formación geológica que contiene agua presenta una permeabilidad muy baja pierde la denominación de acuífero y pasa a llamarse **acuitardo**. Los acuitardos almacenan agua, pero la transmiten de forma muy lenta, muestran permeabilidades en el rango de 10⁻⁹ m/s a 10⁻¹¹ m/s (arcillas) y 10⁻⁷ m/s a 10⁻⁹ m/s (limos), mientras que la permeabilidad de las formaciones acuíferas se sitúa por encima de 10⁻⁴ m/s. No obstante, existen acuitardos muy extensos capaces de intercambiar importantes cantidades de agua con los acuíferos con los que están en contacto vertical, y es que, aunque la intensidad del flujo sea muy baja, la superficie de intercambio puede tener una gran extensión, lo que permite la transferencia de un volumen de agua considerable, figura 2.1.

Existen formaciones que pueden contener agua en su interior, pero no pueden transmitirla, se denominan **acuicludos**. Ejemplos de este tipo de formación serían las constituidas por arcillas muy compactadas o algunas rocas evaporíticas como la halita. Por último, se da la denominación de **acuifugos** a las formaciones que no transmiten ni almacenan agua.

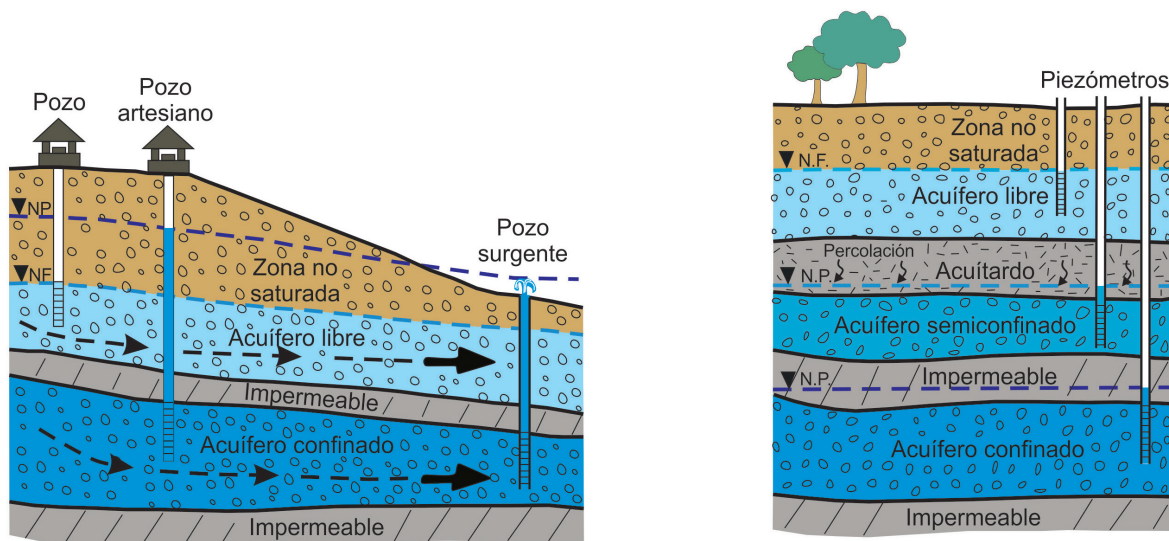


Figura 2.1 Ilustración de los conceptos acuífero, acuitardo, acuífero libre y acuífero confinado. En la figura de la izquierda además se muestra la diferencia entre un pozo artesiano, en el que el nivel del agua en la captación se eleva sobre el techo de la formación confinada, sin llegar a la superficie, y un pozo surgente, en el que la elevación del agua se sitúa sobre la superficie del terreno. NF nivel freático del acuífero libre. NP nivel piezométrico del acuífero confinado. Modificado de Zaragoza, H. (2019)

Los acuitardos y acuicludos pueden servir como capas de confinamiento para los **acuíferos confinados** (se describirán más adelante), dificultando o evitando la entrada o salida de agua de la formación, de esta forma delimitan diferentes reservorios y constituyen barreras frente a la contaminación, figura 2.1.

2.1.2. ¿Qué diferencia un acuífero de una masa de agua subterránea?

El concepto de masa de agua subterránea (MSBT) surge como respuesta a la necesidad de unificar las actuaciones en materia de gestión de agua en la Unión Europea. La Directiva Marco del Agua en el año 2000, introdujo el concepto general de masas de agua (*water bodies*) y, en particular, el de masas de agua subterránea (*groundwater bodies*) que se constituyeron como las unidades básicas de gestión, prestando especial atención al contenido, es decir el agua, y no tanto al continente, que es el acuífero. El fin que se perseguía era el de definir una unidad coherente de gestión y evaluación de las aguas subterráneas con el objetivo principal de describir su estado cuantitativo y cualitativo y de compararlo con unos objetivos medioambientales deseados, sin desligarse enteramente del concepto físico de acuífero que es delimitado atendiendo exclusivamente a criterios hidrogeológicos.

Sin embargo, no todas las aguas subterráneas tienen un papel notable o relevante, ni están necesariamente en formaciones geológicas que cumplen las características para ser consideradas acuíferos. Por ello, como principio rector para decidir sobre si las aguas subterráneas en esas formaciones constituían una masa de agua subterránea, se consideró si eran de importancia para los ecosistemas acuáticos y terrestres conectados, o si podían permitir la extracción de más de 10 m³/día, o satisfacer las necesidades de agua de 50 personas al día. A partir de la información geológica e hidrogeológica disponible se analizaron los sistemas acuíferos y las unidades hidrogeológicas, y se definieron las nuevas masas atendiendo a los criterios de la Directiva, para definir sus límites, generalmente geológicos o hidráulicos.

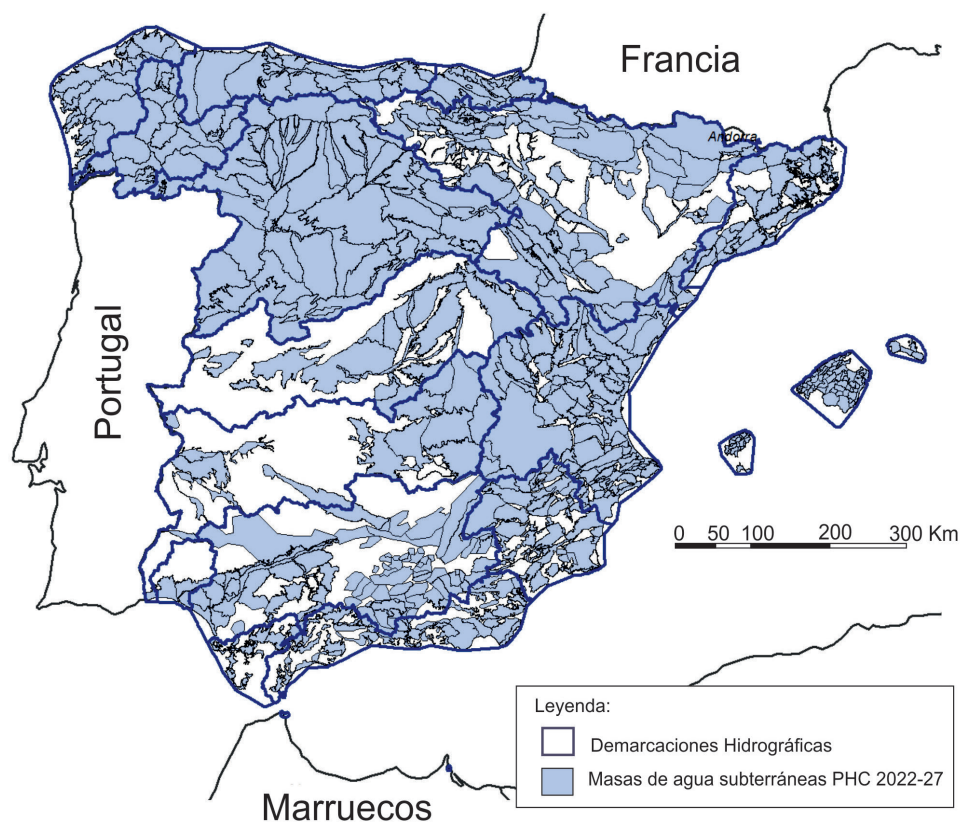


Figura 2.2 Masas de agua subterránea definidas en el tercer ciclo de planificación hidrológica.

La delimitación de las MSBT está en constante evolución, revisándose en cada proceso de planificación hidrológica, que se produce cada seis años desde el año 2009. En varios casos se han producido modificaciones y nuevas definiciones de masas a la luz de nuevos conocimientos hidrogeológicos y evolución en los criterios de gestión (figura 2.2), e incluso existen numerosas captaciones de agua para consumo humano que no se sitúan sobre ninguna MSBT definida oficialmente.

2.1.3. ¿Cómo se clasifican los acuíferos?

En este apartado se presentan las principales formas de clasificación de los acuíferos, incidiendo especialmente en su relevancia desde el punto de vista del diseño de perímetros de protección. Hay que destacar que la frontera entre los diferentes tipos de acuíferos con frecuencia no está claramente definida, y en la práctica la consideración de una unidad geológica como acuífero suele establecerse en función de la naturaleza del resto de las unidades geológicas de la región en la que se enmarca. En muchas ocasiones dependen de la idoneidad de la formación para ser explotada en comparación con otras formaciones existentes. En una región sin grandes recursos hídricos se pueden extraer pequeños caudales de agua subterránea de un acuífero pobre, que sería considerado como un acuitardo en otras zonas con litologías más favorables para la exploración hidrogeológica. Además, existen numerosos criterios de clasificación, no excluyentes: estructurales, litológicos, funcionales, etc.

2.1.3.1. Clasificación de los acuíferos en función de su grado de confinamiento

Esta clasificación atiende a la estructura física del acuífero y su relación con las formaciones que lo rodean.

- **Acuíferos libres, no confinados o freáticos:** en este tipo de formaciones existe continuidad en el espacio poroso desde la zona saturada hasta la atmósfera, por lo que la superficie del agua se encuentra a presión atmosférica. En una perforación realizada desde la superficie del terreno, el nivel del agua se sitúa y mantiene a la misma cota que en el acuífero.

La recarga de este tipo de acuíferos se realiza, principalmente, por infiltración del agua de lluvia a través del suelo, o por infiltración desde masas de agua como los ríos o lagos, incluso los retornos de regadío pueden llegar a ser un porcentaje significativo de la recarga, en muchas ocasiones con un notable impacto sobre la calidad de las aguas.

La superficie freática es el lugar geométrico de los puntos en los que el agua subterránea se encuentra a presión atmosférica. Es una superficie física que separa la zona saturada de la no saturada.

Tanto la zona saturada como la no saturada forman parte del acuífero, siendo su límite dinámico, asciende o desciende según varía la relación entre la recarga y las extracciones.

- **Acuíferos confinados, cautivos, a presión o en carga:** están cubiertos por una capa de baja permeabilidad, como arcillas o margas, que actúa como capa confinante impidiendo el flujo vertical. El agua en el interior de estas formaciones está a una presión superior a la atmosférica.

Desde la perspectiva de los perímetros de protección, los acuíferos confinados en carga se consideran como poco vulnerables a la contaminación. Sin embargo, estos acuíferos se alimentan desde zonas alejadas donde pierden el confinamiento y se comportan como acuíferos libres. En esas zonas sí pueden ser muy vulnerables. En la naturaleza lo más frecuente es encontrar acuíferos semiconfinados en

los que las capas confinantes son semipermeables (acuitardos), existiendo un cierto flujo de agua y, por tanto, mostrando un grado de vulnerabilidad más o menos intenso según la permeabilidad del confinante y la relación de presiones entre el acuífero confinado y el acuífero libre que se puede desarrollar sobre la capa impermeable.

Si se perfora un sondeo hasta alcanzar un acuífero confinado, el agua ascenderá hasta alcanzar un equilibrio con la presión atmosférica; a este fenómeno se le denomina artesianismo. Cuando la presión es suficiente, el ascenso de agua supera la superficie del terreno dando lugar a una captación surgente. Todos estos conceptos se ilustran en las figuras 2.3 y 2.5.

El nivel que alcanza el agua en el interior de un sondeo ranurado en un punto, construido en un acuífero confinado o en carga, se denomina **nivel piezométrico**. A la representación en un plano del lugar geométrico que une todos los puntos del mismo nivel piezométrico se le denomina **isopie-**

za, al conjunto de isopiezas se le denomina **superficie piezométrica**. Puesto que la presión del agua en todos los puntos de un acuífero confinado es mayor que la atmosférica, la superficie piezométrica estará siempre por encima del techo del acuífero y será, por lo tanto, una superficie virtual.

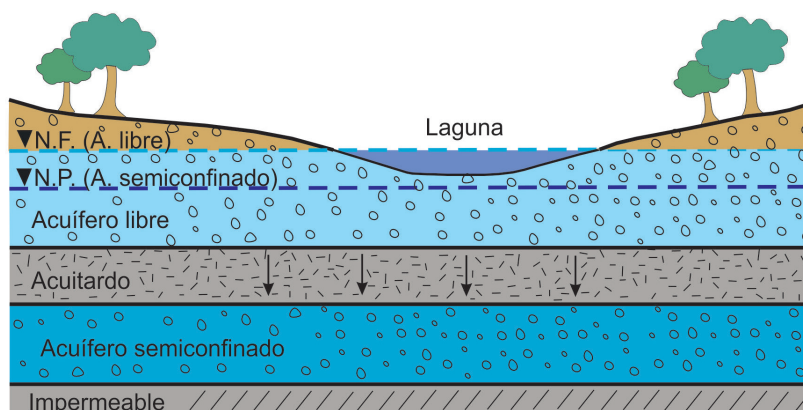


Figura 2.3 Relación entre un cuerpo de agua superficial, en este caso una laguna, el acuífero libre superior, y un acuífero semiconfinado inferior.

La recarga de un acuífero confinado procede principalmente de la lluvia que se infiltra directamente a través de la zona en la que aflora la formación acuífera, es decir, donde el acuífero se comporta como libre (figura 2.4), o bien donde se puede considerar como semiconfinado y las relaciones de presión entre el acuífero confinado y el acuífero libre son favorables.

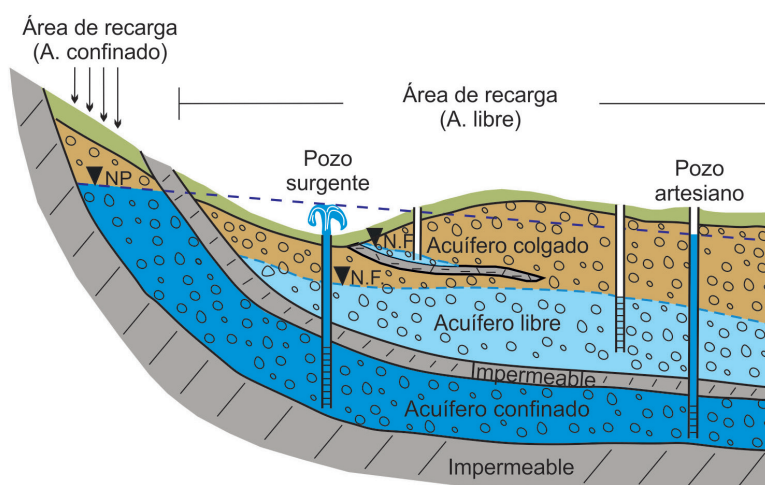


Figura 2.4 Estructura típica de un sistema complejo con presencia de acuíferos confinados, no confinados, libres, colgados, etc. Se ve como el acuífero confinado se recarga principalmente desde la zona en que deja de serlo, mientras que el acuífero libre tiene un área de recarga mucho más extensa, abarcando toda su superficie.

Modificado de: <https://www.ngwa.org/what-is-groundwater/About-groundwater/unconfined-or-water-table-aquifers>

- **Acuíferos semiconfinados o semicaútivos:** se trata de un caso particular de los acuíferos confinados que se produce cuando los estratos confinantes no son totalmente impermeables y permiten la circulación vertical de caudales muy pequeños de agua.
- Un caso especial son los **acuíferos colgados** (figura 2.4), que se producen cuando en una matriz no saturada se intercalan "lentejones" saturados de agua sostenidos por la presencia de una capa impermeable local que impide que el agua drene y alcance el nivel saturado general. Estos niveles colgados suelen tener escasa extensión y su nivel se sitúa por encima del nivel del acuífero regional. Si los sondeos de captación no están correctamente diseñados, pueden poner en comunicación los niveles colgados con el acuífero principal, lo que incrementa el riesgo de contaminación al comunicar acuíferos con diferente calidad de agua.

La piezometría de un acuífero (figura 2.5) permite conocer la dirección del flujo del agua subterránea que de forma natural fluye desde zonas de mayor nivel piezométrico hacia zonas de menor nivel debido a la diferencia de energía potencial. La piezometría permite entender cómo se desarrolla el patrón de flujo en los acuíferos. Esto es fundamental para planificar la gestión de los recursos hídricos y la prevención de la contaminación.

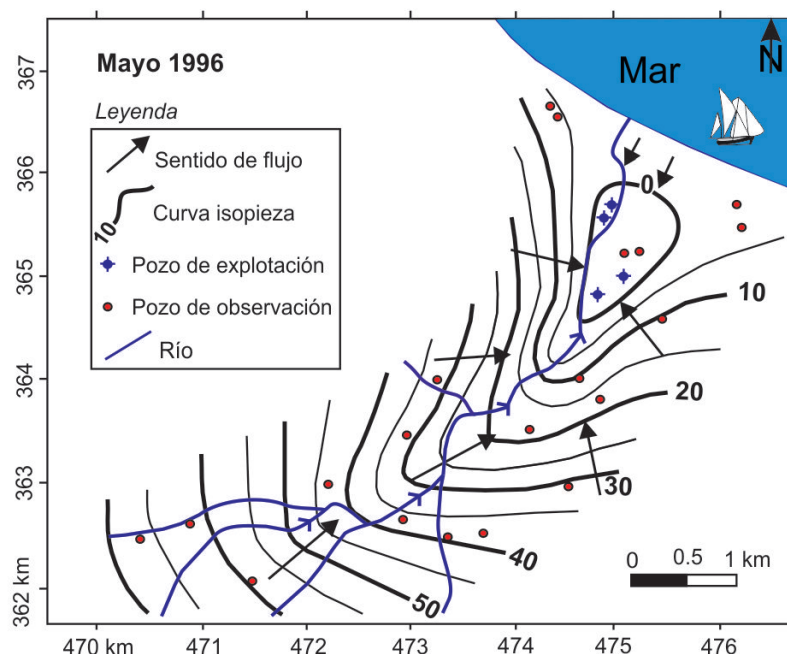


Figura 2.5 Ejemplo de plano piezométrico representando isopiezas y direcciones de flujo. Los puntos rojos son los piezómetros de observación a partir de cuyas medidas se han dibujado las isopiezas y los puntos con cruz azul un campo de sondeos de bombeo que han formado un cono de depresión muy próximo al mar induciendo la entrada de agua salada.

Modificado de https://www.researchgate.net/publication/285132622_Hydrogeological_characterization_of_the_Nador_Plio-Quaternary_aquifer_Tipaza_Algeria

2.1.3.2. Clasificación de los acuíferos en función del tipo de porosidad

Los acuíferos también pueden clasificarse en función de la estructura del espacio vacío de la matriz sólida a través del cual circula el agua.

- **Acuíferos con porosidad intergranular.** La porosidad se genera por el espacio que dejan entre sí los materiales detríticos, fragmentos de minerales y rocas no consolidados (gravas, arenas, limos y sus mezclas) a través de los cuales circula el agua. Ejemplos de este tipo de acuíferos no consolidados son los depósitos fluviales, aluviales o eólicos, las lla-

nuras costeras o los depósitos glaciares, y como consolidados los depósitos de grandes cuencas terciarias.

- **Acuíferos con porosidad por fisuración.** Cuando las rocas duras e impermeables se fracturan debido a diversos procesos geológicos, se forman redes de fisuras con desarrollo, tamaño, orientación y densidad muy variables. Cuando estas fisuras o grietas tienen la capacidad de almacenar y transmitir agua dan lugar a un tipo particular de acuífero, conocido como acuífero fisurado.
- **Acuíferos con porosidad por disolución.** En rocas competentes solubles, pueden formarse grietas a partir de pequeñas fisuras o planos de estratificación. La circulación de agua a través de estas discontinuidades disuelve la roca y genera conductos, canales y cavidades, pudiendo dar lugar a acuíferos de gran extensión y con una notable capacidad para almacenar y transmitir agua. Este tipo de acuífero se conoce como kárstico.

2.1.3.3. Clasificación de los acuíferos en función del tipo de roca

- **Depósitos no consolidados de materiales sueltos:** son formaciones geológicas constituidas por la acumulación de partículas transportadas por la gravedad, el agua, el viento o el hielo, en ambientes fluviales, lacustres o marinos. Este tipo de acuífero puede ser muy permeable y capaz de suministrar caudales notables.
- **Rocas sedimentarias consolidadas:** se trata de sedimentos que se han consolidado debido a procesos de compactación o diagénesis. Se pueden clasificar según su origen en: **detritico** (conglomerados, areniscas, arcillas), **químico** (calizas, dolomías, margas) y **orgánico** (rocas bioclásticas, carbones). Las rocas más importantes son las calizas y dolomías, cuya densidad, porosidad y permeabilidad son muy variables dependiendo del ambiente sedimentario de formación y los procesos de disolución posteriores. Este tipo de rocas, si no están fisuradas o karstificadas son poco permeables. Las areniscas (arenas consolidadas) y calcarenitas (areniscas de granos carbonáticos) suelen constituir también importantes acuíferos. Se estima que las rocas sedimentarias consolidadas contienen del orden del 75 % de las aguas subterráneas continentales españolas.

El término **diagénesis** hace referencia al conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos que afectan a los sedimentos después de su deposición y durante y después de su conversión en roca, pero antes de que la roca sufra metamorfismo. Estos procesos incluyen la compactación, cementación, recristalización, diversas reacciones

químicas y la acción biológica. La diagénesis ocurre en condiciones de temperatura y presión relativamente bajas, típicas de la corteza superficial, y puede continuar durante millones de años. Este proceso es fundamental en la formación de rocas sedimentarias y en la evolución de sus propiedades físicas y químicas.

- **Rocas ígneas y metamórficas:** las posibilidades de formar acuíferos en estas rocas quedan reducidas a la zona alterada superficial o a las fracturas por fallas y diaclasas que permiten la circulación del agua. Tienen especial importancia en el abastecimiento a pequeños núcleos de población y ámbito rural.
- **Rocas volcánicas:** se comportan de manera muy heterogénea, pueden constituir o no importantes acuíferos; su comportamiento hidráulico se encuentra entre las rocas consolidadas porosas y las fracturadas. Los niveles de cenizas, piroclastos, grietas de retracción y fracturas juegan un notable papel en el desarrollo de la porosidad del conjunto. Los factores principales que van a condicionar el flujo de agua subterránea son la composición, edad y sobre todo el grado de alteración de la roca.

2.1.3.4. Clasificación de los acuíferos desde la perspectiva de los perímetros de protección

Desde el punto de vista del diseño de perímetros de protección los acuíferos se agrupan en cuatro clases:

- **Porosos:** están formados por materiales sueltos, detríticos, que dejan espacio entre los granos y permiten que el agua circule y se almacene. Materiales típicos de este tipo de acuífero son las arenas y gravas.
- **Asimilables a porosos:** son acuíferos que sin ser porosos se comportan como tales a la escala de trabajo, de forma que el flujo de agua en su interior responde a la ley de Darcy. Este tipo de acuífero se desarrolla, por ejemplo, sobre rocas carbonáticas muy microfracturadas.
- **Kársticos:** este tipo de acuífero se desarrolla cuando el agua circula a través de conductos formados por la disolución de la matriz geológica, típicamente materiales solubles como calizas, dolomías y yesos.
- **Fisurados:** son los formados sobre materiales duros no solubles, típicamente sobre rocas ígneas como el granito, metamórficas como gneises, cuarcitas o pizarras; incluso sobre algunas rocas volcánicas como lavas basálticas. En este tipo de acuífero el agua subterránea circula principalmente a través de grietas, fracturas y fisuras de la roca.

2.2. Parámetros hidrogeológicos e hidrodinámicos

Se presenta en este apartado la definición de los principales parámetros hidrogeológicos e hidrodinámicos que permiten entender cómo se mueve el agua subterránea a través de los acuíferos.

El principio físico que rige el movimiento del agua en acuíferos porosos se describe mediante la **Ley de Darcy**. Esta constituye el principio fundamental de la hidrogeología y es de aplicación en geotecnia e ingeniería de fluidos. Fue formulada en 1856 por el ingeniero francés Henry Darcy cuando trabajaba en el diseño del sistema de abastecimiento a la ciudad de Dijon y experimentaba con filtros de arena.

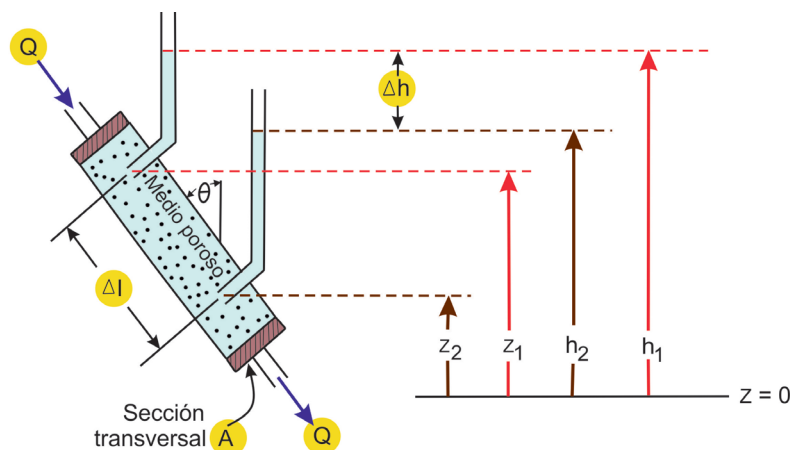


Figura 2.6 Representación esquemática de la Ley de Darcy. La figura muestra el flujo de agua en un medio poroso saturado inducido por un gradiente hidráulico. La ley establece que el caudal volumétrico (Q) es proporcional al gradiente de carga hidráulica ($\Delta h/\Delta l$) y a la sección de acuífero que transmite agua (A), siendo la constante de proporcionalidad la conductividad hidráulica del medio. Modificado de Freeze, R.A. y Cherry, J.A. (1979)

En la figura 2.6 se muestra gráficamente la explicación de la ley de Darcy. La ecuación de Darcy toma la siguiente forma:

$$Q = K A \frac{dh}{dl}$$

Q	caudal volumétrico (m ³ /s),
K	conductividad hidráulica del medio poroso (m/s),
A	área transversal al flujo (m ²),
dh/dl	gradiente hidráulico (la variación de carga hidráulica por unidad de longitud).

El signo negativo indica que el flujo de agua se mueve desde las zonas de mayor carga hidráulica hacia las zonas de menor carga, o expresado de otra manera, de las zonas con mayor energía potencial hacia aquellas con menor energía potencial.

La Ley de Darcy se deriva de la ecuación de continuidad y de los principios de la mecánica de fluidos para flujo en medios porosos. Sin embargo, solo es aplicable bajo ciertas condiciones:

- El flujo ha de ser **laminar**. Para flujos turbulentos, se requiere la inclusión de términos no lineales.
- El medio ha de ser **homogéneo e isótropo**. Aunque en la realidad muchos acuíferos y formaciones geológicas presentan heterogeneidad y anisotropía las condiciones del flujo aún permiten aplicar la ley de Darcy de forma suficientemente precisa.
- **No considera efectos de compresibilidad**, lo cual sería relevante en flujos de hidrocarburos y en acuíferos muy profundos en los que el agua se encuentra a alta presión.
- **No es directamente aplicable a materiales no saturados**. El flujo de agua en medios no saturados obedece a ecuaciones mucho más complejas, se caracteriza por la retención del agua debido a las fuerzas capilares en los poros de pequeño diámetro. En estas condiciones, la permeabilidad relativa disminuye a medida que lo hace la saturación del medio. Otros fenómenos, como la tensión superficial, también juegan un papel relevante en la distribución del agua en medios no saturados. Además, el flujo no saturado presenta el fenómeno de histéresis, tomando la permeabilidad valores diferentes para un mismo contenido en humedad dependiendo de si el material está humedeciéndose o secándose.

La ley de Darcy se aplica ampliamente en el estudio del flujo de agua subterránea en medios porosos. Permite modelar el flujo en acuíferos, evaluar tasas de extracción de agua y diseñar sistemas de recarga artificial. La ley de Darcy permite el cálculo de la velocidad del flujo subterráneo y estimar el tiempo de tránsito del agua. Su aplicación es fundamental en Ingeniería civil y geotecnia, por ejemplo, en el diseño de filtros y drenajes en presas, cimentaciones y muros de contención, así como en el análisis de estabilidad de estructuras como túneles y taludes. Por otra parte, se trata de una ley ampliamente utilizada en estudios ambientales y de gestión de la contaminación de las aguas subterráneas y suelos. La ley de Darcy puede combinarse con ecuaciones de transporte de solutos para modelar el comportamiento de plumas de contaminación en medios porosos.

En los medios fracturados el flujo no sigue estrictamente la Ley de Darcy y puede requerir modelos de flujo específicos o incluso modelos duales de flujo que consideren tanto el flujo en medio poroso como en medio fracturado.

2.2.1. Área de alimentación, zona de captación y área de recarga de un acuífero

El área de alimentación de una captación (figura 2.7), ya sea pozo, sondeo o manantial, es el volumen de terreno, o su proyección en planta, desde el cual el flujo subterráneo converge hacia el punto de extracción o surgencia. Su geometría y extensión, condicionadas por las líneas de flujo, pueden alterarse por bombeo u otras extracciones forzadas. Se trata de un término ampliamente utilizado en la literatura hidrogeológica, sus dimensiones dependen, entre otros factores, de:

- el régimen de explotación (caudal bombeado),
- las propiedades hidráulicas del acuífero (permeabilidad, transmisividad),
- el gradiente hidráulico y la geometría del sistema,
- las interferencias con otras captaciones cercanas.

El término “zona de captación” se define en el artículo 2.1.y) del RDAC como:

“Zona de captación: zona en la que se produce la captación de agua destinada a la producción de agua de consumo, y en la que las actividades presentes, usos de suelo o naturaleza de éste pueden tener influencia en la calidad del agua captada. [...]”

3.º En el caso de captaciones de aguas subterráneas será la superficie del terreno tal que el agua que se infiltra a su través puede acabar saliendo por la captación en condiciones normales de servicio. En su determinación podrán excluirse zonas que por su lejanía no vaya a tener influencia en la calidad del agua en el punto de extracción. Está delimitación también se aplicará en el caso de los manantiales.”

Ambos términos pueden considerarse equivalentes y en este documento se emplearán de forma indistinta.

El agua que se extrae de una captación no solo proviene de la lluvia que cae en sus inmediaciones, puede provenir de agua que se infiltró a varios kilómetros de distancia, de la transferencia de masas de agua superficial (ríos, lagos, embalses, etc.) o de otras masas de agua subterránea.

Es fundamental no confundir el área de alimentación de una captación con el **área de recarga del acuífero**. El área de recarga de un acuífero es la región en la que el agua meteórica (lluvia, nieve) se infiltra y aumenta el volumen de agua almacenada en el acuífero. El área de recarga puede ubicarse lejos del punto de captación, como ocurre en el caso de los acuíferos confinados.

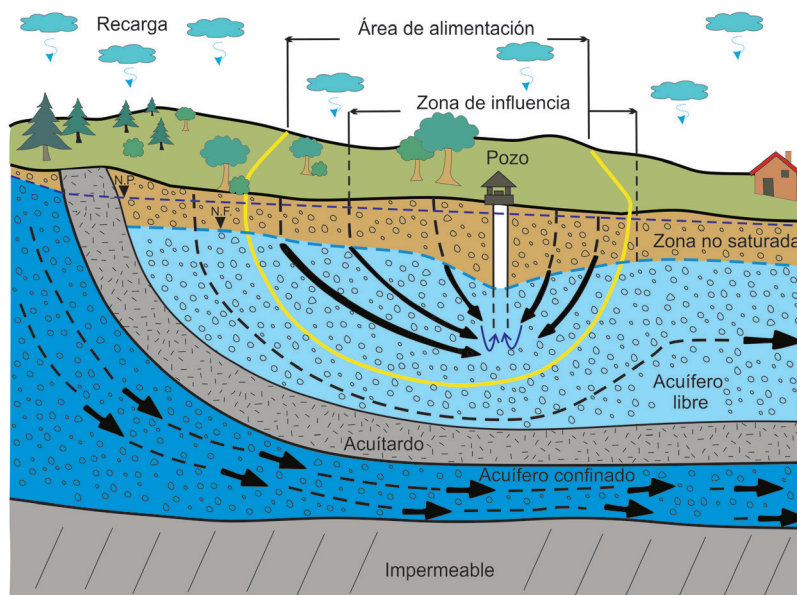


Figura 2.7 Comparación de los conceptos área de alimentación de una captación, en la que el agua circula y termina saliendo por la captación y zona de influencia, que es la zona en la que el bombeo de la captación afecta a los niveles piezométrico o freático.

Modificado de <https://ehs.msu.edu/enviro/whpp/wh-17glossary.html>

2.2.2. Parámetros hidrogeológicos e hidrodinámicos básicos

Para poder entender el comportamiento del agua y los contaminantes en los acuíferos es necesario conocer una serie de parámetros hidrogeológicos e hidrodinámicos que se presentan a continuación:

- **Conductividad Hidráulica (K):** es una propiedad del medio poroso que mide la capacidad del material para transmitir agua bajo un gradiente de presión. Depende de la permeabilidad del material y de las propiedades del fluido, como su viscosidad y densidad. Se expresa en unidades de longitud por tiempo (m s^{-1} , cm s^{-1}).
- **Permeabilidad Intrínseca (k):** caracteriza la capacidad de un medio poroso para permitir el paso de fluidos sin considerar las propiedades de este. Depende de la estructura y tamaño de los poros. Se mide en m^2 o darcies ($1 \text{ darcy} \approx 9,87 \times 10^{-13} \text{ m}^2$).

La permeabilidad intrínseca y la conductividad hidráulica se relacionan mediante la ecuación:

$$K = \frac{k \rho g}{\mu}$$

- k permeabilidad intrínseca (m^2),
- K conductividad hidráulica (ms^{-1}),
- μ viscosidad dinámica del fluido ($\text{Pa}\cdot\text{s}$),
- ρ densidad del fluido (kg/m^3),
- g aceleración de la gravedad (m/s^2).

- **Porosidad (ϕ):** es la fracción del volumen total de la roca o el suelo que está ocupada por espacios vacíos. Se expresa como un porcentaje. Se pueden diferenciar diferentes tipos de porosidad (figura 2.8).
- **Porosidad total:** volumen total de espacio en la matriz porosa que no está ocupada por materia sólida. Incluye todos los espacios vacíos de la formación, conectados o no conectados.
- **Porosidad conectada:** fracción de la porosidad total que presenta continuidad física.
- **Porosidad eficaz (porosidad efectiva):** fracción de la porosidad total que está interconectada y contribuye al flujo.
- **Porosidad primaria:** es la porosidad asociada a la estructura original del material geológico. Es típica de sedimentos no consolidados, como arenas o gravas, y depende del tamaño, la forma y el tipo de empaquetamiento de los granos.
- **Porosidad secundaria:** es la porosidad originada por la presencia de fracturas, disolución de la matriz u otros procesos geológicos posteriores a la formación de la roca. Es propia de rocas consolidadas como calizas, areniscas, basaltos, etc.

2. Conceptos básicos

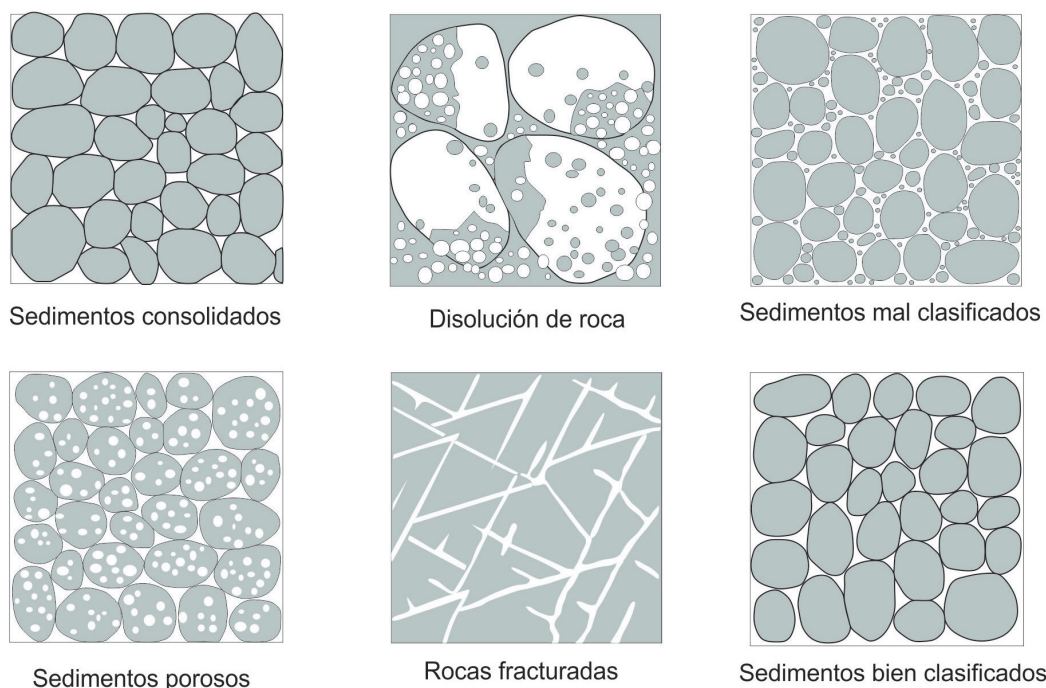


Figura 2.8 La ilustración muestra cómo los sedimentos mal clasificados generan una matriz con menor porosidad eficaz, ya que los clastos de menor tamaño tienden a rellenar los espacios entre los más grandes. También se observa que, aunque los poros ocluidos pueden aumentar la porosidad total, reduce la porosidad eficaz. Asimismo, se destaca la importancia de la orientación de las grietas en materiales fracturados, ya que influye significativamente en la conectividad y el flujo a través del medio.

En la tabla 2.1 se presentan valores representativos de la porosidad total, porosidad efectiva y conductividad hidráulica correspondientes a diversos tipos de materiales geológicos.

Tabla 2.1 Valores representativos de la porosidad total, porosidad efectiva y conductividad hidráulica de diferentes tipos de material.
https://www.enviro.wiki/index.php?title=Groundwater_Flow_and_Solute_Transport

Material Acuífero	Porosidad Total (adimensional)	Porosidad Efectiva (adimensional)	Conductividad Hidráulica m s ⁻¹
No Consolidados			
Grava	0,25 - 0,44	0,13 - 0,44	$3 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-2}$
Arena Gruesa	0,31 - 0,46	0,18 - 0,43	$9 \times 10^{-7} - 6 \times 10^{-3}$
Arena Media	—	0,16 - 0,46	$9 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-4}$
Arena Fina	0,25 - 0,53	0,01 - 0,46	$2 \times 10^{-7} - 2 \times 10^{-4}$
Limo, Loess	0,35 - 0,50	0,01 - 0,39	$1 \times 10^{-9} - 2 \times 10^{-5}$
Arcilla	0,40 - 0,70	0,01 - 0,18	$1 \times 10^{-11} - 4,7 \times 10^{-9}$
Rocas Sedimentarias y Cristalinas			
Caliza Cárstica y de Arrecife	0,05 - 0,50	—	$1 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-2}$
Caliza, Dolomita	0,00 - 0,20	0,01 - 0,24	$1 \times 10^{-9} - 6 \times 10^{-6}$
Arenisca	0,05 - 0,30	0,10 - 0,30	$3 \times 10^{-10} - 6 \times 10^{-6}$
Lutita	—	0,21 - 0,41	$1 \times 10^{-11} - 1,4 \times 10^{-8}$
Basalto	0,05 - 0,50	—	$2 \times 10^{-11} - 2 \times 10^{-2}$
Roca Cristalina Fracturada	0,00 - 0,10	—	$8 \times 10^{-9} - 3 \times 10^{-4}$
Granito Meteorizado	0,34 - 0,57	—	$3,3 \times 10^{-6} - 5,2 \times 10^{-5}$
Roca Cristalina No Fracturada	0,00 - 0,05	—	$3 \times 10^{-14} - 2 \times 10^{-10}$

- **Coefficiente de Almacenamiento (S):** es la cantidad de agua que un acuífero puede almacenar o liberar por unidad de área del acuífero y por unidad de cambio en el nivel piezométrico. Se expresa en unidades de volumen/volumen (adimensional). Este coeficiente es fundamental en la hidrogeología para caracterizar el comportamiento de los acuíferos y la respuesta del agua subterránea a los cambios en la carga hidráulica. En acuíferos confinados depende principalmente de la compresibilidad del agua y de la elasticidad de la matriz del acuífero. En acuíferos no confinados está relacionado con la porosidad eficaz y el grado de saturación del medio.

$$S = \frac{\Delta V}{A \Delta h}$$

S coeficiente de almacenamiento (adimensional),
 ΔV cambio en el volumen de agua almacenado (m³),
A área del acuífero afectado (m²),
 Δh cambio en la altura piezométrica (m).

Los valores típicos de coeficiente de almacenamiento en acuíferos libres se sitúan en el rango 0,1 a 0,3 mientras que en acuíferos confinados suelen situarse entre 10⁻⁵ a 10⁻³.

- **Gradiente Hidráulico (i):** es la razón entre la diferencia de carga hidráulica entre dos puntos y la distancia que los separa medidos en la dirección del flujo. Se expresa como:

$$i = \frac{dh}{dl}$$

i gradiente hidráulico (adimensional),
 dh diferencia de carga hidráulica entre dos puntos (m),
 dl distancia entre los dos puntos (m).

- **Transmisividad (T):** es una medida de la capacidad de un acuífero para transmitir agua a través de su espesor saturado. Se expresa en unidades de m² y tiempo, se define como:

$$T = Kb$$

T transmisividad (m² s⁻¹),
K conductividad hidráulica (m s⁻¹),
B espesor saturado del acuífero (m).

La transmisividad de un acuífero o captación determina la cantidad de agua que puede suministrar.

- **Coefficiente de Difusividad (D):** este coeficiente relaciona la transmisividad con el coeficiente de almacenamiento y determina la rapidez con la que se propagan las perturbaciones de carga hidráulica en un acuífero. Se expresa en unidades de m² s⁻¹:

$$D = \frac{T}{S}$$

D coeficiente de difusividad (m² s⁻¹),
T transmisividad (m² s⁻¹),
S coeficiente de almacenamiento (adimensional).

El coeficiente de difusividad indica la velocidad a la que las perturbaciones (como la extracción de agua o la recarga) se propagan a través del acuífero. Cuanto mayor es la difusividad de un acuífero, los cambios en el nivel del agua se propagan más rápidamente. Dado que en los acuí-

feros libres el coeficiente de almacenamiento suele ser mayor que en los confinados, y que la difusividad depende de la relación entre transmisividad y almacenamiento, las perturbaciones tienden a propagarse más rápidamente en acuíferos confinados, siempre que la transmisividad sea comparable.

Este parámetro es imprescindible en estudios hidrogeológicos para modelar la respuesta de un acuífero a la explotación de agua subterránea y para diseñar estrategias de gestión hídrica.

- **Velocidad del Flujo Subterráneo (v):** la velocidad del flujo de agua subterránea puede deducirse a partir de la Ley de Darcy, pero considerando únicamente la fracción de poros que transmite el agua subterránea. Se expresa en unidades de m s^{-1} :

$$v = \frac{K i}{n_e}$$

v velocidad del agua subterránea (m s^{-1}),
 K conductividad hidráulica (m s^{-1}),
 i gradiente hidráulico (adimensional),
 n_e porosidad efectiva (fracción de volumen de poros conectados que pueden transportar agua, adimensional).

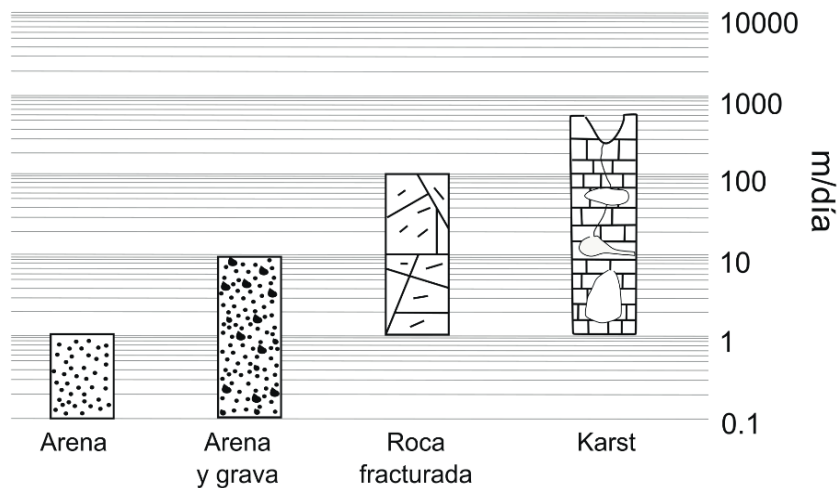


Figura 2.9 Rangos típicos de velocidades de movimiento del agua subterránea para diversos tipos de acuíferos. En casos específicos estos rangos pueden ampliarse según la naturaleza de la formación acuífera. Modificado de (John Cherry & Tom Aley).

- **Tiempo de tránsito:** el tiempo de tránsito es el tiempo que tarda una partícula de agua, o una sustancia transportada por el agua, en desplazarse desde un punto de entrada (por ejemplo, una zona de recarga o un vertido) hasta un punto de salida, como un manantial o una captación.

El tiempo de tránsito de un contaminante depende de la velocidad del flujo del agua subterránea, que puede variar en varios órdenes de magnitud (figura 2.9), de la longitud del trayecto recorrido, y de la influencia de fenómenos como la dispersión y el retardo, que pueden modificar el tiempo efectivo de llegada de los solutos.

- **Isócrona:** una isócrona es una línea (en 2D) o una superficie (en 3D) que conecta puntos que tienen el mismo tiempo de tránsito hacia (o desde) un punto determinado del acuífero, como una captación (figura 2.10). En modelos de transporte advectivo (es decir, sin dispersión ni difusión), las isócronas pueden obtenerse directamente resolviendo la ecuación del tiempo de tránsito, ya que las trayectorias del flujo están bien definidas y no hay difusión del frente.

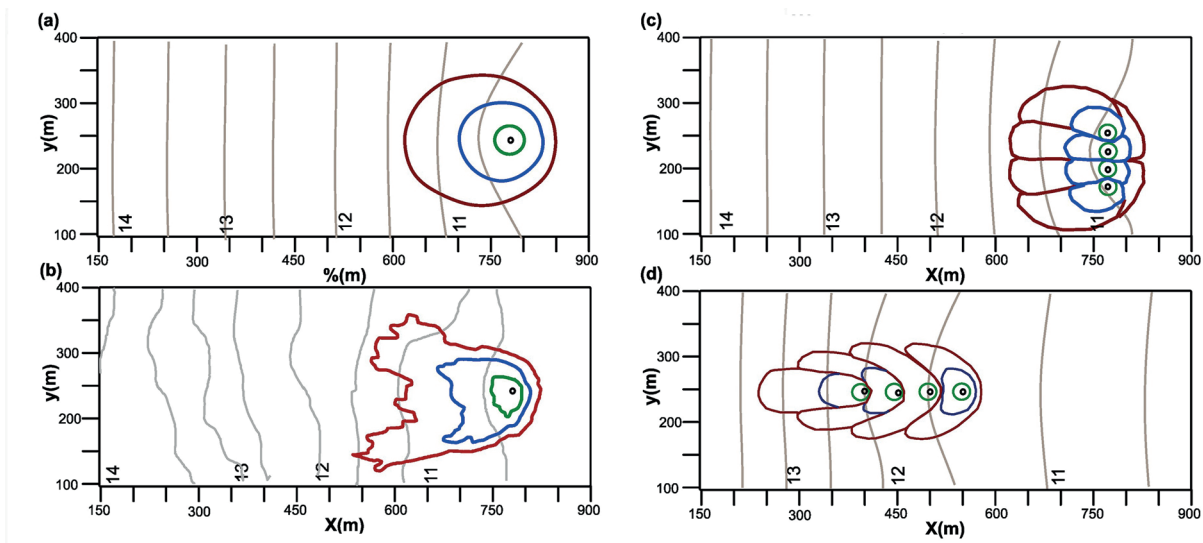


Figura 2.10 Simulación matemática de la forma que pueden tomar las isócronas en un acuífero poroso dependiendo de la estructura del mismo y de la superposición de la influencia de varios sondeos bombeando de forma simultánea. a) Acuífero poroso homogéneo e isótropo. b) Similar al caso a, pero se ha introducido una cierta heterogeneidad y anisotropía. c) Interacción entre cuatro sondeos situados en una línea perpendicular al flujo del agua. d) Interacción entre sondeos situados en una línea paralela al flujo del agua.

Modificado de: <https://ngwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gwat.12588>

2.3. Captaciones de agua subterránea

2.3.1. Captaciones de agua subterránea destinadas al consumo humano

Se denomina **captación de agua subterránea destinada al consumo humano** a una infraestructura (pozo, sondeo, galería, zanja captación de un manantial) destinada a extraer agua de un acuífero para el consumo humano. Este uso principal puede ser compartido con otros usos complementarios, como el riego, actividades industriales u otros fines.

El tipo de captación adecuada para un abastecimiento concreto depende de numerosos factores, como las características geológicas, hidrogeológicas e hidrodinámicas del acuífero, la topografía del terreno, los caudales requeridos, etc. Además, las aguas subterráneas pueden encontrarse a grandes profundidades o emerger de forma natural en superficie a través de manantiales, zonas de rezume, o incluso descargarse directamente en ríos, lagunas o el mar. Cada una de estas situaciones requiere soluciones constructivas específicas, tales como pozos, sondeos o galerías filtrantes, entre otras. Por ello, el estudio hidrogeológico previo permite, además de encontrar la ubicación óptima de la captación, seleccionar el tipo de obra necesario según la formación geológica que se va a explotar.

En este apartado se describen los principales tipos de captaciones desde la perspectiva del diseño de perímetros de protección, agrupándolos en tres categorías: en verticales, horizontales y mixtas.

2.3.2. Captaciones verticales

En este grupo, el más numeroso en la mayor parte de los entornos, se encuentran las perforaciones que se construyen en vertical, desde la superficie, para atravesar la formación acuífera. Se pueden distinguir:

- **Pozos excavados:** se trata de obras generalmente de gran diámetro, superior al metro, y poca profundidad (hasta 20-30 m.), construidos con maquinaria o manualmente. Son las captaciones más adecuadas en acuíferos detríticos superficiales no consolidados (arenas y gravas) donde las aguas subterráneas se caracterizan por estar a la presión atmosférica (aguas freáticas). Las paredes de la excavación se recubren de piedra, mampostería o anillos de hormigón con lumbreras por cuyos huecos entra el agua al interior del pozo, además de por el fondo. Ofrecen como ventaja adicional, en acuíferos menos permeables, que el volumen de agua almacenado en el propio pozo es mayor que en otro tipo de obra y el rendimiento es superior al de un sondeo (figura 2.11).
- **Sondeos o pozos perforados:** son captaciones verticales de pequeño diámetro y gran profundidad, ejecutadas utilizando maquinaria especializada con características que dependen y se adaptan al tipo de formación geológica atravesada (figura 2.12). Los avances en las técnicas de perforación y de bombeo a gran profundidad mediante bombas eléctricas sumergibles han permitido un amplio desarrollo de este tipo de captación en cualquier tipo de acuífero.

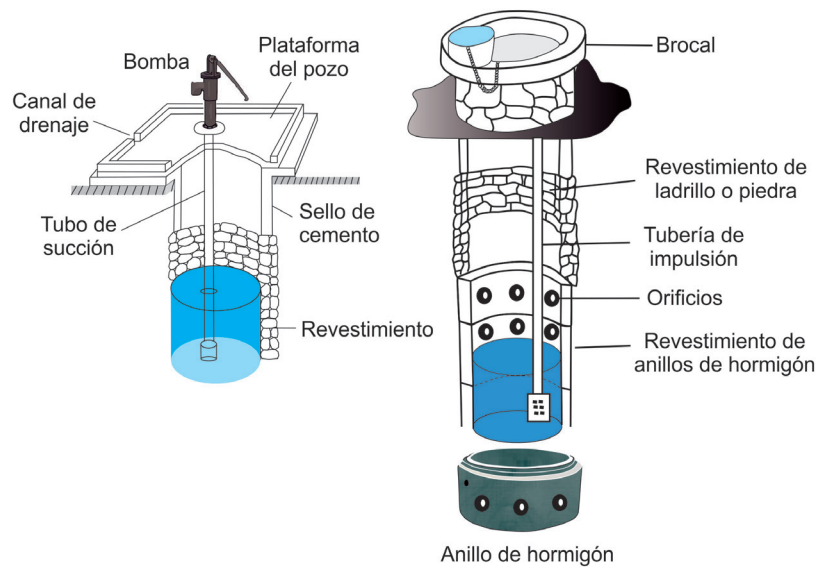


Figura 2.11 Ejemplos constructivos de captaciones de aguas subterráneas mediante pozos de gran diámetro.

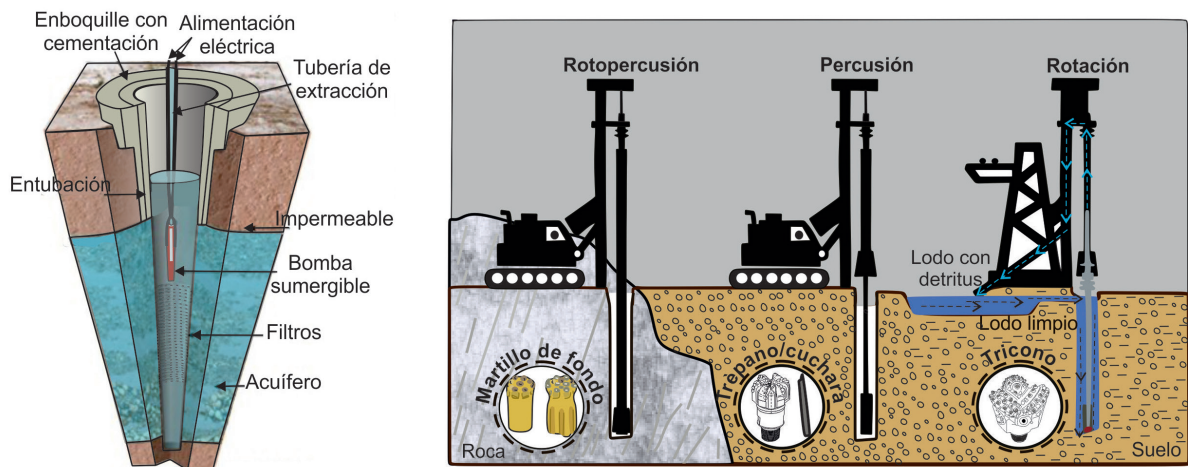


Figura 2.12 Ejemplos de técnicas de perforación de sondeos para la captación de aguas subterráneas.

Con objeto de proteger las aguas subterráneas frente a posibles contaminantes, el **RDPH**²⁰²³ que modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico de 1986 incluye en el texto normativo el establecimiento de criterios para la construcción de captaciones de agua (artículo 170 bis) y el sellado de pozos (artículo 188 bis). En el anexo III, parte A y B, se recogen los requisitos técnicos básicos de estas actuaciones. La modificación del texto legal se basa en una iniciativa de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH) que publicó en 2022 una “Guía de buenas prácticas para el diseño, construcción sellado y clausura de pozos de captación de agua subterránea” en la que se detallan los pasos necesarios para la ejecución y abandono correcto de sondeos (figura 2.13).

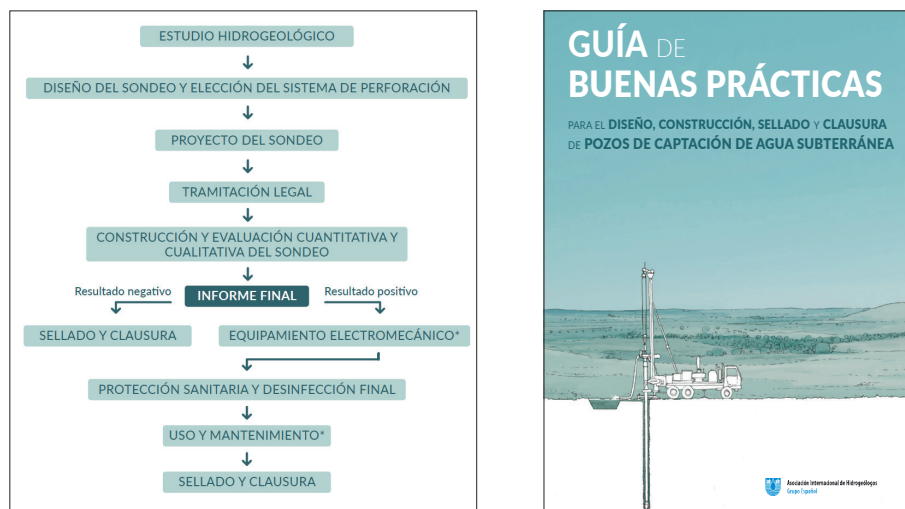


Figura 2.13 Etapas a realizar para la ejecución, puesta en marcha y abandono de un sondeo. Fuente: AIH-GE (2022). Portada de la publicación “Guía de buenas prácticas para el diseño, construcción, sellado y clausura de pozos de captación de agua subterránea”.

La “Guía de buenas prácticas para el diseño, construcción sellado y clausura de pozos de captación de aguas subterráneas”, puede obtenerse gratuitamente en la página del Grupo español de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos:

<https://www.aih-ge.org/guia-de-buenas-practicas-para-el-diseno-construccion-sellado-y-clausura-de-pozos-de-captacion-de-agua-subterranea/>

El correcto sellado de captaciones de agua es fundamental para evitar, tanto la entrada de contaminantes desde la superficie, como la conexión entre formaciones acuíferas con diferente calidad. Es frecuente, en captaciones antiguas, que el sellado de los niveles no productivos o de mala calidad sea insuficiente y permitan la comunicación entre ellos.

2.3.3. Captaciones horizontales

- **Galerías drenantes o de captación:** son estructuras subterráneas permeables, revestidas o no, que penetran en la zona saturada de un acuífero y están diseñadas para interceptar el flujo natural del agua subsuperficial. En las galerías excavadas, el agua es recogida, concentrada y conducida hacia el exterior por efecto de la gravedad debido a la ligera inclinación de la obra, durante un trayecto que puede alcanzar varios kilómetros (figuras 2.14 y 2.15).

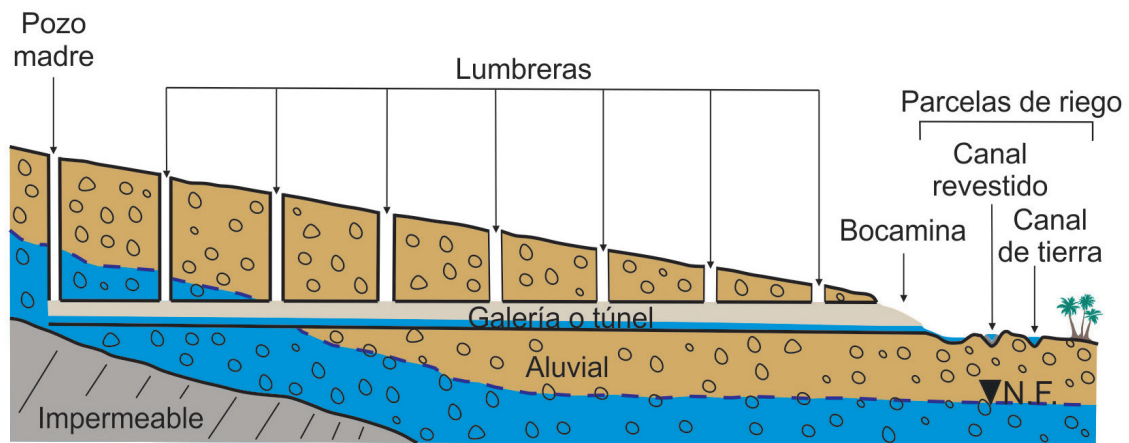


Figura 2.14 Esquema de un qanat. Modificado de: MIMAM (2008).

Son, probablemente, el tipo de captación más antiguo, propio de zonas donde el abastecimiento no estaba garantizado con aguas superficiales. Tienen su origen en los qanats que se construían desde hace más de 3.000 años en la antigua Persia. En España, estas obras se han denominado de numerosas maneras, dependiendo de la zona geográfica en que se ubicaban, así, cuando captaban aguas subterráneas recibían nombres como qanats, galerías, caños, minas y viajes de agua; cuando captaban aguas subálveas: zanjás, cimbras o alcavones.

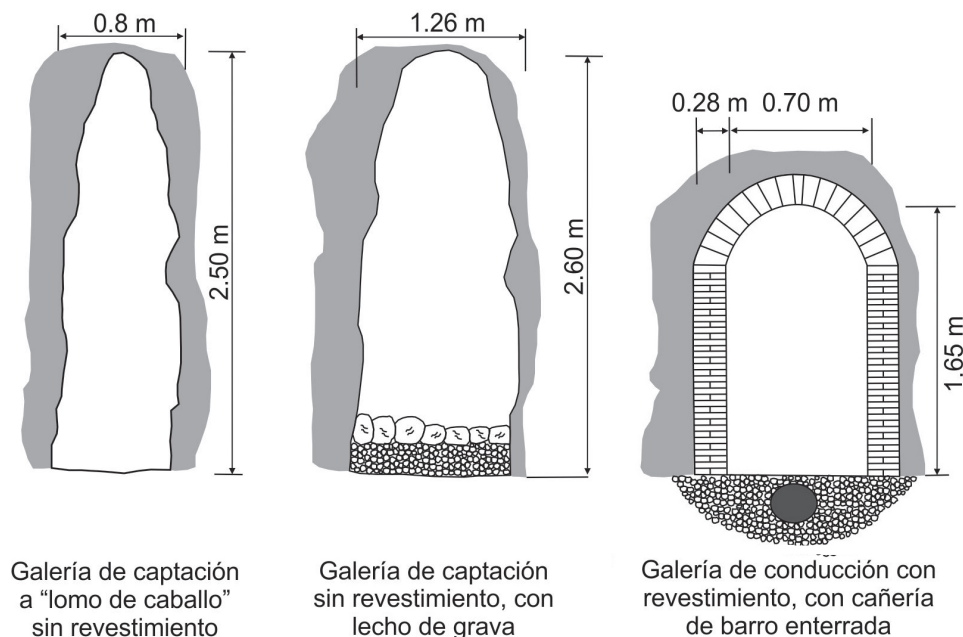


Figura 2.15 Esquema de galerías de captación, mayras o qanats, de diferente grado de complejidad: desde estructuras excavadas directamente en el material poroso a construcciones mucho más sofisticadas revestidas de ladrillo y dotadas de cañerías de conducción. Modificado de Guerra (2006).

Este tipo de captación es muy común en Canarias, donde algunas galerías llegan a alcanzar varios kilómetros de longitud. Allí se distingue entre las llamadas "minas de agua", construidas de forma longitudinal o transversal al cauce de un barranco para captar las aguas subálveas; y las "galerías", excavadas en la roca con el objetivo de aprovechar los acuíferos colgados (figura 2.16).

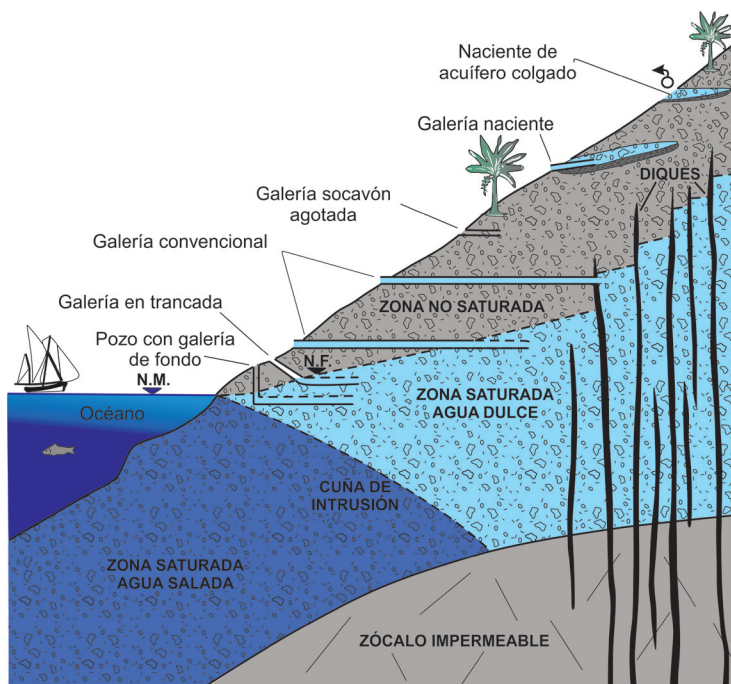


Figura 2.16 Esquema que muestra como diferentes tipos de galerías interceptan y captan el agua de los acuíferos en su zona saturada, o del agua en tránsito en la zona no saturada.

Modificado de <https://www.iehcan.com/wp-content/uploads/2019/11/2-Garcia-Alonso-2019.pdf>

- **Zanjas de drenaje:** son excavaciones a cielo abierto, utilizadas fundamentalmente cuando el agua subterránea está próxima a la superficie. Suelen tener una profundidad de 2 a 4 metros y longitudes de unas decenas a varios centenares de metros. La técnica consiste en excavar una o varias zanjas siguiendo la pendiente topográfica las cuales vierten el agua hacia un punto común para su posterior distribución. En su fondo se instalan tuberías de infiltración o de avenamiento, perforadas o ranuradas. Normalmente se excavan para aumentar la zona de captación y favorecer el aprovechamiento de fuentes y manantiales.
- **Manantial concentrado:** cuando el afloramiento de agua se produce en un solo punto y sobre un área pequeña. Para su captación, se construye una arqueta o cámara que permite su recolección y posterior conducción. Las dimensiones de esta estructura dependerán de los caudales máximos previstos (figura 2.17).

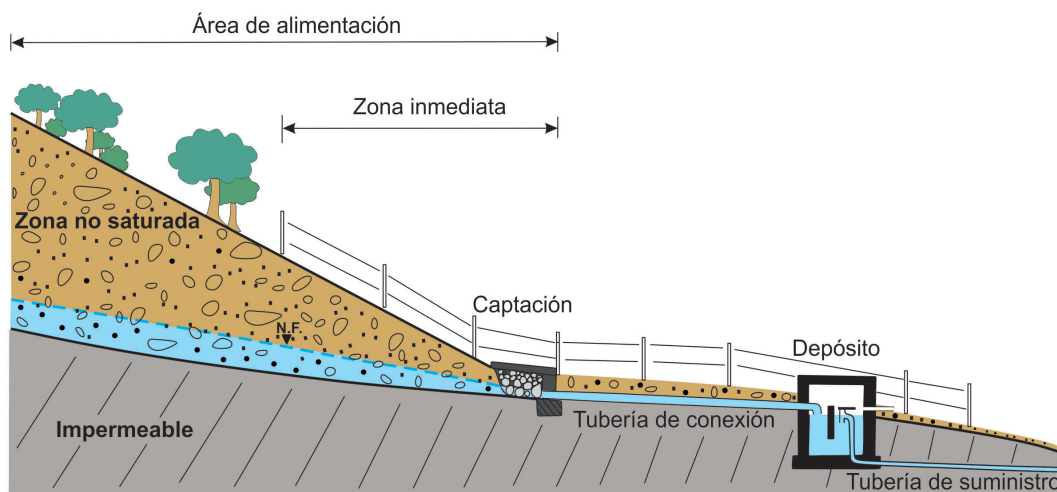


Figura 2.17 Esquema constructivo de una captación tipo manantial concentrado. Modificado de Meuli and Wehrle (2001)

- **Manantial difuso:** cuando el agua surge por varios puntos afectando a un área de mayor tamaño. Para su captación, se suelen construir muros para retener el agua y zanjas o drenes que la concentran en una dirección. Los drenes, similares a las galerías, suelen tener una longitud de varias decenas de metros. Normalmente están entubados con tubería de pequeño diámetro y son perforados con maquinaria.

2.3.4. Captaciones mixtas

Pozos radiales: conocidos como pozos Ranney y pozos Fehlmann, consisten en pozos verticales de gran diámetro con drenes horizontales dispuestos radialmente. Se utilizan en los mismos casos que los pozos excavados en acuíferos superficiales muy permeables, generalmente en aluviales próximos a cursos de agua cuando se requieren grandes caudales. En las islas Canarias son frecuentes este tipo de captaciones (pozos verticales con galerías horizontales) pues la necesidad de agua obligó a profundizar los pozos y a perforar en los drenes horizontales y galerías interiores. Por lo general son perforaciones de planta circular con diámetros de 1,5 a 3 m y profundidades comprendidas entre los 15 y 400 m (figuras 2.18 y 2.19).

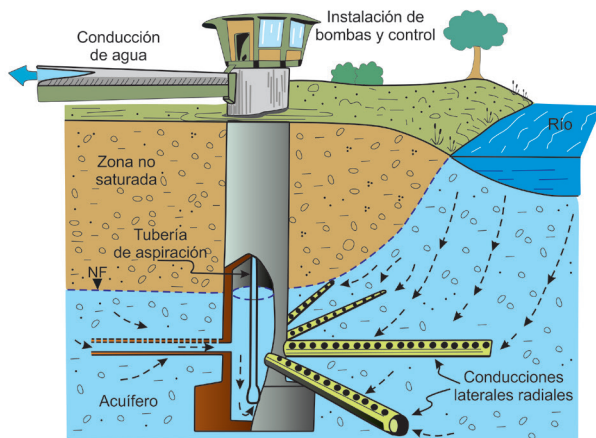


Figura 2.18 Ejemplo de captación mixta, mediante pozos tipo Ranney. Tomado de: <https://infogram.com/obras-de-toma-1g0n2owd8340p4y>

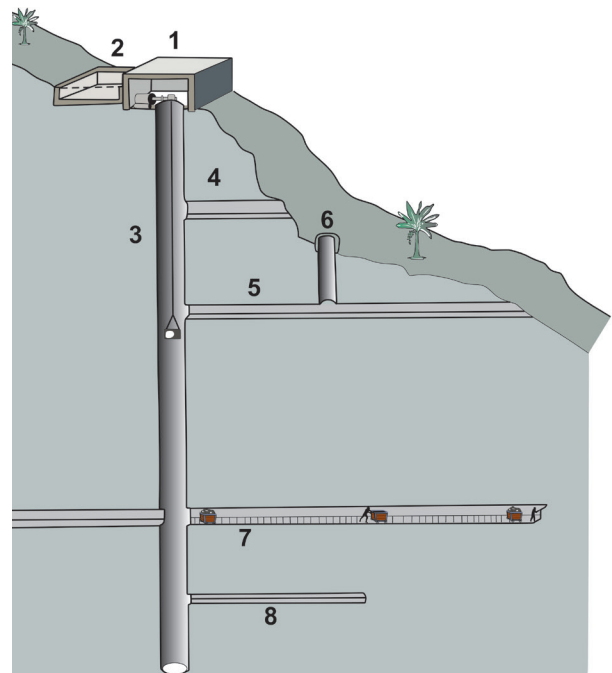


Figura 2.19 Sección esquemática de un pozo de Gran Canaria, con diversas galerías, campana y sala de máquinas. Modificado de: Suarez Moreno, F. (2009). 1. Sala de máquinas, 2. Estanque regulador, 3. Pozo de 2 a 3 metros de diámetro y 50 a 300 metros de profundidad, 4. Galería con salida al exterior, 5. Galería con campana de ventilación (6), 7. Galerías normales con o sin bifurcaciones, 8. Catas o sondeos horizontales.

2.3.5. Sistemas de Captaciones de Agua Subterránea (SCAS) destinadas al consumo humano

En el contexto del diseño de perímetros de protección, un **sistema de captaciones de agua subterránea (SCAS) destinadas al consumo humano** es el conjunto de captaciones que abastecen de forma exclusiva o combinada con otros aprovechamientos a una o varias poblaciones (apartado 1.1). Los sistemas de captaciones de aguas subterráneas deberían ser gestionados de manera integrada y

coordinada, optimizando el uso de los recursos hídricos disponibles, asegurando la calidad del agua, y garantizando un suministro continuo y sostenible para satisfacer las necesidades de la comunidad.

El término SCAS no debe confundirse con los “**sistemas de abastecimiento de agua**”, que son el conjunto de infraestructuras y procesos diseñados para asegurar el suministro de agua a una población. Estos sistemas están concebidos como sistemas de gestión integral del ciclo del agua de consumo, desde que el recurso hídrico se capta hasta que, una vez usado, se devuelve a la naturaleza. Las fases o componentes de un sistema de abastecimiento de agua incluyen la captación o sistema de captaciones, el almacenamiento, el tratamiento y potabilización, la distribución eficiente y gestión de la demanda, así como el saneamiento y reutilización.

En España es común que haya una diversidad de fuentes de suministro de agua que permiten a los municipios disponer de aguas de distintos orígenes para abastecerse de forma combinada: aguas subterráneas, aguas superficiales, aguas de desalación, etc. Desde el punto de vista organizativo, el abastecimiento hídrico a una población se realiza a través de la gestión municipal, en la que los servicios de abastecimiento son responsabilidad de los ayuntamientos, que gestionan directamente el suministro o bien lo encargan a empresas públicas o concesionarias; y los consorcios o mancomunidades intermunicipales en los que varios municipios se agrupan para gestionar conjuntamente infraestructuras y servicios, lo que permite optimizar recursos y coordinación.

2.4. Vulnerabilidad a la contaminación, relación con los perímetros de protección

Los términos vulnerabilidad, presión, peligrosidad y riesgo son ampliamente utilizados en estudios ambientales, en el análisis de la contaminación y en la legislación. Sin embargo, a pesar de su uso frecuente en la normativa de protección del agua, esta no proporciona una definición precisa de ninguno de ellos. En este apartado se analizará el significado del término vulnerabilidad, pues el diseño de perímetros en medios kársticos y fisurados se basa principalmente en un análisis de la vulnerabilidad del acuífero frente a la contaminación, y algunos métodos empleados en casos especiales sobre acuíferos detríticos, manantiales y acuíferos confinados, también pueden recurrir a este tipo de análisis.

2.4.1. Origen y evolución del concepto de vulnerabilidad de los acuíferos

El término “vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas” fue introducido por primera vez en la literatura científica en la década de 1960. Uno de los pioneros en su uso fue Margat (1968), quien estableció que la vulnerabilidad de un acuífero depende de las características naturales del terreno y su capacidad para proteger las aguas subterráneas de los contaminantes.

Posteriormente, el concepto fue ampliado por diversos autores: Foster (1987) propuso una distinción clave entre la **Vulnerabilidad Intrínseca**, basada en factores naturales como el tipo de suelo y la permeabilidad del acuífero y la **Vulnerabilidad Específica**, relativa a cada contaminante particular y sus características de persistencia y transporte. En 1995, Custodio propuso que la vulnerabilidad a la contaminación expresa la incapacidad del sistema para absorber alteraciones, tanto naturales como artificiales. A lo largo de los años 1980 y 2000, el concepto se consolidó con enfoques metodológicos, sobre todo a partir del método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987), un sistema paramétrico ampliamente utilizado en estudios hidrogeológicos para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación de forma general. Foster e Hirata (1991) definieron la vulnerabilidad de un acuífero como su sensibilidad a ser afectado por una carga contaminante impuesta y ese mismo año la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU (EPA) definió la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación, en el contexto de la contaminación por plaguicidas, como la facilidad con la que un contaminante aplicado en la superficie puede alcanzar el acuífero en función de las prácticas

agrícolas empleadas. En 1993 Carbonell definió el término como la tendencia de los contaminantes a localizarse en el sistema de agua subterránea tras ser introducidos sobre el acuífero más superficial. Vrba y Zaporozec (1994) señalaron que la vulnerabilidad es una propiedad intrínseca del sistema, dependiente de su sensibilidad a impactos humanos o naturales y muestran que la vulnerabilidad es una propiedad relativa, no mensurable y adimensional e inciden en la importancia de diferenciar entre la vulnerabilidad intrínseca determinada por el medio y la vulnerabilidad específica, relacionada con el contaminante específico.

La vulnerabilidad a la contaminación suele considerarse una idea opuesta a la de protección natural frente a la contaminación, empleando a menudo ambos conceptos de manera intercambiable, lo que añade más confusión pues esta relación no es estricta. En cualquier caso, la mayor parte de los autores coinciden en que la vulnerabilidad es una propiedad cualitativa, que indica el grado de protección natural de un acuífero respecto a la contaminación. Al ser un concepto cualitativo, la vulnerabilidad se suele clasificar en rangos: baja, media, o alta, aunque a veces se extiende con el agregado de dos clases más, siendo estas la vulnerabilidad muy alta y muy baja.

En la legislación el concepto de vulnerabilidad, aunque no se define, se incluye en numerosas normas relacionadas con la protección del medio ambiente, el suelo, la atmósfera y el agua. Como referencia respecto a la contaminación del agua se puede citar la Directiva Marco del Agua (DMA) 2000/60/CE donde la evaluación de la vulnerabilidad se entiende desde una visión preventiva, para proteger zonas sensibles a la contaminación, expresando la necesidad de caracterizar los cuerpos de agua subterránea en riesgo, para poder evaluarlos con mayor precisión. La Ley de Aguas (TRLA) y su desarrollo en el RDPH establecen medidas para proteger las masas de agua vulnerables a la contaminación.

2.4.2. El concepto de vulnerabilidad y los perímetros de protección

En el contexto de los perímetros de protección, cuando se trate de vulnerabilidad, se estará haciendo referencia siempre a la **vulnerabilidad intrínseca**, entendiendo como tal:

- La **vulnerabilidad intrínseca** a la contaminación es una medida del grado de susceptibilidad (sensibilidad) de un acuífero a ser afectado adversamente por contaminantes de cualquier origen. Tiene en cuenta las características edáficas, geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas de la zona y es independiente de la naturaleza de los contaminantes y el escenario de contaminación.
- La **vulnerabilidad específica**, por el contrario, se refiere a la susceptibilidad del sistema a un contaminante determinado, y depende en gran medida de la forma en la que el contaminante y el medio receptor interaccionan entre sí.

Aunque la vulnerabilidad intrínseca parece ser el concepto más simple y general, su definición científica es más difícil: ¿cómo es posible determinar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación sin considerar las propiedades específicas de los contaminantes?, la solución consiste en asumir un contaminante general que se comporta de forma completamente conservativa, es decir, que no muestra reacciones o interacciones específicas con el material del acuífero, como el retardo o la biodegradación.

A efectos de la zonificación de protección, los mapas de vulnerabilidad intrínseca suelen ser más útiles y aplicables que los mapas de vulnerabilidad específica, ya que las zonas de protección buscan prevenir cualquier tipo de contaminación. Este enfoque conservador, aunque útil, no contempla ciertos factores que pueden influir en el comportamiento de los contaminantes, como la difusividad hidrodinámica. Este fenómeno puede ralentizar el avance de los contaminantes o favorecer su dilución, pero su cuantificación precisa suele ser difícil de obtener y, por lo general, solo está disponible en estudios altamente especializados.

La **difusividad hidrodinámica** de un contaminante, en un medio acuífero, es un parámetro que describe la combinación de dos procesos clave en el transporte de solutos en el agua subterránea: la **difusión molecular**, que es el movimiento aleatorio de las moléculas del contaminante debido a diferencias de concentración, existe incluso en ausencia de flujo de agua y la **dispersión mecánica**, es decir, la mezcla del contaminante provocada por la heterogeneidad del flujo del agua

en el acuífero, que genera diferencias en velocidad y dirección a escala microscópica. La difusividad hidrodinámica es especialmente relevante en medios de baja permeabilidad o cuando el flujo de agua es lento, como en el caso de acuíferos semiconfinados, ya que afecta a la velocidad de propagación del contaminante y su grado de dilución en el acuífero.

La evaluación de la vulnerabilidad puede abordarse desde la perspectiva de la protección del recurso o de la captación. Así, mientras un mapa de vulnerabilidad de recursos hídricos muestra la vulnerabilidad de todo un acuífero a la contaminación, considerando el nivel freático como objetivo, un mapa de vulnerabilidad de la captación muestra la vulnerabilidad de una obra específica, como un pozo de bombeo o un manantial, que constituye en este caso el objetivo. Por lo tanto, el análisis de vulnerabilidad de recursos considera únicamente la percolación, mayoritariamente vertical, del agua y los contaminantes desde la superficie terrestre a través de la zona no saturada hacia el nivel freático. En cambio, el mapeo de vulnerabilidad de captaciones considera además la migración de contaminantes en la zona saturada del acuífero hacia el manantial o pozo.

La cartografía de vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación consiste en la elaboración de mapas que distinguen áreas según el grado de protección natural del agua subterránea. Estos mapas constituyen una herramienta práctica para la planificación del uso del suelo, la evaluación de riesgos y la programación de actividades con potencial contaminante. En el caso de los perímetros de protección, sirven como base para su diseño y como guía para establecer las restricciones sobre las actividades que pueden o no desarrollarse dentro de dichos perímetros.

El IGME publicó, hace varias décadas, un mapa escala 1:1000.000 titulado: *Mapa de vulnerabilidad a la contaminación de los mantos acuíferos*. “España peninsular, Baleares y Canarias”, que puede servir como punto de partida en estudios más detallados de vulnerabilidad intrínseca de acuíferos.
<https://web.igme.es/publicaciones/Consulta/Libro/2707>

También están disponibles muchos otros estudios específicos como por ejemplo el *Mapa de vulnerabilidad a la contaminación escala 1:500.000* [*Atlas Geocientífico del Medio Natural de la Comunidad de Madrid*](#)

En la literatura especializada existen numerosas propuestas metodológicas, basadas en parámetros tabulados, que permiten valorar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos, pero no existe ninguna armonización ni consenso en su aplicación, tampoco se pueden comparar los resultados de unas y otras debido a los distintos factores que son considerados en cada metodología y por el grado de subjetividad en la valoración de estos. El objetivo común de todas estas metodologías es obtener mapas de vulnerabilidad de la zona en estudio, ya que son una herramienta muy útil para la planificación de los recursos hídricos y del uso del suelo. Sin embargo, nunca deben perderse de vista dos realidades:

- La incertidumbre en las valoraciones de la vulnerabilidad, en función de la información disponible de la zona. En este caso el uso de técnicas complementarias como los trazadores puede ofrecer cierto potencial de validación.

- En acuíferos kársticos y fisurados es la herramienta más adecuada para analizar la protección del medio frente a la contaminación, pues tiene en consideración las características singulares de estos sistemas que impiden aplicar los métodos que utilizan como criterio para delimitar las zonas de protección el tiempo de tránsito de los contaminantes.

Con el fin de alcanzar un acuerdo entre los países de la Unión Europea, la Dirección General de Ciencia, Investigación y Desarrollo de la Comisión Europea, puso en marcha la Acción COST 620. El objetivo de esta acción fue desarrollar un enfoque de “cartografía de vulnerabilidad y riesgo” para la protección de los acuíferos carbonatados (kársticos), pues, a menudo, incluyen zonas con una vulnerabilidad extremadamente alta a la contaminación y constituyen un elevado porcentaje de los acuíferos existentes. Este enfoque se desarrolló principalmente para su aplicación en zonas kársticas, aunque también puede utilizarse en otros entornos hidrogeológicos, lo que requiere algunas adaptaciones sencillas.

La Acción Europea COST 620 sobre “*Cartografía de vulnerabilidad y riesgo para la protección de acuíferos carbonatados (kársticos)*” reunió a unos 50 científicos, profesionales y responsables de la toma de decisiones de 15 países europeos para proponer un marco conceptual común para la cartografía de vulnerabilidad, peligros y riesgos. La necesidad de esta acción surgió al constatar que existe una gran

cantidad de métodos para la elaboración de cartografía de vulnerabilidad que a menudo se basan en diferentes definiciones, terminología y supuestos, pero la experiencia ha demostrado que la aplicación de diferentes métodos al mismo sitio de prueba, utilizando la misma base de datos, a menudo conduce a resultados diferentes y, en ocasiones, contradictorios (Gogu *et al.*, 2003).

El enfoque europeo se fundamenta en el modelo origen-trayectoria-objetivo. Para la cartografía de la vulnerabilidad se consideran hasta cuatro factores: capas de protección suprayacentes (O), concentración del flujo (C), régimen de precipitación (P) y desarrollo de la red kárstica (K). Los factores O, C y K representan las características hidrogeológicas del sistema, mientras que P corresponde a un factor externo. En la cartografía de la vulnerabilidad de los recursos (objetivo = nivel freático en el acuífero), deben considerarse los factores O, C y P, mientras que el factor K debe incluirse para la cartografía de la vulnerabilidad de la fuente (objetivo = captación).

Entre los métodos considerados compatibles con el marco conceptual del enfoque europeo (Daly *et al.*, 2002; Zwahlen, 2004), y recomendados para realizar la cartografía de vulnerabilidad de las aguas subterráneas, especialmente en zonas kársticas, se encuentran los métodos EPIK y COP.

El método EPIK (Doerfliger *et al.*, 1999) fue el primer método desarrollado específicamente para elaborar la cartografía de vulnerabilidad de captaciones en zonas kársticas. Este método considera cuatro factores: desarrollo epikárstico (E), cobertura protectora (P), condiciones de infiltración (I) y desarrollo de la red kárstica (K). En Suiza, EPIK es el método oficial utilizado para la delimitación de zonas de protección de fuentes en zonas kársticas. Los diferentes grados de vulnerabilidad se traducen directamente en zonas de protección.

El método COP (Vias *et al.*, 2006) derivó directamente del enfoque europeo e incluye tres de los cuatro factores: concentración del flujo, capas de protección suprayacentes y régimen de precipitaciones. El método se ha aplicado en sistemas acuíferos kársticos españoles (Andreo *et al.*, 2006) y en otros lugares.



3. Directrices para el dimensionamiento de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas destinadas al consumo humano

Se presenta en este apartado el procedimiento a seguir en el diseño de los perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas destinadas al consumo humano (PPCSb), desde la clasificación de las captaciones hasta la propuesta de perímetro. En la figura 3.1 se muestra un esquema de síntesis en el que se detallan cada una de las cinco etapas que es necesario completar.

Hay que tener presente que el perímetro de protección debe ser único y proteger todas las obras de captación que abastecen a la población. No puede ser establecido de forma parcial.

Antes de comenzar el procedimiento de diseño es necesario disponer de una información general suficiente acerca del acuífero, de las captaciones y de la población abastecida. Posteriormente se irá completando con mayor detalle según sea necesario:

Descripción del sistema de captaciones de agua subterránea (SCAS) destinadas al consumo humano: se incluirá toda la información disponible acerca de las captaciones de agua subterránea que abastecen a la población, ya sean de uso habitual o de emergencia. Esta información incluirá como mínimo:

- situación geográfica exacta de todos los elementos del sistema (captación, transporte y almacenamiento).
- descripción geológica/hidrogeológica de las formaciones atravesadas,
- técnica constructiva de las captaciones, tipo de entubado, profundidad de la perforación,
- situación de los tramos filtrantes y rejillas, situación de los tramos aislados,
- equipamiento, profundidad de instalación y tipo de bomba,
- caudales extraídos y distribución temporal de los mismos.

Características de la población: incluye el número total de habitantes empadronados, así como información detallada acerca de la distribución de la población flotante. También se debe considerar la evolución de la población en los últimos 20 años y una proyección de la evolución previsible a futuro.

Se deberá recopilar aquellos informes geológicos, hidrogeológicos o de cualquier otra naturaleza que puedan ser útiles a la hora de caracterizar la captación o el acuífero.

Una vez analizada y comprobada toda la información descrita, se procederá con la primera etapa del diseño del perímetro de protección.

Cada una de las etapas que se describen en los siguientes apartados debe tener identidad propia en el informe final técnico (etapa V) y contar con un

apartado de conclusiones parciales en el que se justifique cada una de las decisiones tomadas, así como el origen de cualquier dato empleado en los cálculos.

ESQUEMA GENERAL DEL PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE PERIMETROS DE PROTECCIÓN DE CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DESTINADAS AL CONSUMO HUMANO (PPCSb)

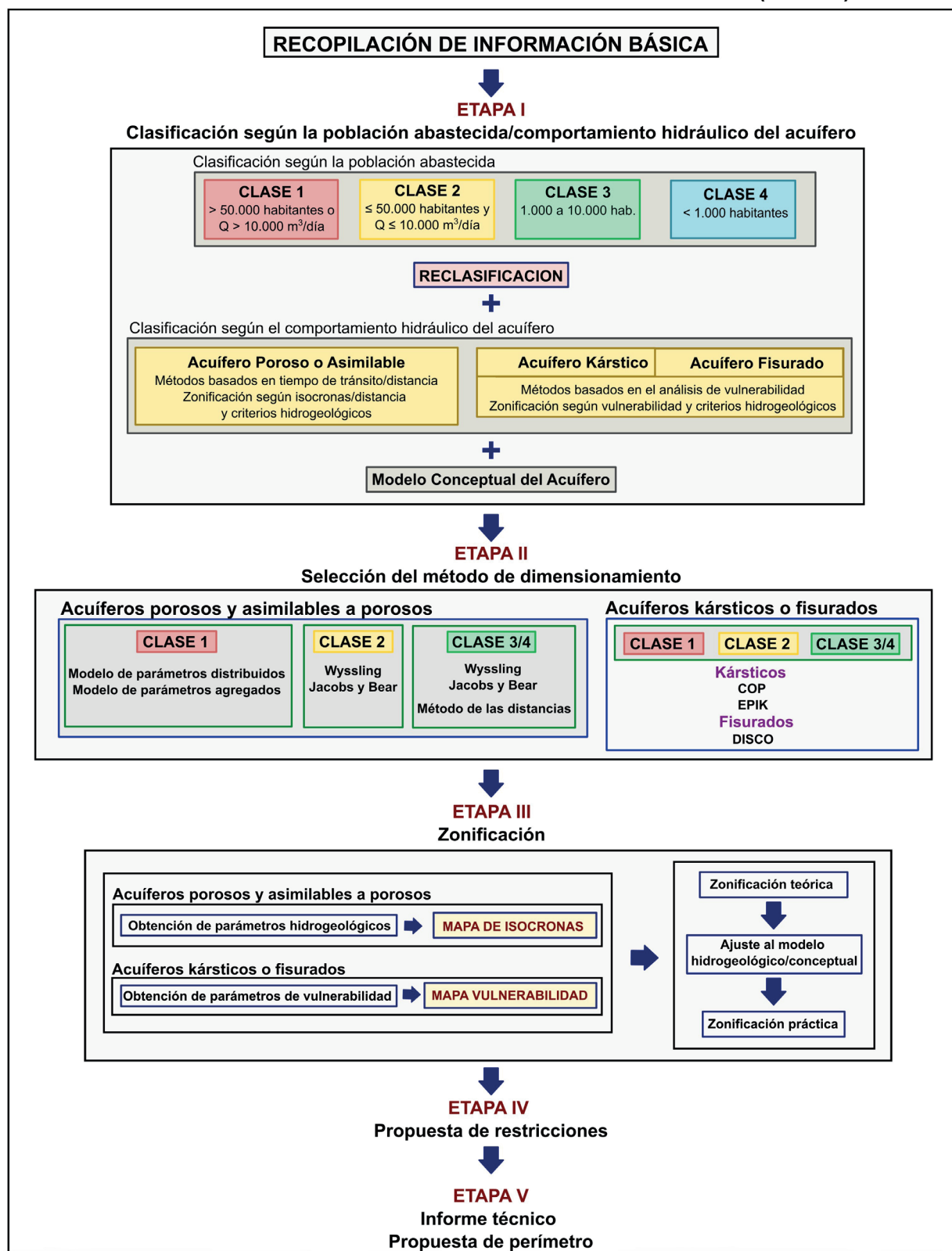


Figura 3.1 Etapas en el diseño de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas destinadas al consumo humano.

3.1. Etapa I: Clasificación de la captación y del tipo de acuífero. Establecimiento del modelo conceptual

3.1.1. Clasificación de la captación y del tipo de acuífero

Como se ha explicado en apartados anteriores la metodología de diseño de los perímetros depende de tres factores principales: la población abastecida, el caudal de bombeo y el tipo de acuífero, en esta etapa se clasifica la captación en función de esos parámetros (figura 3.2):

1. Clasificar la captación en base a la población abastecida y al caudal concesional (salvo que la explotación sea mayor). La zonificación de los perímetros depende directamente de estos dos factores (RDPH). Además, la clase de captación determinará la fuente recomendada para obtener los parámetros utilizados en los métodos de dimensionamiento del perímetro.
2. Clasificar el acuífero explotado. Tanto los métodos de dimensionamiento de los perímetros como su zonación práctica dependen de la forma en que el agua se desplaza a través del acuífero, ya sea a través de una matriz porosa o a través de un sistema de grietas o fisuras.

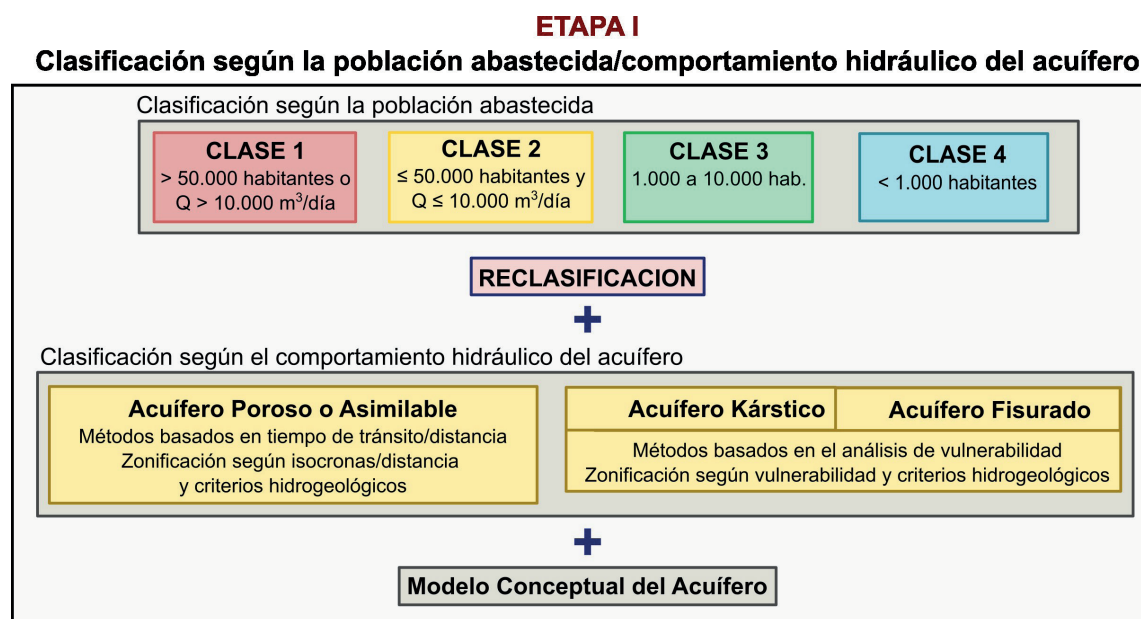


Figura 3.2 Etapa I. Clasificación de la captación en función de la población abastecida, el caudal extraído y la naturaleza del acuífero. Elaboración del modelo conceptual.

Además, se prevé la posibilidad de **reclasificar** la captación si la evolución de la población abastecida indica que en un plazo de tiempo inferior a 6 años esta puede aumentar de forma que supere el límite superior de su clase, en la figura 3.3 se muestra un ejemplo. En estos casos el perímetro se diseñará con los condicionantes de esta nueva clase.

A la hora de valorar el caudal de explotación para clasificar una captación, se tendrá en cuenta la cifra que figura en la concesión de explotación, salvo que la explotación real sea mayor, en cuyo caso será esta

la cifra a considerar. El caudal de explotación real puede ser mayor del concesional en caso de que se esté tramitando una revisión con aumento de caudal extraído y el perímetro se diseñe de forma paralela.

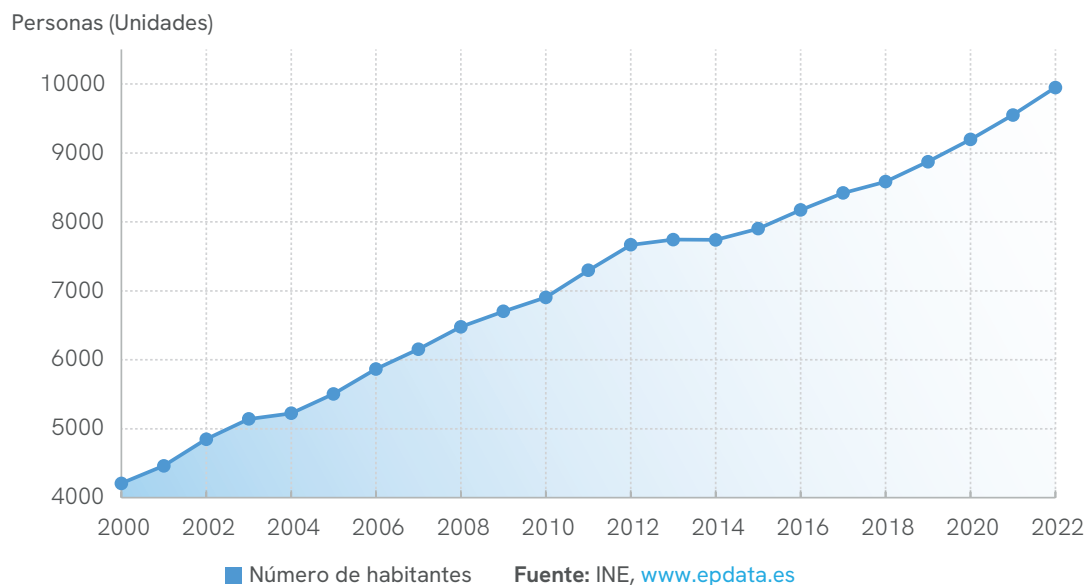


Figura 3.3 Evolución del número de habitantes en la localidad de Torrejón de la Calzada (Madrid). Con una población censada de 9.947 habitantes en el año 2022, debería clasificarse, en función del criterio poblacional, dentro de la clase 3 (< 10.000 habitantes). Sin embargo, considerando la tendencia de crecimiento demográfico y la proximidad al umbral de los 10.000 habitantes, parece razonable reclasificar esta población en la clase 2 (≤ 50.000 habitantes), dado que es probable que en menos de un año supere los 10.000 habitantes.

<https://www.epdata.es/datos/datos-graficos-estadisticas-municipio/52/torreon-calzada/7254>

Por otra parte, la clasificación del acuífero en base a su funcionamiento hidrogeológico permitirá asignarlo a alguna de las siguientes clases:

- **Porosos:** acuíferos que almacenan y transmiten el agua a través de los huecos interconectados que dejan los granos de sedimento entre sí.
- **Kársticos/Fisurados:** acuíferos que almacenan y transportan el agua a través de grietas, cavidades de disolución (kársticos) o fracturas mecánicas (fisurados).
- **Asimilables a porosos:** acuíferos que sin ser porosos se comportan hidráulicamente como tales a la escala de trabajo respondiendo a la ley de Darcy.

3.1.2. Establecimiento del modelo conceptual

El **modelo conceptual de un acuífero** (figura 3.4) es una representación simplificada del sistema hidrogeológico subterráneo. Describe cómo fluye el agua a través del acuífero, identifica las áreas y fuentes de recarga y descarga, así como las posibles conexiones con otros acuíferos o masas de agua. Además, incorpora aspectos geológicos, hidrológicos, climáticos y antrópicos relevantes. Suele incluir un balance hídrico cualitativo e incluso semicuantitativo. Su objetivo principal es comprender el funcionamiento integral del acuífero para facilitar una gestión sostenible del recurso hídrico. Un modelo conceptual integra y relaciona, al menos, los siguientes componentes:

- **Geológicos:** tipo de rocas o sedimentos que conforman el acuífero, estructuras geológicas como fallas o pliegues, y la continuidad lateral y vertical del acuífero.
- **Geomorfológicos:** especialmente en el caso de las formaciones kársticas, en las que aspectos geomorfológicos como la presencia de dolinas, lapiazes, etc., determinan la forma en la que se produce la recarga del acuífero y condicionan su vulnerabilidad a la contaminación.

- **Hidrogeológicos:** tipo de acuífero (libre, confinado o semiconfinado), la dirección y velocidad del flujo subterráneo, el gradiente hidráulico, y propiedades como la permeabilidad, la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento. Además, es necesario identificar zonas de surgencia natural a través de manantiales, conexión río-acuífero etc.
- **Hidrológicos:** fuentes de recarga (precipitación directa, infiltración desde ríos u otros cuerpos de agua), mecanismos de descarga (surgencia de manantiales, extracción por bombeo), e interacciones con cuerpos de agua superficiales como ríos, lagos, humedales o incluso el mar.
- **Usos del agua:** localización y características de las captaciones, volúmenes explotados, y demandas de uso agrícola, urbano, industrial o recreativo.
- **Condiciones de contorno:** límites físicos y funcionales del sistema, incluyendo zonas impermeables, contactos geológicos, límites de recarga lateral o profunda, y líneas de flujo predominante.

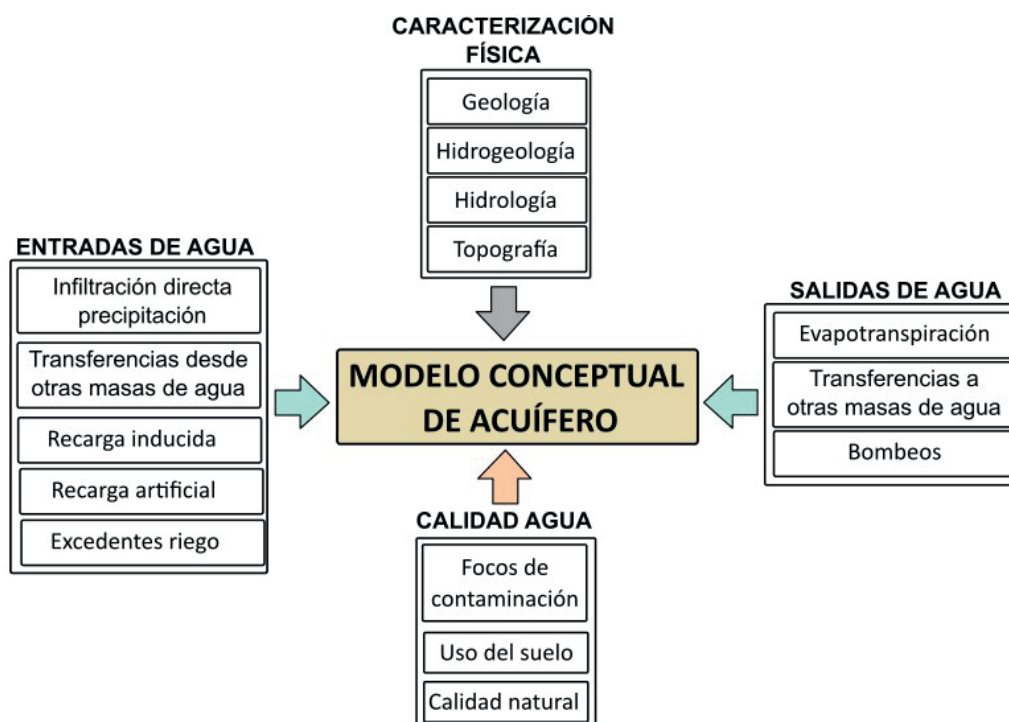


Figura 3.4 Representación de los parámetros que debe incluir el modelo conceptual de un acuífero, integrados, consiguen explicar el funcionamiento del acuífero y su interacción con el entorno geológico, hidrogeológico, ambiental, humano, etc.

Un modelo conceptual bien estructurado no solo permite comprender el comportamiento hidrogeológico del acuífero que alimenta una captación, facilita además la evaluación del impacto de la actividad humana sobre la calidad y cantidad del recurso, y sirve como base para la construcción de modelos numéricos que simulan el flujo subterráneo y la evolución del sistema bajo distintos escenarios climáticos o de gestión.

Además, para elaborar correctamente un perímetro de protección es imprescindible disponer de un buen modelo conceptual de funcionamiento del acuífero que permita adaptar los resultados teóricos de zonificación a la realidad física del acuífero y a su interacción con el resto del sistema hídrico. La zonificación del perímetro de protección debe ser coherente con el modelo conceptual del acuífero.

La complejidad y detalle del modelo conceptual del acuífero dependerá de la clasificación de la captación obtenida en la primera fase del proceso de diseño.

El modelo conceptual en el caso de captaciones clase 1 deberá contemplar, al menos, las siguientes cuestiones fundamentales:

3.1.2.1. Límites del sistema hidrogeológico

Los límites del sistema hidrogeológico se determinan de acuerdo con:

- La identificación de los límites físicos del sistema hidrogeológico, incluyendo elementos como masas de agua próximas, ríos, lagos, océanos, así como estructuras geológicas relevantes que definen su forma, extensión y relación con otras formaciones.
- La delimitación de capas impermeables o semipermeables que restringen o confinan el flujo del agua subterránea.

3.1.2.2. Naturaleza del acuífero y sus propiedades hidrogeológicas

Para establecer la naturaleza del acuífero y sus propiedades hidrogeológicas se debe:

- Clasificar el tipo de acuífero: poroso, fisurado o kárstico, indicando si es confinado o libre y si tiene conexión con otras masas de agua.
- Describir las propiedades hidrogeológicas clave de cada una de las formaciones acuíferas captadas: conductividad hidráulica, porosidad eficaz, coeficiente de almacenamiento.
- Analizar la piezometría actual y su evolución. Establecer las principales líneas de flujo y gradientes hidráulicos. Es importante conocer el nivel piezométrico estático y dinámico en las captaciones de abastecimiento, así como las oscilaciones estacionales anuales e interanuales.
- En el caso de manantiales, análisis de los caudales naturales en periodos húmedos y de estiaje, así como de las curvas de agotamiento.
- En captaciones sobre formaciones aluviales, estudio de la posible relación río/acuífero con el apoyo de aforos diferenciales si es preciso.
- Analizar el grado de desarrollo del karst (en sistemas kársticos). Considerando la presencia de conductos, dolinas, simas y demás formas de disolución. Esto influye en la dinámica del flujo subterráneo, pudiendo generar comportamientos anisótropos, flujo turbulento y transporte rápido de contaminantes.
- Estudiar la tipología orientación del sistema de fracturas, ya que estas discontinuidades controlan en gran medida la circulación del agua en medios fisurados. El análisis estructural permite identificar zonas preferenciales de flujo, conexiones entre unidades y posibles vías de drenaje.
- Cuando corresponda, se realizará un análisis de la escorrentía hacia las zonas inmediata y próxima, la presencia de sumideros, la relación directa de la captación con la red de fracturación y otros factores que puedan influir en la recarga o en la vulnerabilidad del acuífero.

3.1.2.3. Principales componentes del balance hídrico

Para establecer los componentes del balance hídrico se debe llevar a cabo la:

- Identificación y delimitación del área de alimentación.
- Identificación y, en la medida de lo posible, cuantificación de las fuentes de recarga y descarga del acuífero. Las principales fuentes de recarga directa incluyen, entre otras, la precipitación, los aportes subterráneos laterales, la intrusión marina, los retornos de regadío, los intercambios con cuerpos de agua superficiales, etc.
- Caracterización de las salidas de agua, incluyendo los bombeos, la evapotranspiración y las descargas naturales hacia ríos, lagos o mares.

3.1.2.4. Composición y calidad del agua subterránea

Para establecer la composición y la calidad del agua subterráneo es necesario:

- Determinar la composición y características físico-químicas del agua captada y la evolución química del agua en el acuífero con especial atención a los puntos de la red de calidad más próximos a la captación.
- Identificar las actividades que pueden deteriorar la calidad del agua, incluyendo fuentes puntuales y difusas de contaminación.

3.1.2.5. Singularidades de la zona de estudio

Para determinar las singularidades de la zona de estudio se tendrá en cuenta: analizar la relación río/acuífero, los patrones de escorrentía hacia las zonas inmediata y próxima, la existencia de sumideros, así como la relación directa de la captación con uno o varios drenajes o fracturas de drenaje, entre otras.

3.1.2.6. Análisis de actividades potencialmente contaminantes

Inventariar las actividades potencialmente contaminantes es necesario:

- Inventario de actividades potencialmente contaminantes situadas sobre el acuífero. Deben ser agrupadas según su origen (vertidos líquidos, aplicación agrícola de efluentes, actividades industriales sujetas a la legislación IPPC, obras subterráneas e infraestructuras, actividades agrícolas etc., al menos hay que considerar las que figuran en el anejo VIII del RDPH). La información recogida para cada tipo de actividad contendrá la naturaleza de la actividad y localización exacta. También deben incluirse las medidas de seguridad (si existen) para evitar que un evento real de contaminación ocurra. Estos datos quedarán reflejados en una tabla y se integrarán en un SIG para producir el mapa de actividades potencialmente contaminantes.

El desarrollo de un modelo conceptual sólido constituye una herramienta esencial en el diseño de medidas de protección para acuíferos destinados al abastecimiento de agua. El modelo no solo permite prever los resultados esperados de dichas acciones, sino también comprender las causas de resultados inesperados, ya sea debido a una protección insuficiente o excesiva.

3.2. Etapa II: Selección del método de dimensionamiento

Una vez que se dispone de toda la información necesaria para clasificar la captación, la población abastecida y los acuíferos captados, y tras haber sintetizado dicha información en un modelo conceptual de funcionamiento, se debe proceder a la elección del método de dimensionamiento del perímetro. Se recomienda seguir las siguientes pautas generales:

- Los perímetros sobre acuíferos porosos o asimilables a porosos se diseñarán, preferiblemente, en base a criterios de tiempo de tránsito, teniendo en consideración criterios de vulnerabilidad cuando la situación hidrogeológica lo haga necesario, especialmente cuando la zona no saturada ofrezca una protección elevada o en el caso de manantiales en los que no se haya podido determinar el tiempo de tránsito del agua o esta provenga de una mezcla compleja de aguas con diferente recorrido.
- Los perímetros sobre acuíferos kársticos o fisurados se dimensionarán en base a criterios de vulnerabilidad a la contaminación, teniendo en consideración criterios de tiempo de tránsito cuando ello sea posible.
- Los métodos propuestos se recomiendan como opción preferente de forma general, siendo esta la primera opción a considerar, salvo que el estudio geológico e hidrogeológico demuestre que alguno de los métodos recogidos en la bibliografía recomendada ofrece mejores resultados para el caso concreto en estudio. En cualquier caso, en el informe de propuesta de perímetro, la elección del método de dimensionamiento siempre debe estar justificada.
- Ninguno de los métodos propuestos proporciona resultados de aplicación directa. Las isócronas obtenidas, o la zonificación basada en criterios de vulnerabilidad, según el caso, deben ser ajustadas siempre de forma que sean coherentes con la realidad física y el modelo conceptual del acuífero y la captación.

La figura 3.5 muestra los métodos recomendados para el diseño de los perímetros de protección según el tipo de acuífero y la clase en la que se ubica la captación.

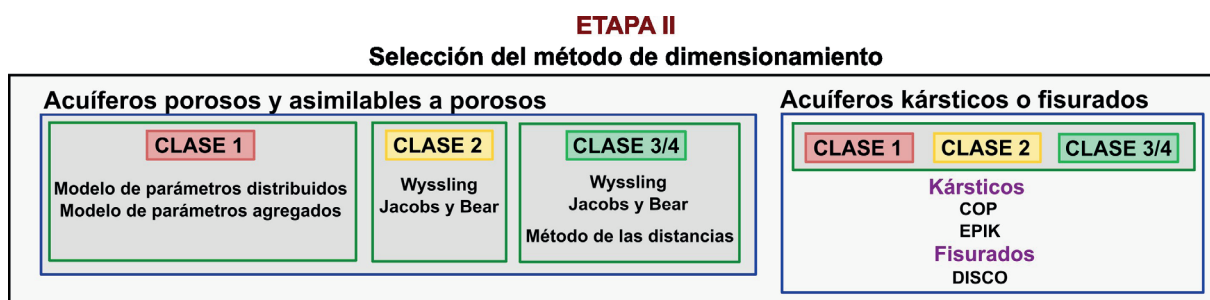


Figura 3.5 Etapa II. Selección del método de dimensionamiento del perímetro en función de la clase de captación y del tipo de acuífero asignados en la etapa I.

3.2.1. Métodos recomendados en acuíferos porosos o asimilados

Como se ha comentado en párrafos anteriores, se recomienda diseñar los perímetros de protección de captaciones situadas sobre acuíferos porosos o asimilados en base a criterios de tiempo de tránsito, mediante el cálculo de isócronas. Dependiendo de la complejidad de cada caso se utilizarán aproximaciones analíticas o modelos numéricos.

Aunque los métodos de diseño de perímetros de protección de captaciones basados en la evaluación simplificada del poder autodepurador del terreno tuvieron cierto predicamento en épocas pasadas, consideramos que en la actualidad deben ser formalmente desaconsejados. Entre los más empleados en este grupo se encuentra el método Rehse, un método empírico que pretende cuantificar el poder autodepurador de los materiales que conforman tanto la zona no saturada como la saturada frente a la contaminación microbiológica. Este método asigna a cada tipo de material una capacidad genérica de depuración, expresada como el espesor de mate-

rial necesario para que se produzca una depuración total. El principal problema es que todo el método se basa en unas tablas excesivamente simplificadas, en las que no se justifica suficientemente el valor de depuración asignado a cada material. Por otra parte, el método de Bolsenkötter, adaptación del anterior para su aplicación en medios kársticos, adolece de los mismos defectos, quizá acentuados por el hecho de que en este tipo de acuíferos el flujo es mucho más rápido y el contacto con la matriz del acuífero es, en gran parte de los casos, muy reducido. Ambos métodos tienden a sobreestimar la capacidad de depuración del terreno.

En cualquier caso, independientemente del tipo de captación, del caudal extraído, la población abastecida, o el tipo de acuífero, se deben emplear métodos más precisos a los recomendados si ello es posible. Por ejemplo, si se dispone de información suficiente para el cálculo de isócronas mediante modelación numérica, será preferible emplear este enfoque antes que el empleo de un modelo analítico.

Para captaciones de clase 1 las isócronas se calcularán mediante modelos numéricos de simulación del flujo subterráneo. La elección del tipo de modelo y su desarrollo dependerá de la complejidad del sistema que muestre el modelo conceptual.

Para captaciones de las clases 2 y 3/4 los perímetros se diseñarán preferiblemente mediante los métodos de Wyssling o Jacobs y Bear. Por otra parte, en el caso de los perímetros de clase 4, si se demuestra que el acuífero captado no es vulnerable a la contaminación se podrá emplear el método de las distancias.

Los acuíferos kársticos o fisurados reclasificados como asimilables a porosos se tratarán igual que los acuíferos porosos, tanto en la selección, como en la aplicación del método de diseño de los perímetros de protección.

3.2.2. Métodos recomendados en acuíferos kársticos o fisurados

En el caso de acuíferos kársticos o fisurados la zonificación de perímetros de protección se basará en criterios de vulnerabilidad a la contaminación sobre el área de alimentación. Para acuíferos kársticos se recomienda emplear el método COP o EPIK dependiendo de la información geológica disponible y de las características del sistema. Por otro lado, en el caso de acuíferos sobre materiales fisurados se recomienda emplear el método DISCO.

La elaboración de cartografía de vulnerabilidad a la contaminación en este tipo de acuíferos conlleva una simplificación notable de un medio naturalmente complejo, del que se suele disponer de información muy limitada sobre aspectos tan esenciales como el grado de desarrollo y la orientación de las fracturas, sus propiedades hidráulicas, su conexión con otras masas de agua o el grado de desarrollo de cubiertas protectoras. En este punto, es preciso recordar que no es cierto que cuanto más compleja sea una metodología de vulnerabilidad más cerca se está de obtener mapas de mayor precisión. La precisión se obtiene, principalmente, de la comprensión del funcionamiento hidrogeológico del acuífero, de la calidad de los parámetros empleados y de lo acertadas que hayan sido las simplificaciones necesarias para representar adecuadamente dicho funcionamiento.

Es posible emplear modelos matemáticos en acuíferos kársticos o fisurados como herramientas de apoyo para la definición de perímetros de protección, especialmente cuando su comportamiento hidrodinámico es asimilable a un acuífero poroso y, por tanto, pueden ser conceptualizados/modelados con la aproximación de medio poroso equivalente. Cuando la hipótesis del medio poroso equivalen-

te no sea admisible, los modelos solamente serán útiles si existe un conocimiento preciso de la geometría, las condiciones de contorno (la orientación de las fracturas o cavidades, etc.) y se cuentan con información (ej. ensayos de trazadores convenientemente diseñados) que permita identificar los caminos preferentes del agua y aproximar la velocidad del flujo y transporte.

3.3. Etapa III: Zonificación

Una vez seleccionado el método de dimensionamiento se pasará a la siguiente etapa en la que se calculará la extensión del perímetro y se definirán sus límites. En la figura 3.6 se muestra un esquema que detalla los pasos a seguir en esta etapa.

Dependiendo de la naturaleza del acuífero, el resultado de la aplicación de los diferentes métodos de cálculo será:

- en acuíferos detríticos un conjunto de isócronas,
- en acuíferos kársticos o fisurados un mapa de zonas de diferente vulnerabilidad.

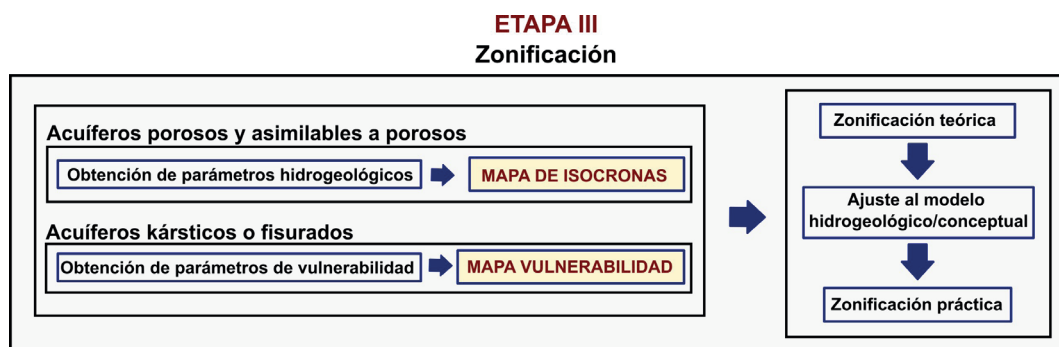


Figura 3.6 Esquema de flujo del desarrollo de la etapa III en el diseño de perímetros de protección.

La aplicación directa del método de dimensionamiento del perímetro proporciona una **zonificación teórica**. La superposición de esta con el modelo conceptual hidrogeológico, la cartografía geológica, la topografía y los usos del suelo, entre otros factores, da lugar a una **zonificación práctica**, que constituirá, junto con las restricciones de actividades y, en su caso, con las recomendaciones sobre el control de la calidad del agua, la propuesta de perímetro de protección definitivo. Esta propuesta puede ir acompañada del diseño de una red de vigilancia de la calidad del agua que asegure la detección temprana de contaminantes.

En el siguiente apartado se presenta, para cada método de dimensionamiento, un análisis de la información requerida para aplicar las ecuaciones correspondientes o para valorar la vulnerabilidad a la contaminación.

Cuando no se empleen medidas directas, solo serán aceptables fuentes de información fiables cuyo origen sea comprobable. El empleo de datos bibliográficos debe estar debidamente justificado, y su

calidad y adaptación al caso concreto deben ser demostradas. Por ejemplo, en el caso de una captación de clase 1 o 2 situada sobre un acuífero detrítico o asimilado, parámetros como la porosidad eficaz o el gradiente hidráulico deben determinarse a partir de medidas directas (ensayo de bombeo y medidas de nivel *in situ* respectivamente). No obstante, en captaciones de clase 3/4 se puede recurrir a fuentes bibliográficas, siempre que cumplan los criterios antes mencionados.

Existen dos guías publicadas por el Instituto Geológico y Minero de España, en las que se detalla la formulación matemática y el método de cálculo de perímetros de protección:

- *Guía Metodológica para la Elaboración de Perímetros de Protección de Captaciones de Aguas Subterráneas*. (Moreno y Martínez, 1991).
- *Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano*.

Metodología y aplicación al territorio (Martínez Navarrete & García García, 2003).

Estas guías contienen además información complementaria y ejemplos de aplicación comparando los resultados obtenidos con diferentes métodos de dimensionamiento que pueden ser útiles a la hora de dimensionar un perímetro por cualquier de los métodos recomendados.

3.3.1. Métodos para acuíferos porosos y asimilables a porosos

3.3.1.1. Modelos matemáticos

En acuíferos porosos, o cuyo comportamiento hidrodinámico pueda ser asimilable a poroso, los modelos matemáticos son el método preferible si la población abastecida es superior a 50.000 habitantes o el caudal extraído supera los 10.000 m³/día.

Los modelos matemáticos de acuíferos porosos aproximan, bajo diferentes hipótesis, los procesos que gobiernan el flujo o el transporte de solutos en la zona saturada. Permiten simular la situación de equilibrio (régimen estacionario) o la evolución (régimen transitorio) del estado (niveles o caudales, y otras variables directamente dependientes del flujo) de un acuífero o porción del mismo. Por ejemplo, pueden ser utilizados para estimar en la zona saturada las isócronas o tiempos de tránsito del agua o contaminantes a una captación. Se trata por tanto de herramientas útiles para la identificación de zonas donde se deben restringir actividades en el marco de la definición de perímetros de protección de captaciones.

Tipos de modelos matemáticos en acuíferos porosos

Atendiendo al detalle con que se puede aproximar el estado del acuífero, existen 2 tipologías de modelos: los modelos agregados y los modelos distribuidos.

Los modelos agregados determinan el estado medio del acuífero, o porción de este, frente a unas acciones globalizadas sin tener en cuenta la ubicación espacial de las acciones. Requieren una conceptualización muy simplificada del acuífero o porción modelada del mismo, representando su comportamiento global con unos pocos parámetros. Debido a estas hipótesis, dichos modelos no son los más apropiados para aproximar sistemas altamente heterogéneos o que estén sometidos a acciones no distribuidas uniformemente.

Los modelos distribuidos sí permiten simular la distribución espacial del estado del acuífero aproximando la distribución espacial de las acciones. Resuelven, bajo ciertas hipótesis, la ecuación en derivadas parciales que describe el flujo o el transporte en un acuífero. Dentro de ellos se puede distinguir entre modelos distribuidos de parámetros agregados y modelos distribuidos de paráme-

tros distribuidos. Los modelos distribuidos de parámetros agregados, aunque también pueden ser resueltos con modelos numéricos, habitualmente se basan en soluciones analíticas de la ecuación de flujo o transporte en medio poroso subterráneo, que sólo se pueden obtener para acuíferos sencillos ideales (geometría, condiciones de contorno simples y parámetros hidrodinámicos homogéneos, no permitiendo considerar una variabilidad espacial de las propiedades del acuífero). Los modelos distribuidos de parámetros distribuidos permiten resolver acuíferos más reales. Gracias a la discretización espacial a la que recurren, consideran una cierta variabilidad en las propiedades hidrodinámicas y condiciones de contorno en el acuífero.

Atendiendo al problema matemático resuelto y las hipótesis adoptadas para su resolución distinguimos entre modelos de acuíferos lineales y no lineales. Si un sistema es lineal la resolución de problemas se puede llevar a cabo por superposición de soluciones de problemas más simples (ej. perímetro de captaciones individuales). Estrictamente hablando, las isócronas se pueden resolver de forma exacta superponiendo las soluciones de cada una de las captaciones individuales, siempre que el problema de flujo y transporte resuelto para aproximar las isócronas sea lineal. El flujo subterráneo en un medio poroso decimos que es lineal cuando la respuesta de los niveles es lineal a las acciones (Pulido-Velázquez *et al.*, 2007). El comportamiento, o la ecuación, que gobierna el flujo de un acuífero es lineal, si este es confinado o si los descensos son pequeños en relación con el espesor saturado medio, condición que se cumple en la mayoría de los casos prácticos. En caso contrario, la resolución del problema no lineal debe llevarse a cabo mediante modelos de flujo que permita aproximar el efecto de las interacciones entre los diferentes pozos.

Criterios para la selección de modelos matemáticos

De acuerdo con lo indicado en el esquema general de cálculo, el establecimiento de las tipologías de modelos a aplicar en acuíferos porosos o asimilables a porosos para la evaluación de las isócronas para captaciones, viene determinado por la categoría o clase de perímetro a evaluar, que depende de la población o el caudal de la captación.

Para las captaciones de clase 1 (que abastecen a poblaciones mayores de 50.000 habitantes o con caudales superiores a 10.000 m³/día) se recomienda aplicar modelos matemáticos distribuidos, bien de parámetros agregados o distribuidos. El modelo que se empleará depende de la elaboración previa de un modelo conceptual (geometría, condiciones de contorno incluidas las acciones como bombeos, recarga, cargas contaminantes, parámetros que condicionan el flujo y el transporte de solutos) que permita aproximar los procesos de flujo y transporte que condicionan los tiempos de viaje de los contaminantes teniendo en cuenta la información previa disponible o adquirida para este trabajo. Se pretende calibrar/validar el modelo matemático que permita verificar que el modelo conceptual y las observaciones son compatibles con las ecuaciones de gobierno usadas para aproximar los procesos. Si no pudieran aproximarse las observaciones con el modelo conceptual inicialmente planteado se precisará replantearse el mismo buscando la compatibilidad con los datos.

La selección del tipo de modelo matemático a aplicar para simular las isócronas debe cumplir la premisa de no incrementar la complejidad del modelo y el número de parámetros si no hay datos que muestren que es necesario para una mejor aproximación. A igual o similar capacidad para aproximar el flujo o transporte, los modelos más simples y parsimoniosos tienen un mayor poder predictivo, y por tanto son más confiables. En esta misma línea, a la hora de aproximar el transporte de solutos, en los casos en los que los procesos advectivos son los que condicionan mayoritariamente el movimiento de los solutos, se podrá simplificar la simulación de los tiempos de viaje, considerando exclusivamente la componente ligada al flujo en el medio poroso.

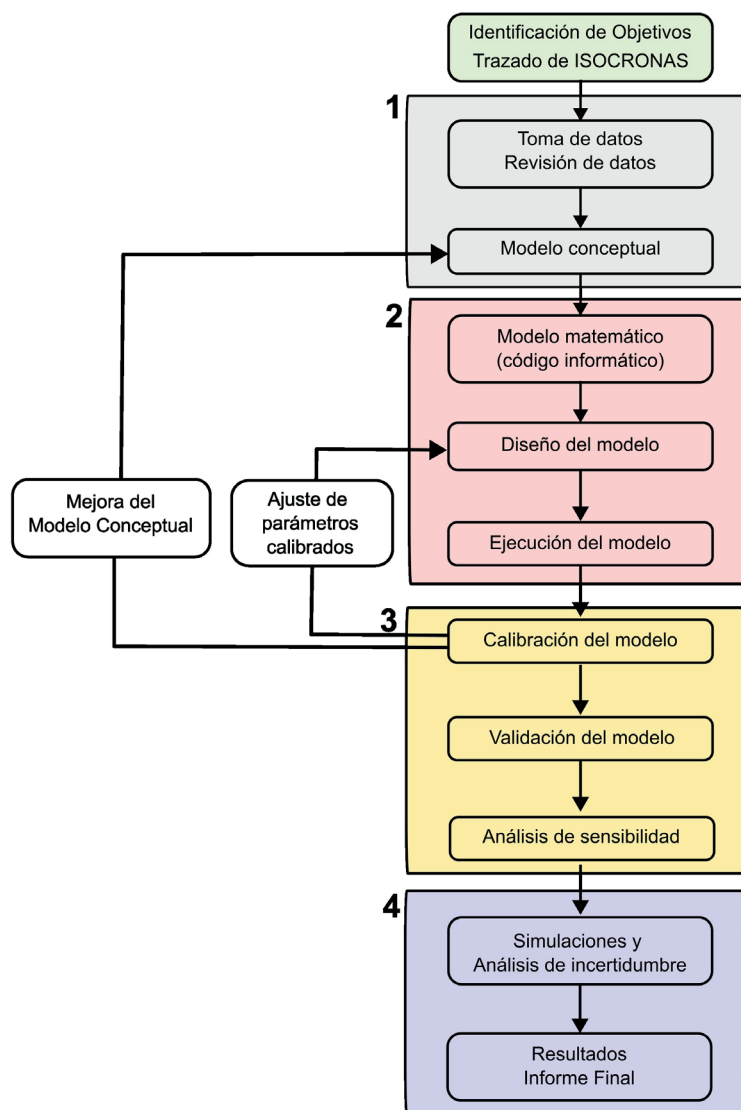


Figura 3.7 Esquema de flujo que muestra los pasos necesarios para elaborar un perímetro de protección mediante modelación matemática. (Adaptado de Baalousha, Husam (2011). Fundamentals of groundwater modelling).

Pasos recomendados para simular isócronas mediante modelos matemáticos

Para la simulación de las isócronas o tiempos de tránsito del agua o contaminantes a captaciones mediante un modelo matemático se recomienda seguir los siguientes pasos (figura 3.7):

1. Recopilación de datos y observaciones y definición del modelo conceptual.
2. Selección del método matemático de flujo y transporte a aplicar para simular el modelo conceptual.
3. Calibración/validación y análisis de sensibilidad del modelo a diferentes parámetros y variables de acuerdo con la incertidumbre en los mismos. Verificación de la coherencia del modelo conceptual definido. En caso contrario es necesario volver al punto 2 para plantear un nuevo modelo conceptual que pueda mejorar las carencias del modelo inicial.
4. Simulación de los tiempos de tránsito del agua o contaminantes a captaciones representativas de la situación/escenario actual. Sería deseable valorar potenciales impactos de la incertidumbre en acciones o parámetros.

Los modelos conceptuales y matemáticos deben diseñarse integrando toda la información (geometría, parámetros hidráulicos, etc.) del sistema que se encuentre disponible y que resulte útil para una mejor aproximación a los tiempos de tránsito del agua hacia las captaciones para las cuales se diseña el perímetro. En el apartado 3.3.1.2. y siguientes, se incluyen tablas con recomendaciones sobre cómo obtener los parámetros para la evaluación de isócronas con métodos simplificados para las captaciones de clase 2, 3 y 4. En las captaciones clase 1 se debe emplear, al menos, la misma precisión que la sugerida para las captaciones de clase 2; también resulta útil comparar los resultados obtenidos con las aproximaciones numéricas más detalladas y las simplificadas propuestas para las de clase 2 y 3 (Zeferino *et al.*, 2022). Un análisis de una muestra suficiente de casos permitirá extraer conclusiones sobre la bondad y las limitaciones de cada una de las aproximaciones simplificadas para diferentes tipologías de perímetro.

Ventajas y limitaciones de los modelos matemáticos

Entre las principales limitaciones de los modelos matemáticos destacan:

- No son aproximaciones numéricas a la realidad, sino a un modelo conceptual previamente definido a partir de unas hipótesis o simplificaciones de la realidad, que intenta preservar las características esenciales que se pretende valorar. No se debe olvidar que los modelos matemáticos de simulación permiten aproximar cuantitativamente, de acuerdo con un modelo conceptual, el impacto de determinados procesos y la evolución del estado del sistema modelado. Por tanto, si el modelo conceptual es erróneo o no refleja adecuadamente la realidad, el modelo matemático también lo será.
- Si los datos y observaciones disponibles son reducidos, la utilidad del modelo es menor, tanto para la validación de hipótesis o modelos conceptuales como para la evaluación cuantitativa de impactos o alternativas.

Entre las ventajas de los modelos destacan:

- Permiten corroborar si el modelo conceptual propuesto es coherente con los datos y observaciones disponibles. Contribuyen, por tanto, a mejorar el conocimiento sobre el funcionamiento del sistema al poder validar la coherencia de las hipótesis realizadas.
- Permiten realizar una valoración cuantitativa racional de escenarios (como por ejemplo diferentes hipótesis de bombeo, recarga, etc.), comparar y ordenar alternativas, y valorar potenciales impactos de la incertidumbre en acciones o parámetros.

3.3.1.2. Método de Wyssling

El método de Wyssling (Wyssling, 1979 en Lallemand-Barrès, Roux, 1989) fue diseñado específicamente para el dimensionamiento de perímetros de protección de acuíferos con porosidad intergranular. Este método permite delimitar tanto el área de alimentación de la captación como las isócronas a partir de cinco parámetros básicos (caudal de bombeo, gradiente hidráulico, conductividad hidráulica, espesor saturado y porosidad eficaz). Su principal inconveniente reside en considerar el acuífero como una estructura homogénea e isotrópica, sin tener en cuenta posibles irregularidades o complejidades estructurales del medio. Es en la etapa de ajuste del perímetro teórico al perímetro real, donde este tipo de factores debe ser tenido en cuenta para obtener un perímetro correctamente diseñado.

En la tabla 3.1 se muestran los parámetros necesarios para aplicar el método de Wyssling y la fuente recomendada para obtener dichos parámetros en función de la clase a la que pertenece la captación.

3. Directrices para el dimensionamiento de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas destinadas al consumo humano

Tabla 3.1 Método de Wyssling. Recomendaciones acerca del origen de los datos para el cálculo de perímetros de protección.

Parámetro	Tipo de captación	
	Clase 2	Clase 3/4
Caudal de bombeo (Q)	Se empleará el máximo caudal previsto para la captación	
Gradiente hidráulico (i)	Mapa piezométrico reciente ¹	Mapa piezométrico ¹ Datos bibliográficos
Conductividad Hidráulica (K)²	Ensayo de Bombeo	Ensayo de Bombeo/Fórmulas empíricas ³ / Bibliografía
Espesor saturado (b)^{2,4}	Medido	
Porosidad eficaz (m_e)²	Ensayo de Bombeo	Ensayo de Bombeo /Bibliografía

¹ El número de puntos de medida del nivel piezométrico se establecerá en función de la superficie del área de alimentación y de la clase de captación.

² Los parámetros característicos del acuífero podrán provenir de una referencia bibliográfica siempre que se tenga la seguridad de que se trata de una fuente fiable, estén correctamente evaluados y se tenga la certeza que corresponden a la formación geológica que capta la explotación en las proximidades de la misma. En cualquier caso, para las captaciones tipo 2 siempre es preferible la realización de un ensayo de bombeo diseñado exprofeso y prolongado hasta alcanzar un régimen estacionario o pseudo-estacionario.

³ Como por ejemplo la fórmula de Galofré (Galofré, 1966).

⁴ Espesor del acuífero, saturado de agua, que efectivamente es drenado por la captación.

En el caso de captaciones de clase 3 o 4, cuando se dispone de valores fiables de caudal extraído y descensos provocados por la captación, se puede estimar la transmisividad del acuífero (el producto de la permeabilidad × el espesor saturado) mediante

fórmulas empíricas como la propuesta por Galofré (Galofré, 1966): $T(m^2d^{-1}) = 100 \times (Q(l s^{-1})/\Delta S(m))$ siendo ΔS el descenso. Esta fórmula se aplica principalmente en acuíferos relativamente homogéneos.

3.3.1.3. Método de Jacobs y Bear

El método de Jacobs y Bear (Bear 1979, en Lallemand-Barrès y Roux, 1989), al igual que sucede con el método de Wyssling, es de aplicación en acuíferos porosos idealmente homogéneos, isótropos de extensión infinita, y está sometido a un gradiente regional uniforme. Partiendo de la formulación empírica se construyó un ábaco con una colección de curvas correspondientes a isócronas para diversos tiempos de tránsito. El método original consiste en aplicar la formulación propuesta y obtener del ábaco, por interpolación, la isócrona buscada.

En la tabla 3.2 se muestran los parámetros necesarios para aplicar el método de Jacobs y Bear y la fuente recomendada para obtener dichos parámetros, en función de la clase a la que pertenece la captación.

Tabla 3.2 Método de Jacobs y Bear. Recomendaciones acerca del origen de los datos para el cálculo de perímetros de protección.

Parámetro	Tipo de captación	
	Clase 2	Clase 3/4
Caudal de bombeo (Q)	Se empleará el máximo caudal previsto para la captación	
Gradiente hidráulico (i)	Mapa piezométrico reciente ¹	Mapa piezométrico ¹ Datos bibliográficos
Transmisividad (T)²	Ensayo de Bombeo	Ensayo de Bombeo/Fórmulas empíricas ³ //Bibliografía
Espesor saturado (b)^{2,4}	Medido	
Porosidad eficaz (m_e)²	Ensayo de Bombeo	Ensayo de Bombeo /Bibliografía

¹ El número de puntos de medida del nivel piezométrico se establecerá en función de la superficie del área de alimentación y de la clase de captación.

² Los parámetros característicos del acuífero podrán provenir de una referencia bibliográfica siempre que se tenga la seguridad de que se trata de una fuente fiable, estén correctamente evaluados y se tenga la certeza que corresponden a la formación geológica que capta la explotación en las proximidades de la misma. En cualquier caso, para las captaciones tipo 2 siempre es preferible la realización de un ensayo de bombeo diseñado exprofeso prolongado hasta alcanzar un régimen estacionario o pseudo-estacionario.

³ Como por ejemplo la fórmula de Galofré (Galofré, 1966).

⁴ Espesor del acuífero, saturado de agua, que efectivamente es drenado por la captación.

3.3.1.4. Método de las distancias

Este método es aplicable en captaciones de clase 4, situadas sobre acuíferos porosos o equiparables a porosos, muy poco vulnerables, que naturalmente están bien protegidos contra la contaminación, y en los que el agua permanece un tiempo suficiente para garantizar su purificación natural antes de acceder a la captación.

La extensión de las zonas de protección se determina de la manera siguiente:

– Zona inmediata o de restricciones absolutas

- Se recomienda establecer un área de 25 m en el entorno de la captación y aguas arriba de la obra (drenos, galerías), tal como se muestra en la figura 3.8 a).
- En caso de existir discontinuidades (fracturas, fallas, etc.) conectadas hidráulicamente con la captación, estas se deben incluir en la zona inmediata, tal como se ilustra en la figura 3.8 b).
- Asimismo, si existen pendientes que favorezcan la escorrentía superficial hacia la captación, la zona inmediata se debe extender lo suficiente para evitar la llegada de contaminantes por esta vía.

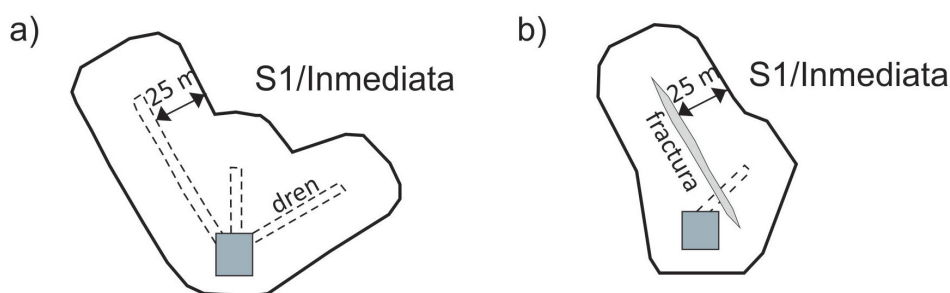


Figura 3.8 Delimitación de la zona inmediata (S1) teniendo en cuenta: a) la presencia de drenajes; b) la presencia de fracturas próximas a la captación. Modificado de Guide pratique OFEFP, 2002.

– Zona general

- Esta zona se extiende al menos 250 metros aguas arriba desde el límite exterior de la zona inmediata, siguiendo la dirección general del flujo subterráneo (tabla 3.3)
- Las distancias indicadas en los puntos anteriores pueden ser ampliadas en el caso de que las circunstancias particulares de la captación o del acuífero lo hagan recomendable.

Tabla 3.3: Recomendaciones para la determinación de las zonas de protección en captaciones de clase 4, situadas en acuíferos poroso y muy poco vulnerables.

Porosos/asimilables a porosos/ Método de las distancias		
Tipo de captación	Zonificación del perímetro	
Clase 4	Inmediata	25 metros
	General	250 metros

3.3.2. Métodos para acuíferos kársticos y fisurados

El diseño de perímetros de protección en acuíferos kársticos y fisurados se basa en la aplicación de criterios de vulnerabilidad intrínseca. No se emplean criterios de tiempo de tránsito mediante el cálculo de isócronas debido a la extrema complejidad y heterogeneidad del flujo subterráneo en estos sistemas. En estos materiales el agua se desplaza a gran velocidad a través de conductos y fisuras, con tiempos de tránsito muy variables e impredecibles, incluso en distancias cortas. Además,

las técnicas convencionales empleadas para determinar isócronas, como los cálculos hidráulicos simplificados, no son aplicables en este contexto.

En formaciones kársticas, el proceso de disolución aumenta el tamaño de los conductos a lo largo del tiempo, y con ello la velocidad del flujo de agua, reduciendo el tiempo de tránsito entre los puntos de recarga y la captación. En este tipo de formación el agua puede recorrer grandes distancias en poco tiempo, sin experimentar procesos naturales de filtración. Además, la orientación y las propiedades hidráulicas de los conductos determinan la dirección del flujo subterráneo. Estructuras geológicas como fallas y cabalgamientos pueden actuar como barreras que delimitan un acuífero o, por el contrario, crear conexiones hidráulicas entre acuíferos distintos.

Este tipo de sistemas suelen presentar conexiones de largo alcance, lo que implica que un foco de contaminación superficial puede estar vinculado a una captación distante, mediante vías subterráneas no visibles en la superficie. Esta situación dificulta la definición precisa de zonas de recarga o de captación basándose únicamente en el tiempo de llegada del agua. Ante esta realidad, la evaluación de la vulnerabilidad del terreno frente a la contaminación se presenta como una alternativa más adecuada y práctica para el diseño de perímetros de protección, ya que permite estimar la capacidad natural del medio geológico para atenuar o impedir la llegada de contaminantes al acuífero. En la figura 3.9 se muestra un esquema ilustrativo que refleja la complejidad estructural típica de un acuífero kárstico.

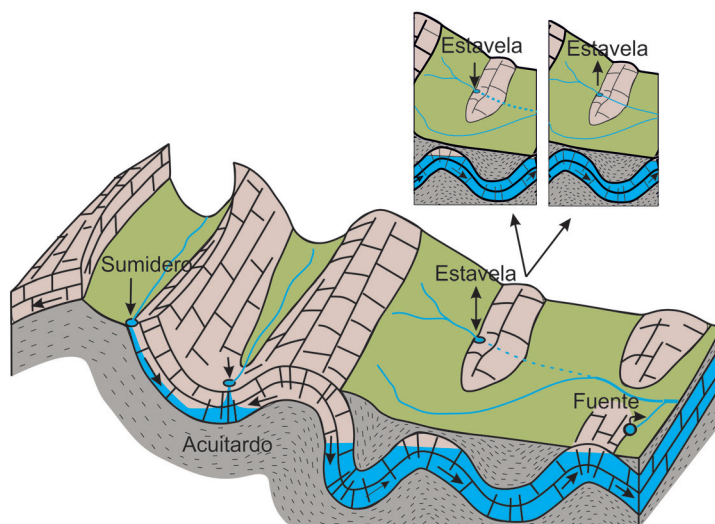


Figura 3.9 Se muestra la importancia de considerar la topografía, la estratigrafía y la estructura geológica para establecer el flujo del agua subterránea en un sistema acuífero kárstico. Áreas color azul (zona saturada), flechas (direcciones de flujo). (Modificado de Goldscheider, 2005a). Una estavela es un hueco que puede funcionar como sumidero o fuente dependiendo de las condiciones hidrológicas.

3.3.2.1. Método EPIK (acuíferos kársticos)

El método EPIK es una técnica cualitativa utilizada para evaluar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos kársticos a la contaminación. Fue desarrollado en Suiza y se emplea principalmente en regiones con litología carbonática, donde el agua subterránea circula por fisuras, grietas y conductos formados por disolución. EPIK es un acrónimo que representa los cuatro factores evaluados:

- **Epikarst (E):** evalúa la zona superficial del karst.
- **Protección (P):** considera si los sumideros (puntos de infiltración directa) están protegidos o expuestos a contaminación directa. Este factor incluye el desarrollo del suelo y la vegetación, que puede actuar como barrera o filtro.
- **Infiltración (I):** analiza el tipo de infiltración (difusa o concentrada) y su capacidad para transportar contaminantes hacia el acuífero.

- **Desarrollo del karst (K):** evalúa el grado de karstificación que influye directamente en la velocidad y dirección del flujo subterráneo.

Cada uno de estos factores se evalúa y se le asigna un valor basado en criterios específicos. Combinando los factores ponderados se elabora un mapa de vulnerabilidad. Después, cada zona se clasifica en distintos niveles de vulnerabilidad (desde muy baja hasta muy alta). El resultado permite priorizar áreas de protección y gestión en función del grado de vulnerabilidad.

Este método resulta especialmente útil, ya que integra factores geomorfológicos, hidrológicos y antrópicos, lo que le permite una adaptación adecuada a la complejidad del medio kárstico. La tabla 3.4 muestra los parámetros considerados en el método EPIK, junto con las fuentes de información correspondientes, diferenciadas según la clase de captación para la que se está delimitando el perímetro de protección.

Tabla 3.4 Método EPIK. Recomendaciones acerca del origen de los datos para el cálculo de perímetros de protección.

Atributo	Parámetros	Tipo de captación		
		Clase 1	Clase 2	Clase 3/4
E	Epikarst	Campo ¹ Cartografía Ortofoto Métodos geofísicos		Campo ¹ Cartografía Ortofoto
P	Espesor	Sondeo/Cata ² /Geofísica		Cata ² / Bibliografía / Cartografía
	Tipo según permeabilidad	Análisis textural Ensayos de permeabilidad ³ Bibliografía/Cartografía	Análisis textural Bibliografía/Cartografía	Bibliografía/Cartografía Estimado
I	Análisis red de drenaje	Campo Satélite/Ortofoto/Cartografía		
	Pendiente	MDT		MDT Cartografía topográfica ⁴
	Vegetación	Campo Satélite		Campo Satélite Bibliografía/Cartografía
K	Red Kárstica	Campo Satélite/Ortofoto Cartografía geológica/geomorfológica Geofísica Métodos complementarios ⁵		Campo Cartografía geológica/ geomorfológica Ortofoto

¹ La campaña de campo es necesaria para resolver dudas que hayan surgido en gabinete. Su duración depende de la complejidad del estudio y de la clase de captación.

² El número de sondeos/catas dependerá de la heterogeneidad de la zona en estudio y de la clase a la que pertenece la captación.

³ Existen numerosos métodos de medición de la permeabilidad del suelo, basados en técnicas de anillo sencillo, anillo doble, inyección superficial etc. Corresponde al hidrogeólogo, tras el estudio del tipo de material y su heterogeneidad decidir cuál es el más adecuado.

⁴ En el caso de captaciones clase 3/4 se puede obtener la pendiente a partir de la interpretación de un mapa topográfico a escala adecuada.

⁵ Por ejemplo análisis de hidrogramas, interpretación de la calidad del agua, ensayos con trazadores etc.

Epikarst (E): la valoración del epikarst requiere un tipo especial de análisis de la morfología del terreno, orientado a evaluar su desarrollo. Se subdivide en tres categorías, que corresponden a niveles de vulnerabilidad decreciente. Si se observan formas típicas del modelado Kárstico (dolinas, lapices, sumideros) la zona se clasifica en la categoría E1. En el otro extremo, si no existen en absoluto, se engloba en la categoría E3. Esta clasificación se realiza principalmente mediante la cartografía de rasgos geomorfológicos. La mayor parte de la información necesaria se puede obtener de bibliografía, mapas topográficos a escala adecuada y fotografía aérea. En caso de sospechar que el epikarst está cubierto por depósitos superficiales se recomienda el uso de métodos geofísicos

para caracterizarlos cuando el perímetro corresponde a una captación clase 1 o 2. La verificación en campo es imprescindible para perímetros clase 1 y 2 y muy recomendable para los de clase 3/4.

Cubierta de protección (P): hace referencia a la presencia de suelo edáfico y a las formaciones geológicas situadas sobre el acuífero que actúan como barrera de protección. Su evaluación tiene en cuenta el espesor de la capa, distinguiéndose diferentes categorías según dos tipos de escenarios: suelo directamente sobre las formaciones calcáreas o detríticas con muy alta permeabilidad (caso A) y suelo sobre formaciones geológicas de baja permeabilidad (caso B) (figura 3.10). Las áreas de captación que disponen de cubierta de protección pueden diferenciarse de aquellas que carecen de ella a partir de la interpretación de mapas geológicos, monografías regionales, fotografías aéreas e imágenes de satélite, dependiendo de la resolución de éstas.

En cuanto a la identificación de las formaciones geológicas de baja permeabilidad se recomienda realizar análisis texturales para las captaciones clases 1 y 2. El número de análisis estará en función de la heterogeneidad de la zona de estudio. En el resto de las tipologías se puede identificar en la cartografía existente o estimar de forma justificada.

El espesor del suelo y de las formaciones geológicas de baja permeabilidad se puede obtener de información disponible de la zona, de excavaciones recientes, o medirse directamente en el terreno mediante la realización de catas.

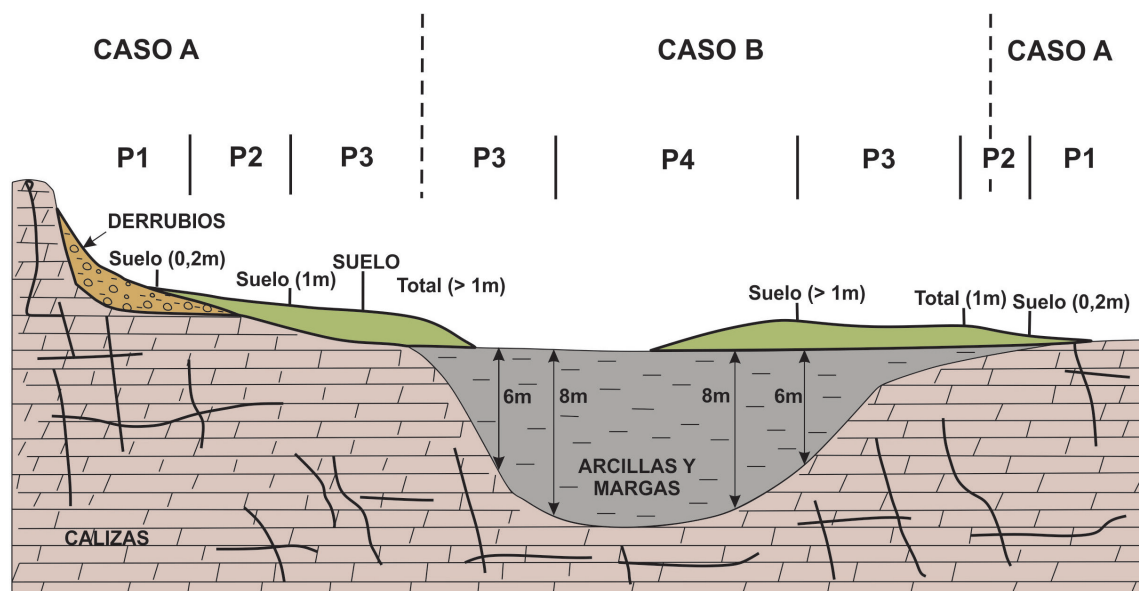


Figura 3.10 Esquema que muestra la forma en que se clasifica el territorio con el método EPIK según las categorías del factor P (cubierta de protección). Modificado de OFEFP, 1998.

En captaciones clase 1 y 2 solo se podrá asignar la categoría P4 si se ha verificado el espesor de la cubierta de protección mediante técnicas adecuadas (sondeos, geofísica, etc.).

Condiciones de infiltración (I): consiste en el análisis de la red de drenaje, las pendientes y la vegetación, identificando caminos de flujo preferencial (sumideros) y zonas de infiltración difusa. Se distinguen cuatro categorías de vulnerabilidad decreciente en función de cómo se produce la infiltración en el terreno, ya sea a través de un sumidero, un cauce, una zona de recarga difusa, etc.

Las zonas de infiltración se caracterizan mediante visitas al campo, mapas topográficos, fotografías aéreas e imágenes de satélite. La caracterización de las pendientes (valor y situación de la base) para captaciones clase 4 se puede obtener de mapas topográficos, aunque si se dispone de un modelo numérico de altitud es más sencillo emplear esta herramienta. En el resto de las clases de captación se debe emplear el MDT (modelo digital del terreno).

La información de la cubierta vegetal se obtendrá preferentemente de imágenes de satélite actuales y comprobación *in situ*. También pueden emplearse datos de índices como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada). En el caso de captaciones de clase 3/4 puede emplearse cartografía de cultivos y aprovechamiento¹ si están adecuadamente actualizados.

Red kárstica (K): valora la existencia y grado de desarrollo de la red kárstica, se distinguen tres categorías en función del grado de desarrollo.

La existencia de elementos tales como cuevas, sumideros, etc. se puede identificar en fotografía (aérea, satélite), cartografía, referencias bibliográficas, etc., aunque, con frecuencia es necesario comprobar directamente en campo su localización extensión y desarrollo.

El grado de desarrollo de una red kárstica se refiere al nivel de evolución y complejidad de las características y procesos kársticos, se puede evaluar a través de factores, como:

Morfología: características kársticas como dolinas, poljes, cuevas y manantiales.

Extensión: superficie afectada por los procesos kársticos, puede incluir sistemas de drenaje subterráneo.

Interconexión: la forma en que las diferentes características kársticas están conectadas entre sí, lo que afecta la circulación del agua y la formación de nuevos rasgos.

Edad: un sistema más antiguo puede mostrar mayor complejidad y desarrollo.

Factores geológicos y climáticos: la composición del sustrato, la permeabilidad de las rocas y el clima también influyen en el desarrollo kárstico.

Si no se encuentran indicadores de la red kárstica, para captaciones de clase 1 y 2, se recomienda emplear métodos complementarios indirectos. Éstos se basan en el análisis de hidrogramas de flujo, la interpretación de ensayos de trazadores y el estudio de la variabilidad de la calidad del agua. Algunos de estos métodos son:

- **Los hidrogramas de flujo** permiten interpretar el grado de desarrollo y la estructura del acuífero kárstico. El tiempo de reacción de una captación a los acontecimientos de precipitación es un indicador que permite caracterizar el grado de desarrollo de la red kárstica. Por ejemplo, si se observa una respuesta rápida seguida por una rápida recesión, se puede suponer que existe una red kárstica bien desarrollada.
- **El tiempo de tránsito medio** calculado mediante ensayos de trazadores también es un buen indicador de la presencia o ausencia de una red kárstica. Una velocidad de más de 15 m/h durante periodos de flujo escaso en cursos de agua superficial que se infiltran y mayor de 75 m/h durante periodos de flujo elevado permiten asumir la existencia de una red kárstica bien desarrollada.
- **La variación de la calidad del agua en un manantial** también es un buen indicador de la presencia o ausencia de una red kárstica. Si la composición del agua es bacteriológicamente estable, tras episodios de fuertes precipitaciones, se puede deducir que la red kárstica está ausente o se halla escasamente desarrollada, también es posible que esté protegida por un medio poroso.
- **Número de manantiales.** Un sistema kárstico bien desarrollado se caracteriza por la existencia de una única salida principal de descarga, mientras que un sistema pobremente desarrollado presenta habitualmente un gran número de pequeños manantiales debido a la ausencia de jerarquización en la red de drenaje (esta interpretación se basa en la hipótesis de Mangin (1975), que propone una relación entre la organización jerárquica de la red y el grado de desarrollo del sistema).

¹ <https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/sistema-de-informacion-geografica-de-datos-agrarios/mca.aspx>

3.3.2.2. Método COP (acuíferos kársticos)

El método COP es una herramienta que permite la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de los acuíferos kársticos, fue desarrollado por un grupo de expertos en hidrogeología dentro del marco del proyecto europeo COST Action 620 (1997-2004), titulado *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karstic) aquifers*. El método fue publicado oficialmente en 2004. Este proyecto fue financiado por la Unión Europea en colaboración con varias universidades y centros de investigación europeos. El nombre COP proviene de los tres factores principales que evalúa:

- **Concentración de flujo (C):** evalúa el grado en que el flujo del agua subterránea se encuentra concentrado o disperso, lo que influye en la capacidad de dilución y en la velocidad de transporte de contaminantes.
- **Coberturas (O):** considera la eficacia de las capas superficiales (suelo, sedimentos, rocas) para proteger el acuífero subyacente frente a la infiltración de contaminantes.
- **Precipitación (P):** tiene en cuenta las características de la precipitación en la zona, tanto en términos de cantidad como de intensidad, ya que influyen en el potencial de recarga y en el arrastre de contaminantes.

Estos factores se combinan mediante una metodología cartográfica que permite generar mapas de vulnerabilidad, en los que se identifican zonas con distintos niveles de vulnerabilidad frente a la contaminación. A partir de estos mapas, es posible zonificar los perímetros de protección de captaciones de agua subterránea. El método COP destaca por su enfoque sistemático, reproducible y adaptable.

En la tabla 3.5 se presentan las fuentes recomendadas para obtener los parámetros necesarios para aplicar el método COP en función de la clase de captación que se pretende proteger.

- **Concentración de flujo (C):** se relaciona con las condiciones que controlan en superficie el flujo de agua hacia zonas de infiltración rápida, donde la capacidad de atenuación de contaminantes se ve significativamente reducida. Se pueden distinguir dos escenarios: zonas de recarga a través de sumideros u otros puntos de infiltración concentrada (escenario C1); y el resto del área, donde la infiltración es más difusa (escenario C2).

Los parámetros necesarios para caracterizar las zonas de recarga a través de sumideros son: la distancia a los sumideros (D_h) y la distancia a cursos de agua perdedores (d_s). Este estudio se puede realizar mediante visitas de campo, interpretación de mapas topográficos, fotografía aérea e imágenes de satélite.

Puede ser necesario evaluar los cauces perdedores mediante aforos diferenciales, con el fin de determinar su capacidad de infiltración y relación río-acuífero.

En los escenarios considerados en el cálculo del factor C el parámetro sv depende de la presencia de vegetación y del grado de pendiente del terreno. El estudio de la pendiente se puede realizar mediante un MDT o en base al mapa topográfico si la captación es clase 4. La presencia de vegetación se puede valorar en la visita de campo o mediante análisis de imágenes satélite/cartografía específica.

La evaluación de las características superficiales (sf) en el escenario C2 requiere determinar el grado de desarrollo del Karst de forma similar a como se ha explicado en el método EPIK, y la permeabilidad de las capas superficiales que lo recubren, si las hubiera.

- **Estratos suprayacentes (O):** tiene en cuenta la capacidad de la zona no saturada para filtrar o atenuar la contaminación. Las zonas del área de alimentación que presenten cubierta de protección se deben identificar y separar de las zonas que carecen de ella. Para caracterizar la cubierta protectora es necesario analizar la tipología y espesor del suelo [OS] y el resto de la cobertera

3. Directrices para el dimensionamiento de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas destinadas al consumo humano

Tabla 3.5 Método COP. Recomendaciones acerca del origen de los datos para el cálculo de perímetros de protección.

Atributo		Parámetros	Tipo de captación		
			Clase 1	Clase 2	Clase 3
C1	Dh (VII)	Distancia a sumideros ¹	Campo ² Satélite/Ortofoto Bibliografía/Cartografía		
	Sv (IX)	Pendiente	MDT		MDT Mapa topográfico
	Sv (IX)	Vegetación	Campo ² Satélite Bibliografía/Cartografía		
	Ds (VIII)	Distancia arroyo perdedor	Campo ² Satélite/Ortofoto Cartografía		
C2	Sf (X)	Desarrollo del Karst	Campo ² Satélite/Ortofoto Cartografía geológica Geofísica Métodos complementarios ³		Campo ² Cartografía geológica Ortofoto
	Sf (X)	Capas superficiales	Bibliografía/Cartografía Campo ² Análisis textural Ensayos de permeabilidad ⁴		Bibliografía/Cartografía Campo ² Estimado
	Sv (XI)	Pendiente	MDT		MDT Mapa topográfico
	Sv (XI)	Vegetación	Campo ² Satélite		Campo ² Satélite Bibliografía/Cartografía
O	Os (I)	Textura del suelo	Análisis textural Bibliografía/Cartografía	Análisis textural Bibliografía/Cartografía Estimado	Bibliografía/Cartografía Estimado
	Os (II)	Espesor del suelo	Cata ⁵ / Bibliografía/Cartografía		Bibliografía/Cartografía Estimado
	Ol (III)	Litología y fracturación	Bibliografía/Cartografía Columna sondeos		
	Ol (m)	Espesor	Sondeo/Cata ⁵ /Geofísica		Cata ⁵ / Bibliografía/ Cartografía
	Cn (IV)	Confinamiento	Estudio hidrogeológico		
P	PQ (XIII)	Cantidad Precipitación	Datos AEMET		
	PI (XIV)	Intensidad precipitación			

¹ La relación entre los sumideros y las surgencias se suele establecer mediante ensayos de trazadores, análisis de isopiezas, aforos diferenciales, etc.

² Las campañas de campo son recomendables para resolver dudas que hayan surgido en gabinete. Su duración depende de la complejidad del estudio y de la clase de la captación. Generalmente es suficiente una jornada en casos sencillos.

³ Entre los métodos complementarios se encuentran, por ejemplo, el análisis de hidrogramas, la interpretación de la calidad del agua, ensayos con trazadores, etc.

⁴ Es muy importante valorar la presencia de capas cementadas o costras que pueden reducir drásticamente los valores de permeabilidad.

⁵ El número de sondeos/catas dependerá de la heterogeneidad de la zona en estudio y de la clase a la que pertenece la captación.

[OL]. El componente [OS] se refiere al suelo superficial, mientras que [OL] incluye otros materiales suprayacentes al acuífero.

El subparámetro suelo **Os** se puede caracterizar utilizando mapas de suelos complementado con fotografía aérea e imágenes satélite. En el caso de las captaciones clases 1 y 2, se recomienda realizar análisis texturales para clasificar el suelo según el tamaño de grano (arcilloso, limoso, arenoso). El espesor del suelo se puede obtener a partir de cartografía edáfica o estimarse. No obstante, para captaciones de clases 1 y 2, se recomienda realizar catas.

El subparámetro litología **Ol** puede caracterizarse a partir de columnas litológicas levantadas *in situ* en el caso de captaciones clase 1 ó 2, y a partir de cartografía geológica en captaciones clase 3/4. El espesor preferentemente provendrá de una cata o sondeo, aunque en el caso de captaciones clase 3/4 es aceptable que provengan de cartografía.

El parámetro **Cn** representa la protección del acuífero debido a su nivel de confinamiento. El nivel de confinamiento se establecerá en base al estudio hidrogeológico que ha de considerar factores tales como: la conductividad hidráulica (K) de las formaciones a techo del acuífero, los niveles piezométricos, ensayos de bombeo, química del agua etc.

- **Precipitación (P):** el parámetro P considera la variabilidad espacial y temporal de la precipitación que constituye el principal medio de transporte de contaminantes desde la superficie del terreno al agua subterránea. El parámetro P consta de dos subparámetros: Cantidad [PQ] e intensidad de precipitación [PI], los datos necesarios pueden obtenerse de la Agencia Estatal de Meteorología AEMET.

3.3.2.3. Método DISCO (acuíferos fisurados)

El método DISCO ha sido propuesto y aplicado con éxito por la “Oficina Federal del Medioambiente, los Bosques y el Paisaje (OFEFP)” de Suiza como el método de elección para la delimitación de perímetros de protección en acuíferos fisurados fuertemente heterogéneos. Este enfoque se basa en la cartografía de vulnerabilidad en medios altamente heterogéneos, donde el agua circula rápidamente, del orden de cientos de metros o más al día, a través de redes de fisuras. En estos casos, los tiempos de tránsito no aumentan progresivamente en función de la distancia al punto de captación, y la asimilación del acuífero a un medio continuo homogéneo e isótropo resulta inadecuada.

El objetivo del método es definir las zonas de protección teniendo en cuenta la heterogeneidad del medio. Se basa en una evaluación de la vulnerabilidad intrínseca, considerando los factores geológicos e hidrogeológicos que influyen en el funcionamiento del acuífero fisurado y en el transporte de contaminantes. La evaluación de dos o tres parámetros (discontinuidades, cobertura protectora y, en su caso, escurrimiento) permite caracterizar el transporte de un contaminante desde cualquier punto de la cuenca de alimentación hasta su llegada a la captación. Los parámetros considerados se combinan y ponderan sobre una base cartográfica, lo que permite definir un “factor de protección natural” para cada zona del área de alimentación de la captación. El resultado es la clasificación de cada zona en una de tres categorías: S1, zonas caracterizadas por un factor de protección natural nulo o muy bajo (vulnerabilidad particularmente alta); S2, zonas caracterizadas por un factor de protección natural bajo (vulnerabilidad alta); y S3, zonas caracterizadas por un factor de protección natural medio (vulnerabilidad media). En la tabla 3.6 se recogen los parámetros considerados por el método DISCO y las fuentes de información aceptadas para su valoración.

Discontinuidades (D): este parámetro caracteriza las zonas fracturadas altamente permeables con conexión rápida (de unas pocas horas a unos días) con la captación; se deben localizar las zonas de infiltración preferencial y estudiar las propiedades de esas discontinuidades. El estudio se realiza en el área de alimentación mediante la interpretación de la cartografía geológica e hidrogeológica, observaciones de campo (geología, geomorfología, red hidrográfica), fotografía aérea, y si es necesario mayor precisión (captaciones clase 1) perfiles geofísicos. También es necesario considerar

las características de los diferentes tipos de discontinuidades: extensión, abertura, frecuencia, orientación, colmatación, zonas de infiltración preferente etc., sobre la base de observaciones *in situ*.

Para las captaciones clase 1 y 2 se recomienda emplear métodos complementarios basados en el ensayo de trazadores o el monitoreo de caudales, temperatura y conductividad eléctrica de manantiales durante eventos de precipitación intensa.

Tabla 3.6 Método DISCO. Fuentes de datos recomendadas para la aplicación del Método Disco en función de la clase de captación.

Atributos	Parámetros	Tipo de captación		
		Clase 1	Clase 2	Clase 3/4
D	Discontinuidad	Campo ¹ Cartografía Ortofoto Geofísica Complementarios ²	Campo ¹ Cartografía Ortofoto Complementarios ²	Campo ¹ Cartografía Ortofoto
	Permeabilidad	Análisis textural ³ Ensayos de infiltración Bibliografía		
P	Espesor	Cata ⁴ Geofísica	Cata ⁴	Cata ⁴ Estimado ----- Estimado
	Pendiente	MDT		
E	Red de drenaje	Campo ¹ Satélite/Ortofoto Cartografía		
		MDT ----- Topográfico		

¹ La campaña de campo permitirá resolver dudas que hayan surgido en gabinete, su duración depende de la complejidad del estudio y de la clase de la captación.

² Métodos complementarios como por ejemplo ensayos con trazadores y monitorización QTC.

³ El número de análisis dependerá de la heterogeneidad de la zona en estudio.

⁴ El número de sondeos/catas dependerá de la heterogeneidad de la zona en estudio

Cobertura de protección (P): este parámetro caracteriza la función protectora del suelo y las formaciones geológicas de baja permeabilidad que pueden superponerse al acuífero. Se definen tres clases de suelos en función de su permeabilidad y su espesor a partir de información cartográfica. Cuando existen formaciones geológicas de baja permeabilidad (arcillas, limos y margas) intercaladas entre el suelo y el acuífero, el índice debe ser modificado para tener en cuenta el efecto protector adicional de estas formaciones. Su caracterización se realiza mediante estudios edáficos y geológicos, no obstante, en captaciones clase 1 y 2 puede ser necesario recurrir a análisis texturales.

El espesor de la capa protectora se puede obtener de obras existentes, como zanjas de drenaje, sondeos o catas realizadas exprofeso, dependiendo de la clase a la que pertenezca la captación. Siempre que sea posible son preferibles estas últimas. En algunos casos, el uso de técnicas geofísicas es útil para determinar el espesor y la naturaleza de las formaciones geológicas de baja permeabilidad.

Se pueden emplear ensayos de infiltración para determinar la permeabilidad del material de la cobertura de protección utilizando métodos basados en técnicas como la infiltrometría de cilindro sencillo, de cilindro doble, el método de Müntz, Porchet, Guelph, etc.

Escorrentía (E): este parámetro tiene en cuenta el flujo de agua superficial (escorrentía de laderas, cursos de agua permanentes o temporales), ya que puede inducir el desplazamiento lateral de los contaminantes, decenas de metros en el caso de escorrentía difusa, y centenares de metros a lo largo de canales o drenes naturales (cursos de agua permanentes o temporales,

arroyos, caminos). La escorrentía sólo se analiza aguas arriba en las zonas que presentan un FPI (factor de protección intermedio) bajo o muy bajo y en presencia de escorrentía importante. Para la cartografía de este parámetro se tienen en cuenta la pendiente y la red de drenaje superficial.

El estudio de la red de drenaje en la cuenca de alimentación se puede realizar mediante un reconocimiento del terreno (especialmente durante periodos de intensa precipitación o deshielo), apoyado en cartografía, fotografía aérea e imágenes de satélite. La delimitación de las pendientes críticas de escorrentía para captaciones clase 4 se puede hacer manualmente mediante mapas topográficos (a escala 1:10.000 o 1:5.000), no obstante, si se dispone de un modelo digital del terreno es más sencillo cartografiar estas zonas mediante el uso de un SIG. En el resto de las clases se recomienda utilizar el MDT.

3.3.3. Casos especiales

3.3.3.1. Perímetros de protección de acuíferos superpuestos

Existe la posibilidad de que una captación extraiga agua de varias formaciones acuíferas de diferente naturaleza geológica, superpuestas (figura 3.11). En este caso el diseño del perímetro de protección se complica, siendo necesario recurrir a una estrategia que permita representar en un único perímetro esas formaciones con un comportamiento hidráulico diferente.

El procedimiento recomendado en estos casos es el siguiente:

1. En primer lugar, se calculará de forma independiente el perímetro de cada acuífero mediante el método más adecuado según su naturaleza y el caudal extraído. Se obtendrán zonas independientes una para cada uno de los acuíferos. El caudal extraído de cada acuífero debe estimarse de acuerdo con los conocimientos de los que se disponga tanto de la infraestructura como de los acuíferos concretos explotados, ya que no se puede usar para la formulación el caudal de explotación o el volumen anual total.
2. La zonificación del perímetro resultante resultará de la superposición de las zonas obtenidas en el paso anterior teniendo en cuenta que:
 - Si el acuífero superior tiene naturaleza kárstica o fisurada, la zonificación del perímetro resultante coincidirá con la del acuífero superior.
 - Si el acuífero superior tiene naturaleza detrítica, la zonificación del perímetro resultante corresponderá a la zonificación más restrictiva de cada uno de los perímetros superpuestos.

La lógica de este procedimiento se basa en que cuando un acuífero kárstico superior no es vulnerable tampoco lo será el que se sitúe por debajo pues está protegido por el superior. Al contrario, si en un acuífero superior poroso no se define una isócrona, esto no garantiza que el acuífero subyacente esté protegido. Por lo tanto, si el acuífero inferior es vulnerable, esta zona deberá incluirse con sus restricciones en el perímetro final. En la figura 3.11 se muestran varias representaciones de formaciones acuíferas superpuestas.

Generalmente, cuando una captación atraviesa un acuífero kárstico situado bajo un relleno detrítico, de cualquier espesor, los acuíferos se deben aislar

cementando el espacio anular entre el entubado y la pared del sondeo en su tramo superior.

Cuando la estructura geológica sea aún más compleja que en los casos expuestos en la figura 3.11, y dado que la casuística puede ser muy amplia, el diseño del perímetro requerirá un análisis hidrogeológico detallado, siguiendo la lógica explicada en los párrafos anteriores.

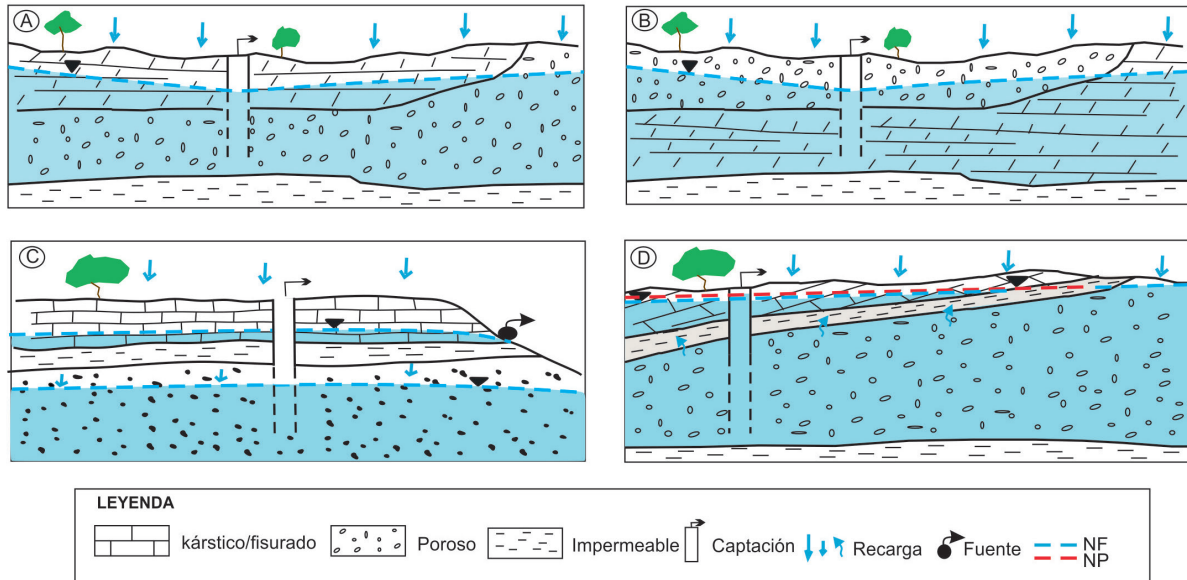


Figura 3.11 Ejemplos de relación entre acuíferos de diferente naturaleza explotados por una misma captación. a) Acuífero kárstico sobre un acuífero poroso, no están separados hidráulicamente. b) Acuífero poroso situado sobre un acuífero kárstico, no están separados hidráulicamente. c) Acuífero kárstico situado sobre un acuífero poroso, ambos son acuíferos libres. d) Acuífero kárstico situado sobre un acuífero poroso separados por un acuitardo. El acuífero poroso, confinado, está en carga en toda su extensión salvo en la zona de alimentación donde es un acuífero libre.

3.3.3.2. Perímetros de protección de fuentes y manantiales

Diseñar perímetros de protección para fuentes y manantiales implica cierta complejidad añadida a la que ya supone proteger pozos y sondeos. Esta complejidad está relacionada con cuestiones como la identificación precisa del área de recarga y la variabilidad hidrológica:

- **Identificación precisa del área de recarga:** resulta difícil delimitar con precisión el origen del agua subterránea que alimenta los manantiales, especialmente en zonas con geología compleja. En áreas con rocas fracturadas, kársticas, suelos volcánicos, o múltiples capas geológicas, el agua puede desplazarse de forma muy irregular y provenir desde lugares lejanos. En estos casos, un mismo manantial puede recibir aguas con tiempos de tránsito muy variables, desde unas pocas horas (recorridos cortos y superficiales) hasta miles de años (recorridos profundos y prolongados). En algunos manantiales esto se detecta fácilmente al comparar la composición del agua en periodo de aguas altas con el periodo de aguas bajas.
- **Variabilidad hidrológica:** tanto la cantidad como la calidad del agua pueden experimentar fluctuaciones significativas a lo largo del año, muchas veces como consecuencia de eventos climáticos extremos. Fenómenos como inundaciones, sequías o deslizamientos pueden modificar los flujos subterráneos y alterar el comportamiento de los manantiales, dificultando así la delimitación del perímetro de protección adecuado.

A continuación, se exponen una serie de aspectos clave que han de ser tenidos en cuenta a la hora de establecer el perímetro de protección de un manantial y que se recomienda contemplar en el informe de propuesta del perímetro:

La topografía: influye tanto en la localización del manantial como en su caudal, estacionalidad y dinámica del acuífero que lo alimenta. Los manantiales pueden encontrarse en diversos entornos geográficos, como laderas de montañas, valles, zonas volcánicas o áreas cercanas a ríos. La configuración del terreno determina la zona de recarga, afecta la dirección del flujo subterráneo, la acumulación de agua en el subsuelo y la presión hidráulica que puede ejercer para emerger en la superficie. Es incorrecto delimitar el área de alimentación de un manantial únicamente en función de la topografía, ya que las cuencas hidrográficas subterráneas y superficiales no coinciden necesariamente (ver figura 3.12). Sin embargo, la zona de recarga de un manantial siempre se sitúa en una posición topográfica superior al punto de surgencia, salvo en casos excepcionales asociados a flujos inducidos por tensiones tectónicas; por esto, la topografía es una herramienta útil para delimitar zonas de recarga alógena en acuíferos kársticos y fisurados, donde el agua proviene de áreas externas al sistema hidrogeológico inmediato.

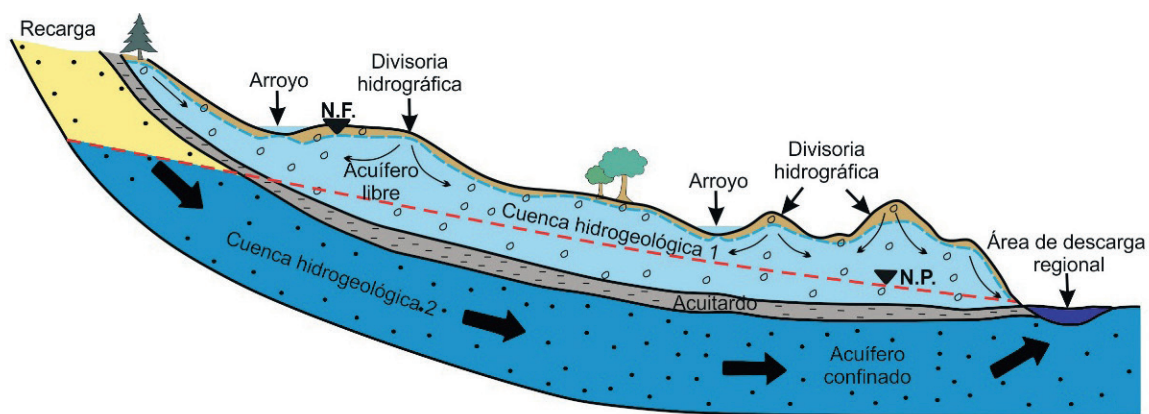


Figura 3.12 La cuenca hidrográfica e hidrogeológica con frecuencia no coincide. En la ilustración se muestra un esquema que representa dos cuencas hidrogeológicas separadas por una capa impermeable que actúa como estructura confinante (acuitardo). La cuenca hidrogeológica 1 se caracteriza por sistemas de flujo local e intermedio, mientras que la cuenca hidrogeológica 2 presenta un flujo regional. Este es un caso en el que el área de una sola cuenca de drenaje corresponde a varias cuencas hidrogeológicas. La línea punteada roja representa la superficie piezométrica del acuífero confinado, mientras que la línea punteada azul representa la del acuífero libre. Modificado de Arraes & Campos, 2007.

- **La fracturación:** las fracturas, fisuras y fallas presentes en las formaciones geológicas juegan un papel fundamental en la alimentación y en la dinámica del flujo subterráneo, especialmente en acuíferos de baja porosidad primaria. Estas discontinuidades pueden actuar como vías preferenciales para la infiltración y conducción del agua, permitiendo que el manantial sea alimentado desde zonas distantes al punto de descarga.
- **Tipo de manantial:** los manantiales pueden clasificarse según su origen, la forma en que emergen del terreno (puntual o difusa) o la presión que tiene el agua en el punto de surgencia. Los manantiales superficiales, cuya agua proviene directamente de la precipitación (lluvia o nieve) o de cuerpos cercanos de agua como ríos, son mucho más vulnerables a la contaminación. En cambio, los manantiales artesianos, en los que el agua emerge de forma natural debido a la presión existente en un acuífero confinado, suelen estar mejor protegidos frente a contaminantes superficiales, aunque no están exentos de riesgo.
- **El tiempo de tránsito del agua subterránea:** en sistemas kársticos, donde el flujo se concentra en conductos bien desarrollados, el tiempo de tránsito puede ser muy corto, lo que implica una mayor vulnerabilidad a la contaminación. La caracterización del tiempo de tránsito puede requerir estudios hidrogeológicos específicos, como ensayos isotópicos o con trazadores.
- **Condiciones climáticas y variabilidad estacional:** el régimen climático y su variabilidad estacional influyen significativamente en la recarga de los acuíferos y, por tanto, en el comportamiento de los manantiales. En manantiales en los cuales la recarga depende principalmente de la lluvia o el deshielo, especialmente los de alta montaña, pueden presentar caudales altamente variables,

con máximos durante la temporada húmeda o de deshielo, y mínimos, e incluso interrupciones, durante las épocas secas. Esta variabilidad afecta no solo la cantidad de agua disponible, sino también su calidad, ya que los eventos de lluvia intensa pueden arrastrar contaminantes desde la superficie hacia el acuífero o remover sedimentos depositados en el interior de los conductos.

- **Variabilidad hidrológica:** a diferencia de los acuíferos detríticos profundos, que presentan velocidades de flujo y niveles piezométricos relativamente estables, los manantiales kársticos se caracterizan por una notable variabilidad hidrológica a lo largo del tiempo. Esta variabilidad complica el análisis de vulnerabilidad del agua subterránea. Aunque una opción es basar los estudios en condiciones hidrológicas promedio, esta estrategia presenta limitaciones importantes, ya que los niveles más altos de contaminación en sistemas kársticos suelen registrarse durante eventos de caudal elevado. Por ello, se recomienda utilizar estas condiciones de caudal alto como referencia para una evaluación más precisa de la vulnerabilidad.
- **Delimitación del área de alimentación:** identificar la zona de alimentación de un manantial suele ser una tarea compleja que requiere la integración de datos topográficos, geológicos, hidrogeológicos e hidrológicos, utilizando una variedad de métodos de investigación, entre ellos el análisis del balance hídrico y los ensayos con trazadores. En el caso de acuíferos kársticos, la zona de recarga alógena comprende zonas que drenan hacia el acuífero, a menudo a través de corrientes superficiales que se infiltran en sumideros y pueden encontrarse a varios kilómetros de distancia del manantial. Estas áreas de alimentación pueden variar en función de las condiciones hidrológicas. Incluso, en algunos casos, los sumideros se transforman en manantiales durante períodos de niveles muy elevados. Con frecuencia la cuenca de un manantial es muy extensa e incluye zonas que contribuyen muy poco a la recarga del acuífero y a la descarga del manantial, (figura 3.13). Puede resultar útil el empleo de superficies piezométricas que permitan “cuartear” el origen del flujo asociado a los manantiales, en el caso que no sean drenajes regionales o de toda la MSBT, de esta forma se puede reducir la superficie del perímetro en base a criterios hidrogeológicos.

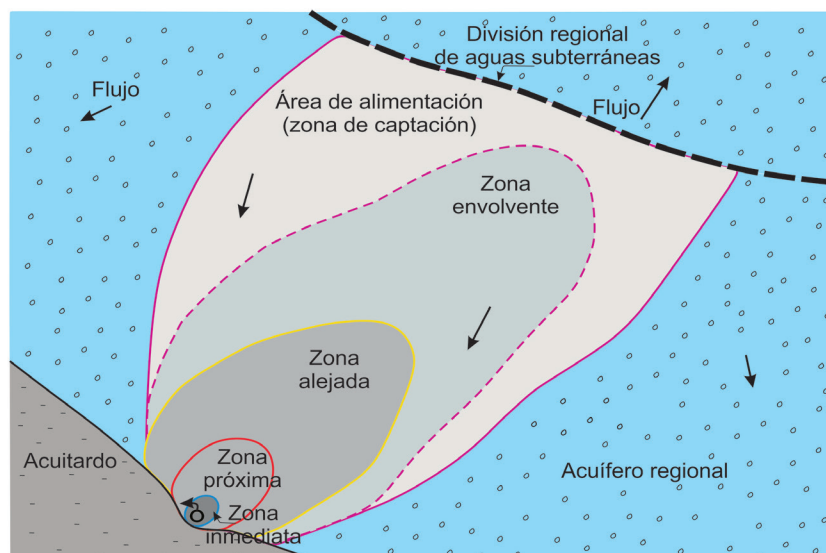


Figura 3.13 Zonificación de un perímetro de protección en un manantial situado en un contacto geológico entre un acuífero y un material menos permeable. La zona envolvente no cubre toda el área de alimentación, pues en este caso la porción situada fuera del área punteada apenas contribuye a su caudal. Modificado de Golscheider, 2010.-

- **Composición química del agua:** proporciona información sobre los acuíferos que contribuyen a la descarga del manantial, la posible afluencia de aguas superficiales, la presencia de procesos de mezcla, la presencia de focos de contaminación y otros aspectos. Además, permite identificar la firma química natural del agua, útil para rastrear su origen, el tiempo de residencia y las interacciones con las formaciones geológicas a lo largo del flujo subterráneo.

- **Presencia de contaminantes en el agua:** los niveles de contaminantes en el agua de manantial suelen ser muy variables, incrementándose en respuesta a precipitaciones intensas. La monitorización continua de los parámetros como el carbono orgánico total y la turbidez puede utilizarse como un sistema de “alerta temprana” de la contaminación microbiana que puede mejorarse aún más con mediciones de la distribución del tamaño de las partículas.
- **Metales y contaminantes persistentes:** estos contaminantes, generalmente poco solubles, son menos frecuentes en las aguas subterráneas, sin embargo, en los sistemas kársticos, los sedimentos de los conductos y cuevas pueden actuar como depósitos de metales tóxicos y otros contaminantes y durante eventos de alto flujo pueden ser movilizados y conducidos hacia los manantiales.

Como se puede deducir de lo expuesto en los párrafos anteriores, con frecuencia, son precisos estudios hidrogeológicos complejos y, en muchos casos, costosos, que pueden incluir el uso de trazadores químicos (figura 3.14), perforaciones exploratorias y modelación del subsuelo.

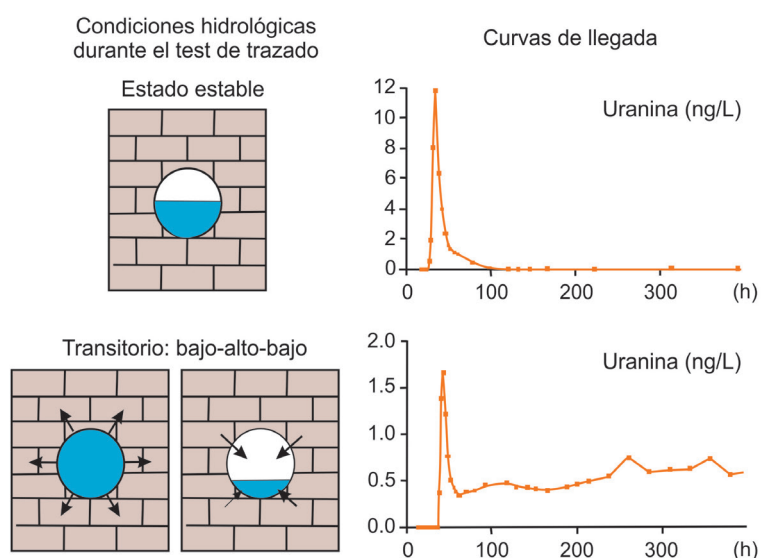


Figura 3.14 Curvas de llegada de dos ensayos de trazadores con uranina, monitoreadas en el mismo manantial kárstico, pero realizadas en diferentes condiciones hidrológicas. En condiciones de flujo transitorio, la curva de llegada del trazador muestra un pico corto pero una cola muy larga, lo que indica que los acuíferos kársticos no siempre son sistemas de descarga rápida. Debido al almacenamiento intermedio, incluso una liberación accidental de contaminantes a corto plazo puede causar contaminación a largo plazo del manantial. (Modificado de Goldscheider, 2005a).

En general, los perímetros de protección de manantiales se dimensionan en base a criterios de vulnerabilidad más o menos elaborados, según el grado de conocimiento disponible y las características del acuífero. Por ejemplo, en Suiza, las zonas de protección de manantiales kársticos se delimitan utilizando el método EPIK, aunque autores como Ravbar y Goldscheider (2007) proponen aproximaciones mucho más elaboradas. Este tipo de análisis, aplicado en manantiales kársticos en Eslovenia, representa la interpretación más compleja del enfoque europeo, e incluye métodos detallados de cartografía de la vulnerabilidad de los recursos y fuentes de agua subterránea.

En cualquier caso, para los manantiales situados sobre sistemas kársticos o fracturados se mantiene la recomendación de emplear, principalmente, criterios de vulnerabilidad para el diseño de sus perímetros de protección. Deberá analizarse tanto la vulnerabilidad del acuífero, mediante los procedimientos recomendados, como la vulnerabilidad del propio manantial. Las dimensiones y zonificación del perímetro deben ser ajustadas a la dinámica del manantial mediante una interpretación cuidadosa de los hidrogramas y, si es posible, mediante herramientas más complejas como el uso de trazadores o estudios isotópicos, entre otros.

En el caso de manantiales situados sobre formaciones porosas, puede ser adecuado delimitar el perímetro de protección mediante un enfoque basado en criterios de vulnerabilidad y tiempo de tránsito combinados. El análisis de vulnerabilidad de acuíferos porosos puede abordarse adaptando

el método COP a este tipo de formaciones o aplicando el método DRASTIC. A pesar de sus limitaciones, DRASTIC ha sido ampliamente utilizado debido a su sencillez. En general, se recomienda su uso únicamente cuando no sea posible la aplicación de alguno de los otros métodos propuestos. Este tipo de análisis puede complementar la aplicación de modelos numéricos, que son el método de referencia, en el caso de captaciones de clase 1 sobre acuíferos detríticos.

El método DRASTIC fue desarrollado por Aller et al (1987) para la EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos). Al contrario que otros métodos de vulnerabilidad DRASTIC no ha sido diseñado específicamente para el diseño de perímetros de protección sino para la cartografía de vulnerabilidad en acuíferos detríticos.

DRASTIC proporciona valores de vulnerabilidad intrínseca. Se trata de un método aditivo en el que se evalúan y ponderan siete parámetros:

D: depth	Profundidad del agua subterránea.
R: recharge	Recarga neta.
A: aquifer	Litología del acuífero.
S: soil	Tipo de suelo.
T: topography	Topografía.
I: impact	Naturaleza de la zona no saturada.
C: hydraulic conductivity	Conductividad hidráulica del acuífero.

A cada parámetro se le asigna un valor entre 1 y 10 y se le aplica un factor de ponderación asignando un peso entre 1 y 5. El valor DRASTIC se obtiene a través de la expresión:

$$\text{DRASTIC} = (Dr \cdot Dw) + (Rr \cdot Rw) + (Ar \cdot Aw) + (Sr \cdot Sw) + (Tr \cdot Tw) + (Ir \cdot Iw) + (Cr \cdot Cw)$$

r: indica la valoración del parámetro.

w: indica el valor del factor de ponderación.

En los índices DRASTIC, la vulnerabilidad aumenta a medida que lo hace el valor del índice. Estos pueden variar en un intervalo de entre 23 y 230 para el índice general y entre 26 y 260 para el agrícola. El rango de valores más frecuente se sitúa entre 50 y 200.

En conclusión, el diseño de los perímetros de protección de manantiales deberá tener en cuenta las particularidades propias de este tipo de captaciones, empleando, cuando sea necesario, criterios de vulnerabilidad y tiempos de tránsito de forma conjunta, independientemente del tipo de captación.

3.3.3.3. Perímetros de protección de galerías de captación

Como se ha expuesto en anteriores apartados, las galerías constituyen un método de captación de agua subterránea ampliamente utilizado en determinados contextos hidrogeológicos, especialmente cuando el nivel freático se encuentra a poca profundidad. Las galerías presentan ventajas significativas en comparación con otros métodos de captación, principalmente en épocas o lugares donde no se dispone de medios técnicos avanzados para la perforación de sondeos profundos. Este tipo de obras permite el flujo del agua hacia el punto de alumbramiento por gravedad, eliminando la necesidad de bombeo mecánico y, por tanto, reduciendo el consumo energético y los costos operativos. Por otra parte, en zonas áridas se evitan las pérdidas por evaporación y se protege el agua de la contaminación directa que podría suceder en conducciones superficiales abiertas.

En España el uso de galerías se conoce en prácticamente todas las regiones, aunque se encuentra especialmente extendido en el archipiélago de las islas Canarias. Esto se debe tanto a sus características morfológicas y geológicas, como a la escasez de recursos hídricos superficiales. Las galerías han desempeñado un papel crucial en el abastecimiento de agua, tanto para consumo humano como para riego agrícola desde finales del siglo XIX hasta la actualidad. Su proliferación ha dado lugar a una densa red de infraestructuras hidráulicas subterráneas, particularmente notable en islas como Tenerife y La Palma. Se puede consultar un detallado estudio sobre la tipología, distribución y uso de galerías como sistema de captación de agua en la obra de Hermosilla et al. (Hermosilla et al. 2008).

El diseño de los perímetros de protección para galerías presenta particularidades derivadas de sus propias características constructivas: son obras de trazado horizontal o subhorizontal, generalmente

someras, con longitudes variables y recorridos frecuentemente irregulares. Estas infraestructuras presentan una gran diversidad de esquemas constructivos (ver la figura 3.15) como en los sistemas de captación asociados (pozos, drenes, lumbreras etc.), lo que añade complejidad a la definición de los perímetros de protección.

Las galerías pueden captar agua a lo largo de todo su recorrido, que puede ser de varios kilómetros. Se trata generalmente de agua de corto tiempo de tránsito proveniente de la infiltración directa reciente o del agua situada en la posición más somera de los acuíferos. Sin embargo, esta norma con frecuencia no se cumple, existen numerosos ejemplos de galerías, particularmente entre las situadas en las islas Canarias, en las que se captan aguas con tiempos de residencia muy prolongados.

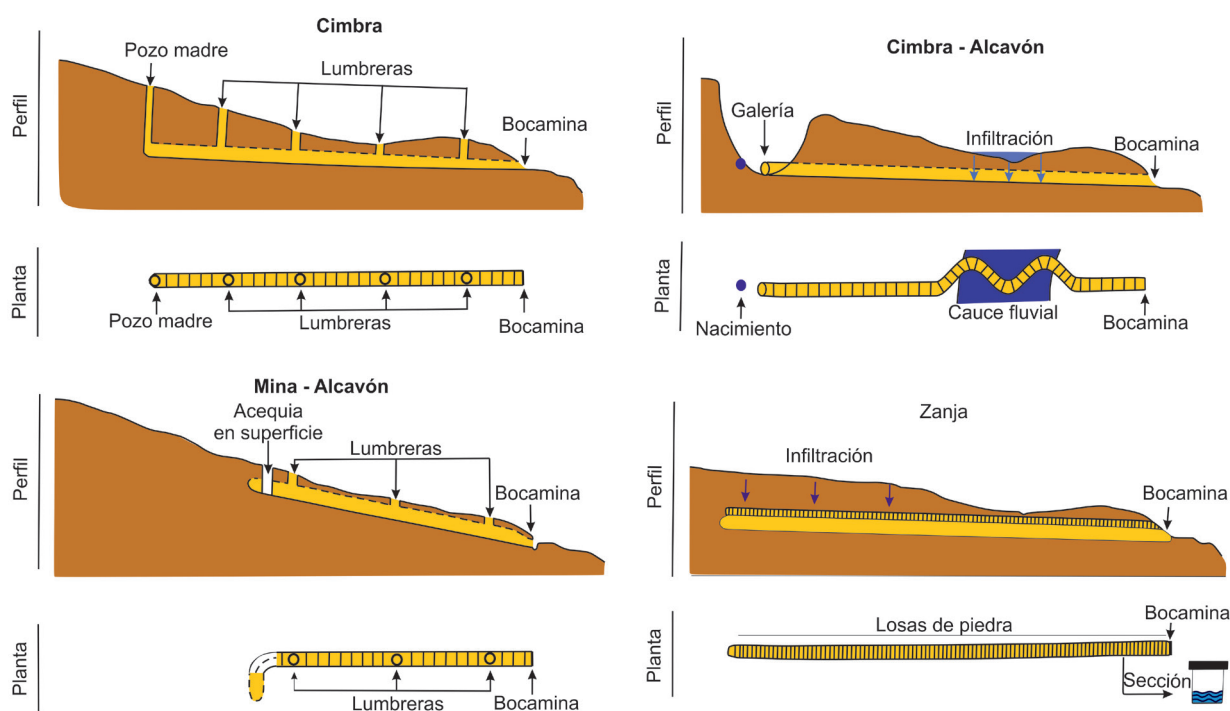


Figura 3.15 Algunos ejemplos de tipos constructivos tradicionales de galerías de captación de aguas subterráneas. Modificado de Hermosilla *et al.* 2008. En la actualidad, con el avance en las técnicas de perforación y equipamiento de sondeos, este tipo de captaciones prácticamente han desaparecido salvo en las islas Canarias donde siguen siendo muy habituales.

Salvo en casos excepcionales, delimitar perímetros de galerías basados en criterios de tiempo de tránsito presenta gran dificultad. En su lugar es preferible aplicar criterios de vulnerabilidad intrínseca, teniendo en cuenta los siguientes aspectos, entre otros:

- Si la función de la galería es exclusivamente transportar agua hasta la captación, el perímetro se diseñará para el punto de captación, según su naturaleza y población abastecida. De ser necesario, por ejemplo, si el techo de la galería no es impermeable, la traza de la galería se protegerá como parte del sistema de captación.
- Si la galería tiene como función captar agua a lo largo de su recorrido, además de transportarla, el perímetro se diseñará de forma que:
 - La zona inmediata, o de restricciones absolutas, incluya la vertical de la traza de la galería, extendiéndose al menos 25 metros a ambos lados de la misma.
 - El resto de las zonas se diseñarán con criterios de vulnerabilidad.
- Si la galería tiene asociados pozos de captación, o pozos de almacenamiento que aportan caudal al de la propia galería, se diseñarán los perímetros correspondientes a cada una de las obras y el perímetro resultará de la suma de todos los perímetros parciales.

3.3.3.4. Perímetros de protección en acuíferos confinados o semiconfinados

En la práctica, la presencia de acuíferos totalmente confinados es poco frecuente, ya que la mayoría de las estructuras confinantes no son totalmente impermeables y además presentan algún grado de heterogeneidad o discontinuidad. Por tanto, en muchos casos, los acuíferos clasificados como confinados muestran características más cercanas a las de los acuíferos semiconfinados, pudiendo permitir cierto grado de recarga vertical a través de la capa superior, mediante procesos de filtración lenta.

Al dimensionar perímetros de protección en acuíferos confinados deben considerarse ciertas particularidades propias de formaciones en las que el agua se encuentra a presión:

- Debido a su estructura, los acuíferos confinados presentan, de forma natural, una vulnerabilidad reducida frente a la contaminación. Esto se debe a que están cubiertos por capas de baja permeabilidad (como arcillas o limos), que los aíslan de la superficie y dificultan la infiltración de contaminantes, además, el agua a presión dificulta e incluso puede impedir la entrada de contaminantes. Aunque esta protección natural disminuye la vulnerabilidad, no la elimina por completo.
- La zona principal de recarga puede hallarse a varios kilómetros de distancia de la captación, en un punto donde el acuífero pierde su carácter confinado y el agua se infiltra desde la superficie hasta alcanzar la zona saturada. Los acuíferos semiconfinados pueden recargarse verticalmente, esto depende de las propiedades físicas y geométricas del acuitardo situado a techo, de la diferencia de potencial hidráulico entre los acuíferos superpuestos (figura 3.16), y de la continuidad areal y litológica del confinante pues los cambios de facies² pueden modificar significativamente su capacidad para transmitir agua (figura 3.17). En este tipo de formaciones debe realizarse un seguimiento periódico de la evolución espacial y temporal de los potenciales hidráulicos.
- Cuando la relación de carga entre el acuífero superior libre y el acuífero semiconfinado es favorable al acuífero superior se produce la recarga del acuífero semiconfinado; por el contrario, si es favorable al semiconfinado inferior, se produce una descarga de este. El acuífero semiconfinado solo puede contaminarse a partir del libre en las zonas de recarga, pero no en el de descarga (figura 3.16).
- Una forma de determinar la transmisividad de estas formaciones es mediante ensayos hidráulicos, aunque pueden arrojar valores superiores a los reales. Un método más representativo consiste en comparar los niveles de la capa freática con la piezometría del acuífero semiconfinado generando un mapa residual que refleje las diferencias de potencial hidráulico entre ambos. A partir de este mapa y conociendo el flujo vertical a través del acuífero parcialmente confinado, es posible estimar el valor de T (Auge, 1986). Según este autor, un acuífero semiconfinado presenta una vulnerabilidad baja cuando el potencial hidráulico del semiconfinado es mayor que el del acuífero libre, y cuando la transmisividad del acuitardo es inferior de 10^{-5} l/día.
- Por último, la extracción de agua del acuífero semiconfinado puede alterar la relación hidráulica natural generando una sobrecarga hidráulica del acuífero libre en sectores donde antes no existía. Esta nueva configuración favorece la filtración vertical descendente y, por tanto, incrementa la vulnerabilidad del acuífero semiconfinado al facilitar la entrada de contaminantes desde el acuífero superior (figura 3.16).

² **Facies:** conjunto de rasgos litológicos y paleontológicos de una unidad sedimentaria. El cambio de facies es la variación lateral o vertical de estos rasgos, reflejando cambios en el ambiente deposicional y en sus propiedades hidrogeológicas.

3. Directrices para el dimensionamiento de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas destinadas al consumo humano

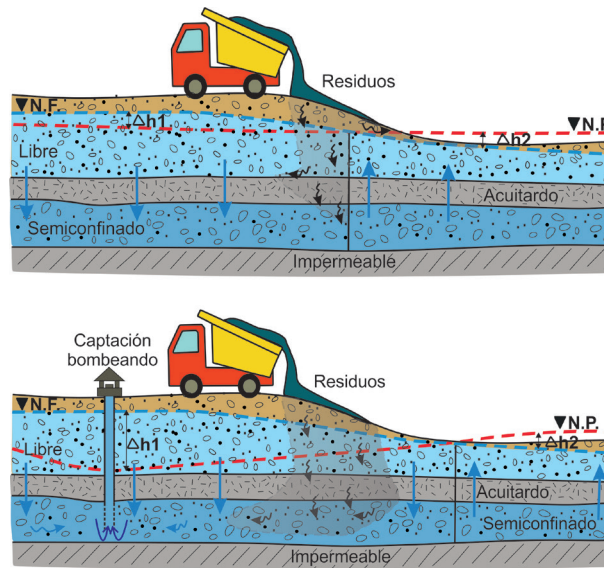


Figura 3.16 Imagen superior: Relación hidráulica natural entre el acuífero libre superior y el acuífero semiconfinado inferior. Se observan zonas de recarga y descarga en acuífero semiconfinado (flechas azules). La extracción de agua, como se muestra en la imagen inferior, ha alterado esta relación hidráulica natural, generando una sobrecarga del acuífero libre hacia el acuífero semiconfinado inferior en sectores donde antes no existía. Esta modificación ha provocado una expansión de la contaminación

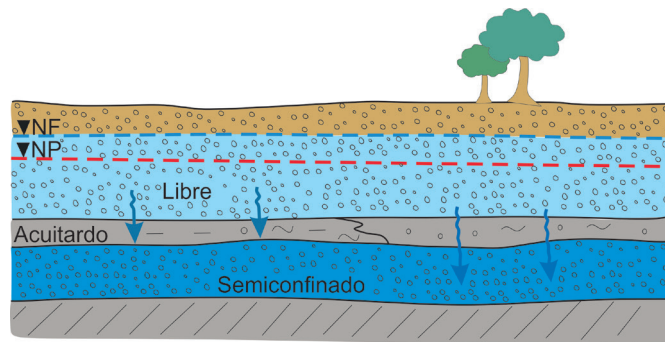


Figura 3.17 Flujo a través del acuitardo por variación de la transmisividad vertical. Un cambio de facies en el acuitardo provoca un aumento de la transmisividad hacia la derecha, lo cual se traduce en un incremento de la transferencia de flujo, representado mediante el tamaño de las flechas azules.

Cuando el acuífero deja de estar en carga, por ejemplo, debido a un exceso de bombeo que reduce el nivel del agua por debajo de la formación confinante, la vulnerabilidad a la contaminación puede incrementarse de forma notable (ver figura 3.18). Dependiendo de la naturaleza de las capas superiores, aunque sean de baja permeabilidad, si su extensión es considerable, el volumen de agua cedida puede no ser despreciable.

3. Directrices para el dimensionamiento de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas destinadas al consumo humano

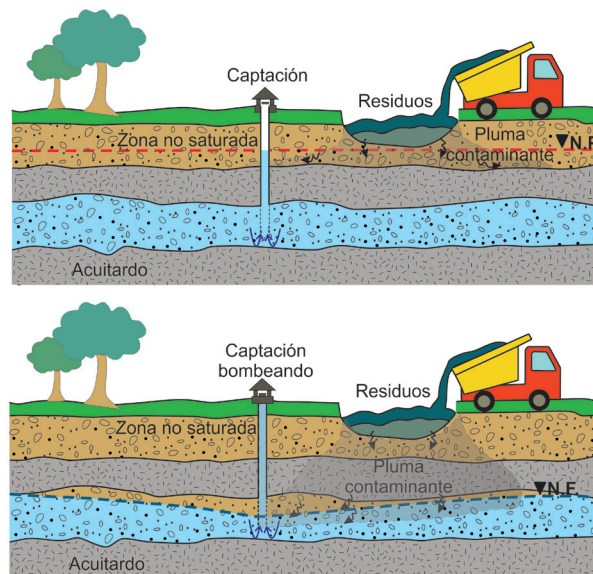


Figura 3.18 Acuífero confinado profundo con una formación confinante de baja permeabilidad situada a techo. Figura superior, el agua está a presión e impide la entrada de contaminantes. Figura inferior, el exceso de explotación ha transformado el acuífero, que pasa de estar en carga a ser un acuífero libre, aumentando notablemente su vulnerabilidad a la contaminación.

Los potenciales hidráulicos pueden variar no solo por causas artificiales, como la extracción de agua, sino también por causas naturales como los períodos de exceso o déficit de recarga, llegando incluso a modificar el sentido del flujo vertical.

Al analizar la protección frente a la contaminación en estos acuíferos, debe prestarse especial atención a la identificación y caracterización de las zonas de recarga, así como a la monitorización de la evolución de los niveles piezométricos, con el fin de prever situaciones en las que el sistema pueda comportarse como un acuífero libre o, aun manteniendo su condición semiconfinada, cuando la relación hidráulica con el acuífero libre superior resulte desfavorable.

Desde el punto de vista del diseño de los perímetros de protección, la principal diferencia entre un acuífero libre y uno confinado o semiconfinado no radica en su comportamiento hidráulico —pues ambos responden a las mismas leyes hidrodinámicas y, si se desarrollan sobre formaciones porosas, en ambos casos es aplicable la ley de Darcy—, sino en que, en los acuíferos libres, la carga hidráulica corresponde a la elevación del nivel freático, mientras que en los acuíferos confinados se corresponde con el nivel piezométrico.

Al considerar el confinamiento del acuífero, es fundamental asegurar la continuidad de la capa confinante, verificar que el acuífero confinado o semiconfinado se mantenga en condiciones de carga, y que la relación hidráulica con el acuífero libre sea favorable para el funcionamiento del sistema confiando o semiconfinado. Estos factores son clave para garantizar la protección del acuífero, evitar flujos no deseados y prevenir la propagación de contaminantes.

En la práctica, los acuíferos libres suelen presentar una mayor conductividad hidráulica, una porosidad eficaz más elevada y un flujo que no está limitado por capas confinantes. Custodio y Llamas (1983) señalan que los acuíferos libres presentan, por lo general, conductividades hidráulicas del orden de 10^{-4} a 10^{-2} m/s, mientras que en los acuíferos confinados estos valores se reducen a entre 10^{-6} y 10^{-4} m/s. Esto implica que, típicamente, la velocidad del agua en los acuíferos libres es uno o dos órdenes de magnitud mayor que en los confinados.

A pesar de su diferente comportamiento, la metodología para el diseño de perímetros de protección en acuíferos porosos confinados no debe diferir de la empleada en acuíferos libres, siempre que los parámetros hidrogeológicos se ajusten adecuadamente. En ocasiones, las isócronas en ambos tipos de acuíferos se extienden a grandes distancias. Es al adaptar la zonificación teórica a la zonificación

práctica cuando pueden revisarse las dimensiones de las zonas propuestas, aplicando criterios de vulnerabilidad.

Dadas las características particulares de los acuíferos confinados, que cuentan con una protección natural frente a la contaminación, es aceptable ajustar las dimensiones de las zonas mediante métodos específicos de vulnerabilidad para acuíferos porosos como DRASTIC, en el caso de captaciones de clase 2 o 3/4.

En el caso del diseño de perímetros de protección para captaciones situadas sobre acuíferos kársticos confinados, el razonamiento para seleccionar el método de diseño no difiere del aplicado a acuíferos libres, y la zonificación debe basarse en criterios de vulnerabilidad intrínseca de la formación. Métodos como el COP, uno de los propuestos en esta guía, tienen en cuenta, en el factor O, la presencia de confinamiento.

3.3.3.5. Perímetros de protección de captaciones próximas

Cuando las captaciones que se pretende proteger se encuentran muy próximas se pueden hacer algunas simplificaciones en el diseño del perímetro. En el caso de acuíferos porosos existen tres posibles situaciones (figura 3.19):

- a) Las captaciones individuales están separadas a una distancia tal que sus áreas de alimentación son independientes y no se solapan. En este caso el perímetro final del sistema será la suma de los perímetros de cada una de las captaciones diseñados individualmente (figura 3.19 a).

En el caso de PPCSb complejos, con varios sondeos separados y caudales de extracción elevados, las soluciones presentadas en este apartado pueden ser insuficientes siendo necesario recurrir a la modelación numérica para resolver la forma que toman las isócronas al interaccionar los conos de bombeo de las diferentes captaciones. Estrictamente hablando, estos perímetros se pueden resolver de forma exacta superponiendo las soluciones de cada una de las captaciones individuales, siempre que el problema

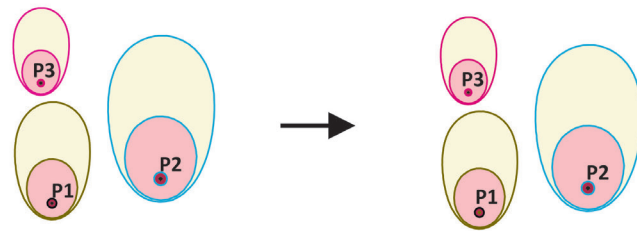
de flujo y transporte resuelto para aproximar las isócronas sea lineal. La ecuación que gobierna el flujo de un acuífero es lineal si este es confinado o si los descensos del nivel freático son pequeños en relación con el espesor saturado medio, condición que se cumple en la mayoría de los casos prácticos. En caso contrario, la resolución del problema, no lineal, debe llevarse a cabo mediante modelos de flujo que permita aproximar el efecto de las interacciones entre los diferentes pozos.

- b) Las captaciones se sitúan sobre el mismo acuífero separadas por una distancia menor a diez días de tiempo de tránsito. En este caso se puede calcular un único perímetro tomando como referencia la captación situada aguas abajo del sistema y asignando a este punto el total del caudal extraído. El espesor saturado empleado en los cálculos será el correspondiente a la captación con menor penetración en el acuífero. Las zonas de restricciones máximas y absolutas resultarán de la unión, en cada caso, de todas las zonas de protección máxima calculadas/absoluta de forma individual (figura 3.19 b).

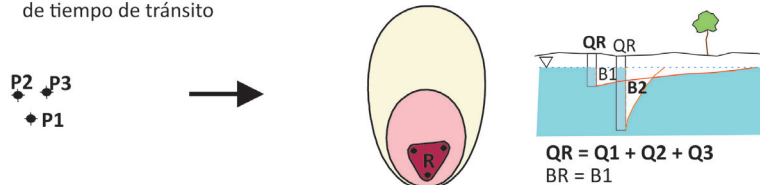
- c) Las captaciones aprovechan el mismo acuífero y la distancia entre ellas es mayor a diez días de tiempo de tránsito, o las captaciones aprovechan diferentes acuíferos. En este caso se calcula el perímetro para cada una de las captaciones de forma individual. Se propondrá un perímetro conjunto resultado de la coalescencia de las zonas que se solapan. Las zonas que no se solapan se mantienen independientes (figura 3.19 c). En el dimensionamiento del perímetro de protección es importante considerar la modificación en los límites del área de alimentación como consecuencia de la influencia entre las captaciones.

SISTEMA DE CAPTACIÓN EN ACUÍFEROS POROSOS

Caso a) captaciones individuales

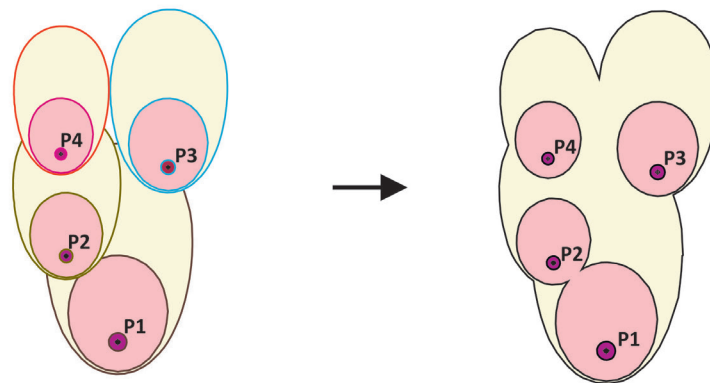


Caso b) captaciones que aprovechan el mismo acuífero y la distancia entre ellas es menor a 10 días de tiempo de tránsito



Caso c) - captaciones que aprovechan el mismo acuífero y la distancia entre ellas es mayor a 10 días de tiempo de tránsito

- captaciones que aprovechan diferente acuífero



◆ Captación (P)
◆ Captación de referencia (R)
 QR = Caudal resultante
 BR = Espesor resultante

ZONAS DE P. DE PROTECCIÓN:
● Zona inmediata
● Zona próxima
○ Zona alejada

Figura 3.19 Esquema que muestra la lógica de diseño de los perímetros de protección cuando se trata de proteger varias captaciones situadas muy próximas y se sitúan sobre un acuífero poroso.

En el caso de perímetros de protección de acuíferos confinados, puede suceder que el área de alimentación (ver apartado 2.1) se sitúe alejada de la captación, donde el acuífero se comporta como libre y puede recargarse directamente por infiltración del agua de precipitación o desde cuerpos de agua superficiales.

En el caso de que el sistema de captaciones esté situado sobre un acuífero kárstico o fisurado se consideran dos situaciones (figura 3.20):

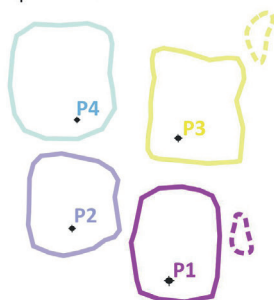
- Que las áreas de alimentación de las captaciones individuales sean independientes. En este caso para cada captación se establecerá un perímetro independiente (figura 3.20 a).
- Que las áreas de alimentación de las captaciones individuales se solapen total o parcialmente. En este caso se podrá establecer un área de alimentación única y definir conjuntamente las zonas de

vulnerabilidad mediante el método más adecuado. Para el cálculo de vulnerabilidad y la zonificación, se considerará un caudal de extracción único correspondiente al caudal total del sistema de captación (figura 3.20 b).

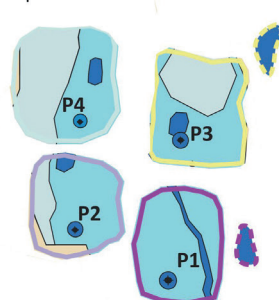
SISTEMA DE CAPTACIONES EN ACUÍFEROS KÁRSTICOS O FISURADOS

Caso a) las áreas de alimentación de las captaciones individuales son independientes

1º) Áreas de alimentación independientes

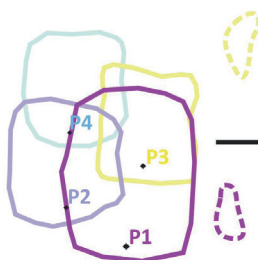


2º) Análisis de la vulnerabilidad de cada área aplicando el método adecuado

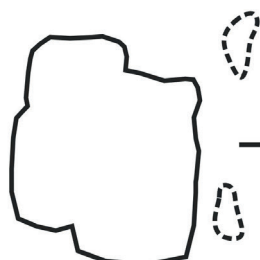


Caso b) las áreas de alimentación de las captaciones individuales se solapan y las captaciones captan el mismo tipo de acuífero

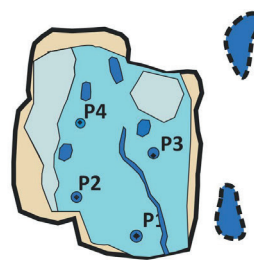
1º) Áreas de alimentación se solapan



2º) Coalescencia de áreas de alimentación



3º) Análisis de la vulnerabilidad, aplicando método adecuado



ZONAS DE PERÍMETROS DE PROTECCIÓN:

- Zona inmediata: mínimo 25 m
Equivalente a S1 / Vulnerabilidad muy alta
- Zona próxima: equivalente a S2
- Zona alejada: equivalente a S3
- Resto de área de alimentación

Figura 3.20 Esquema que muestra la lógica de diseño de los perímetros de protección cuando se trata de proteger varias captaciones situadas muy próximas que se sitúan sobre un acuífero kárstico o fisurado. Se representan zonas alejadas de la captación, conectadas hidráulicamente de forma preferente con ella, generalmente ligadas a dolinas. Estas zonas forman parte del perímetro, aunque no tengan continuidad física con el cuerpo principal del mismo.

3.3.4. Ajuste del perímetro al modelo conceptual y zonificación práctica

Las dimensiones, la orientación y las demás características de las zonas que conforman un perímetro de protección deben ser coherentes con el modelo conceptual de funcionamiento del acuífero, respetando las particularidades geológicas, hidrogeológicas, topográficas, climáticas y de uso del suelo del entorno donde se localiza la captación. Asimismo, deben considerarse las fuentes de recarga y de descarga, la relación con otras masas de agua y las actividades potencialmente contaminante desarrolladas en su superficie.

Para conseguir dicha coherencia con frecuencia debe modificarse la forma de las zonas que forman el perímetro. En la figura 3.21 se muestra gráficamente esta idea. Entre los factores que con frecuencia modifican la zonificación teórica, ya sea ampliando o reduciendo su extensión pueden citarse:

- Presencia de estructuras geológicas como fallas, fracturas visibles o inferidas, pliegues o diaclasas que pueden actuar como barreras o vías preferentes de flujo, alterando la trayectoria del agua.
- Cambios en la litología o contacto con formaciones de diferente permeabilidad que pueden modificar la dirección y velocidad del flujo subterráneo.
- Presencia de barreras hidrogeológicas, o formaciones de baja permeabilidad que pueden limitar o desviar el flujo de agua hacia o desde la captación.
- Variaciones en el gradiente hidráulico.
- Variaciones en el espesor saturado del acuífero, modifican la cantidad de agua almacenada.
- Pérdida del carácter confinado del acuífero que modifica su vulnerabilidad a la contaminación.
- Variaciones en la topografía, las pendientes pronunciadas favorecen la escorrentía y disminuyen la infiltración, mientras que las zonas elevadas suelen ser áreas de recarga.
- Las divisorias de aguas superficiales pueden no coincidir con los límites del acuífero, pero afectan su recarga.
- Presencia de depresiones o sumideros en terrenos kársticos, suelen actuar como puntos de entrada directa al sistema subterráneo.
- Conexión de la captación con cuerpos de agua superficiales, incluyendo, entre otros, los casos de ríos perdedores o de situaciones de recarga inducida por el bombeo de la captación. Esta conexión puede requerir que el perímetro de protección incluya este cuerpo de agua, ya que constituye una vía rápida de entrada de contaminantes al acuífero.
- Presencia de medios muy heterogéneos o anisótropos que dificultan notablemente predecir la forma en la que el agua se va a mover a su través.

3. Directrices para el dimensionamiento de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas destinadas al consumo humano

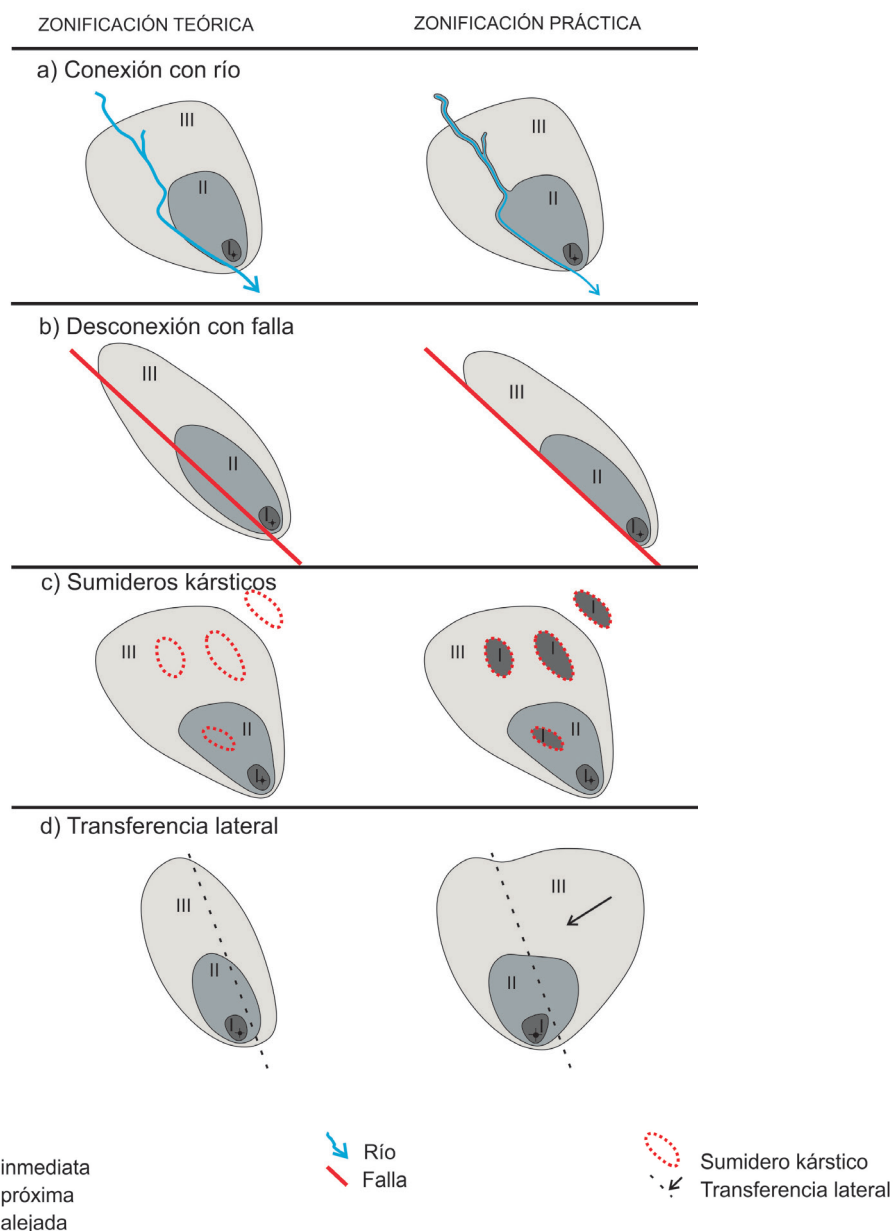


Figura 3.21 Ejemplos de cuestiones a considerar en la etapa de ajuste del perímetro teórico al perímetro práctico en coherencia con el modelo conceptual del acuífero: a) Extensión de la zona de restricciones moderadas debido a la conexión directa con un río perdedor. b) Influencia de una falla que desconecta dos sectores. c) Presencia de sumideros kársticos que constituyen vías preferenciales de acceso del agua al acuífero a proteger. d) Transferencia lateral entre acuíferos contiguos.

En algunos casos, las zonas teóricas de protección pueden ampliarse a las respectivas cuencas vertientes, teniendo en cuenta que el tiempo de tránsito por escorrentía hacia aquellas zonas de protección es despreciable respecto al tiempo de tránsito por flujo subterráneo en las mismas.

Es posible eliminar de las zonas teóricas áreas protegidas por materiales impermeables o de muy baja permeabilidad si se demuestra que proporcionan una protección suficiente.

3.3.5. Tabla de equivalencias

Los métodos de diseño de perímetros de protección basados en el cálculo del tiempo de tránsito se fundamentan en la estimación de un parámetro cuantificable y objetivo: el tiempo durante el cual la contaminación biodegradable permanece en contacto con la matriz del acuífero, permitiendo que los procesos naturales de depuración o atenuación actúen. Por su parte, los métodos basados en el análisis de la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación —utilizados en acuíferos kársticos o fisurados— se apoyan en la delimitación de áreas de vulnerabilidad estimada de forma semicuantitativa, las cuales generalmente no consideran de manera directa el tiempo de tránsito.

Tanto en las zonas delimitadas mediante isócronas que proporcionan los primeros métodos, como en aquellas clasificadas según el nivel de vulnerabilidad del segundo grupo de métodos, es necesario restringir las actividades potencialmente contaminantes, conforme a lo establecido en el RDPH. En la tabla 3.7 se presentan las equivalencias entre la zonificación establecida por la norma y la obtenida mediante los distintos métodos de dimensionamiento. En la figura 3.22 se representa esquemáticamente las zonas en las que se definen las restricciones de actividad al diseñar un perímetro de protección.

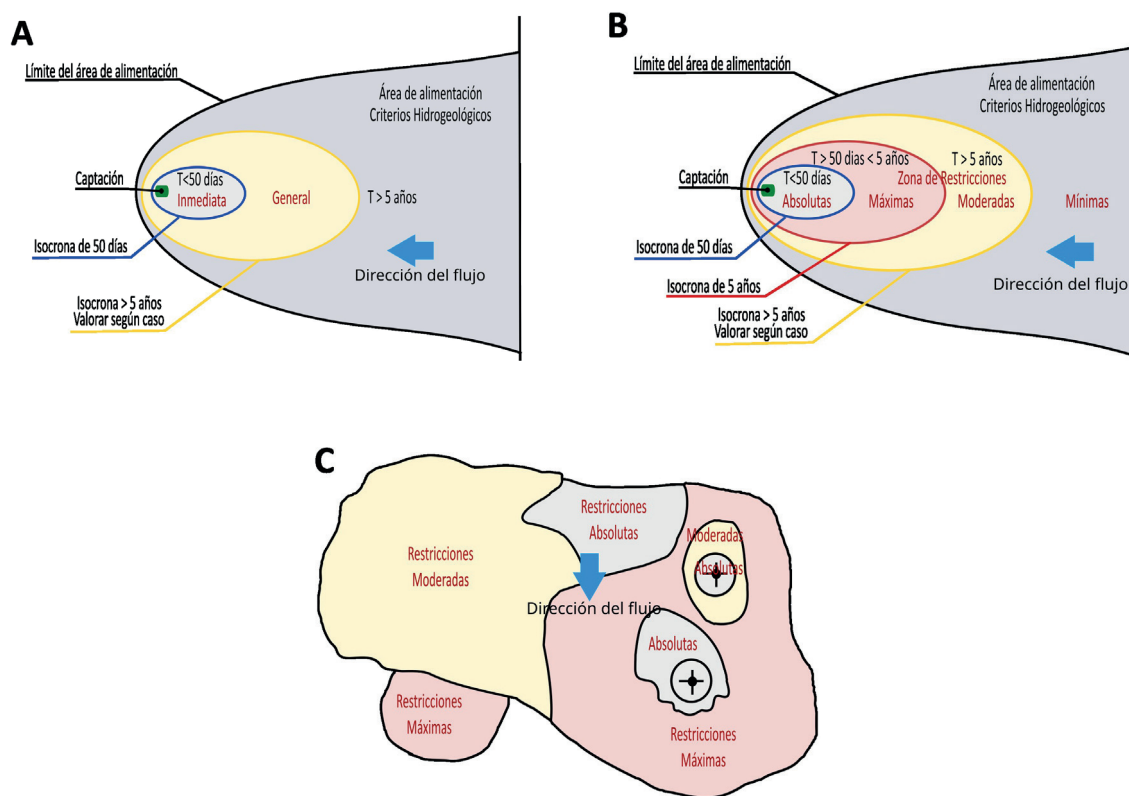


Figura 3.22 Representación esquemática de la zonificación de los perímetros de protección según la población abastecida, caudal extraído y tipo de acuífero. **A)** Acuífero detrítico o asimilable, población inferior o igual a 50.000 habitantes y caudal de extracción $\leq 10.000 \text{ m}^3/\text{día}$. Definición de las zonas de restricción en función de las isócronas. **B)** Acuífero detrítico o asimilable, población > 50.000 habitantes o caudal de extracción $> 10.000 \text{ m}^3/\text{día}$. Definición de las zonas de restricción en función de las isócronas. **C)** Acuífero kárstico o fisurado. Definición de las zonas de restricción de actividades en función del análisis de vulnerabilidad.

3. Directrices para el dimensionamiento de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas destinadas al consumo humano

Tabla 3.7 Recomendaciones de equivalencia entre las zonas de protección en acuíferos kársticos o fisurados, delimitadas con criterios de vulnerabilidad a la contaminación, las zonas de protección en acuíferos porosos, delimitadas en función de tiempos de tránsito hasta la captación y la zonificación recogida en el RDPH.

RDPH	Porosos	Kársticos/Fisurados ²		
	Tiempo de Tránsito	EPIK	COP	DISCO
Zonificación en perímetros de protección de SCAS ≤ 50.000 habitantes y caudal ≤ 10.000 m³/día				
Inmediata o de restricciones absolutas	Delimitada exteriormente por la isócrona de 50 días de tiempo de tránsito	Zona S1 ¹ . Esta zona siempre debe incluir un perímetro alrededor de la captación de al menos 10 metros de radio	Zona de vulnerabilidad intrínseca Muy Alta ¹ Esta zona siempre debe incluir un perímetro alrededor de la captación de al menos 10 metros de radio	Zona S1 ¹ Esta zona siempre debe incluir un perímetro alrededor de la captación de al menos 10 metros de radio
General	Situada entre la isócrona de 50 días y una isócrona > 5 años de tiempo de tránsito (valorar según caso)	Equivalente a zona S2 ampliada ³	Equivalente a clase de vulnerabilidad intrínseca alta ampliada ⁴	Equivalente a clase S2 ampliada ³
Zonificación en perímetros de protección de SCAS > 50.000 habitantes o caudal > 10.000 m³/día				
Inmediata o de restricciones absolutas	Delimitada exteriormente por la isócrona de 50 días de tiempo de tránsito	Zona S1 ¹ Se recomienda que esta zona siempre incluya un perímetro alrededor de la captación de al menos 20 metros de radio	Zona de vulnerabilidad intrínseca Muy Alta ¹ Se recomienda que esta zona siempre incluya un perímetro alrededor de la captación de al menos 20 metros de radio	Zona S1 ¹ Se recomienda que esta zona siempre incluya un perímetro alrededor de la captación de al menos 20 metros de radio
Próxima o de restricciones máximas	Situada entre la isócrona de 50 días y la isócrona de 5 años de tiempo de tránsito	Equivalente a zona S2 ¹	Equivalente a clase de vulnerabilidad intrínseca alta ¹	Equivalente a zona S2 ¹
Alejada o de restricciones moderadas	Límite inferior isocrona de 5 años. Límite superior isocrona mayor a 5 años, a valorar según el caso. Recomendable al menos 10 años de tiempo de tránsito	Equivalente a zona S3 ¹	Equivalente a clase de vulnerabilidad intrínseca Moderada ¹	Equivalente a zona S3 ¹
Restricciones mínimas o Envoltente	Área de alimentación	Área de alimentación	Área de Alimentación	Área de Alimentación
Zonas Satélite	Las zonas satélites deben quedar integradas dentro del área de alimentación, al tener una conexión directa con la captación las restricciones de estas zonas corresponderán a las de “vulnerabilidad intrínseca particularmente elevada”			

¹ La nomenclatura S1, S2, S3 (Zona vulnerabilidad intrínseca muy alta, alta y moderada, etc.), corresponde a la empleada en los métodos originales de estimación de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación (EPIK, DISCO).

² La zonificación de acuíferos kársticos o fisurados se realiza sobre el área de alimentación de la captación.

³ El límite superior del Factor de Protección empleado para definir la zona S2 puede incrementarse hasta un 25% en el caso del método EPIK y un 40% en el método DISCO. De esta manera se incluirá en la zona general toda el área de alta vulnerabilidad intrínseca y la parte más vulnerable del área de vulnerabilidad intrínseca moderada.

⁴ En este caso el límite superior del Índice de COP empleado para definir la clase de vulnerabilidad intrínseca alta puede incrementarse hasta un 50%. De esta manera se incluirá en la zona general toda el área de alta vulnerabilidad intrínseca y la parte más vulnerable del área de vulnerabilidad intrínseca moderada. Las zonas pueden ser prolongadas fuera del área de alimentación cuando los contaminantes pueden acceder al sistema a través de, por ejemplo, ríos, conducciones, canales, etc.

3.4. Etapa IV: Propuesta de restricciones

Una vez delimitado el perímetro de protección y las zonas que lo integran corresponde determinar las restricciones que deben aplicarse sobre cada una de ellas con el fin de evitar la contaminación del agua. El RDPH, su artículo 243 ter.4, establece que la restricción o prohibición de actividades dentro de los límites de los perímetros de protección debe basarse en las recomendaciones establecidas en su anexo VIII (tabla 3.8). En caso de ser necesario, estas limitaciones pueden extenderse a cualquier otra actividad considerada contaminante, aun cuando no esté especificada en dicho anexo:

“Se podrá tener en cuenta otras actividades no especificadas que puedan contemplarse como contaminantes, para las que el organismo de cuenca puede establecer condiciones en todas las zonas.”

El anexo VIII clasifica las actividades que deben ser reguladas en tres categorías: autorizables, no autorizables y condicionadas. A su vez, desde el punto de vista de la naturaleza de estas actividades se contemplan seis grupos principales:

1. Vertidos líquidos (sin depurar).
2. Residuos sólidos.
3. Aplicación agrícola de efluentes, fangos y purines tratados.
4. Actividades industriales sujetas a la legislación IPPC (Real Decreto Legislativo 1/2016, de 16 de diciembre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de prevención y control integrados de la contaminación).
5. Obras subterráneas, infraestructuras y equipamientos.
6. Actividades agrícolas.

Para cada grupo se establece una relación de actividades y su categoría correspondiente. La tabla recogida en el anexo VIII no pretende ser exhaustiva, sino una guía para orientar que tipo de actividades deben ser reguladas y el alcance de dicha regulación en cada zona del perímetro de protección.

Por ejemplo, el anexo VIII no contempla explícitamente la contaminación térmica de las aguas subterráneas pero, en caso de ser necesario, debería ser incluido. Este tipo de contaminación tiene lugar cuando se introduce o extrae, artificialmente, calor en la formación acuífera. Las fuentes más comunes de contaminación térmica son los vertidos de aguas industriales o residuales, las instalaciones de climatización o geotermia somera, e incluso obras subterráneas como aparcamientos que pueden elevar la temperatura del entorno inmediato. Este tipo de actuaciones, al modificar la temperatura del agua produce cambios en la solubilidad de la matriz geológica, altera las comunidades microbianas del suelo y el equilibrio de los gases disueltos provocando cambios en la composición natural del agua. En España la contaminación térmica del agua subterránea no cuenta con una regulación específica, aunque se aborda indirectamente en numerosas normas. Por ejemplo, en el TRLA cuando se establece la necesidad de proteger las aguas subterráneas contra cualquier deterioro de su estado, o en el RDPH al incluir la temperatura en el Grupo C, parámetros menos peligrosos (anexo V Coeficientes de valoración de daños al dominio público hidráulico producidos en la calidad del agua (artículo 326 ter).

Desde la perspectiva del diseño de los perímetros de protección, el incremento de temperatura del agua subterránea de forma artificial, así como las actividades que la causan, deben ser evaluados como procesos contaminantes y ser tenidos en consideración consecuentemente. Como guía se puede citar que el salto térmico máximo permitido en España, para sondeos destinados al aprovechamiento de instalaciones geotérmicas de climatización, es de 6°C, salvo autorización expresa de otro valor (Real Decreto 35/2023, de 24 de enero, art. 35).

En la tabla 3.8 se presenta de forma sintética la relación que existe entre la zonificación de los perímetros de protección y las restricciones a las actividades potencialmente contaminantes. A continuación, se detallan las restricciones generales dentro de cada zona del perímetro.

Tabla 3.8 Relación entre las zonas de un perímetro de protección y la gradación en la restricción de actividades potencialmente contaminantes sobre su superficie.

	Zona / Restricción			
	Inmediata / Absoluta	Próxima / Máxima	Alejada / Moderada	Envolvente / Mínima
Mecanismo de protección	Protección total	Inactivación de contaminantes degradables	Dilución y atenuación de contaminantes Alerta: control de la calidad del agua para detectar episodios de contaminación	Control de la calidad del agua para detectar episodios de contaminación
Actividades prohibidas	Todas, excepto las relacionadas con el mantenimiento y operación de la captación	Aquellas consideradas como contaminantes del suelo o agua	Las que almacenan, generan o empleen sustancias contaminantes que no se pueden inactivar en el medio antes de llegar a la captación	Las que almacenan, generan o emplean productos contaminantes de elevada persistencia o peligrosidad

3.4.1. Zona inmediata o de restricciones absolutas

Esta zona es común a todos los perímetros. Su finalidad es la protección sanitaria de la captación, debe evitar la llegada al agua de cualquier tipo de contaminante. En esta zona quedará prohibido cualquier actividad no relacionada directamente con la explotación del servicio de abastecimiento de agua. En su interior únicamente se autorizarán las actuaciones necesarias para el mantenimiento o mejora de las instalaciones o del servicio.

En acuíferos porosos su límite exterior vendrá definido por la isócrona de 50 días de tiempo de tránsito; mientras que en acuíferos kársticos o fisurados corresponderá a zona de vulnerabilidad muy alta en el método COP y zona S1 en los métodos EPK y Disco, (ver tabla 3.7). Esta zona debe incluir siempre una protección directa de la captación mediante un recinto vallado en un radio mínimo de 10 metros que impida el acceso a cualquier persona no autorizada y, si es posible, un sistema de drenaje perimetral que permita la evacuación de las aguas pluviales y de escorrentía fuera de los límites de esta área, siempre de acuerdo por lo establecido para cada caso concreto, por parte de la administración sanitaria competente.

Existen contaminantes muy resistentes a la degradación en el medio subterráneo, donde la actividad microbiológica está muy limitada, no llega la luz solar, y las temperaturas son relativamente moderadas. Así compuestos orgánicos como los clorados pueden tener semividas de entre 20 y 100 años; contaminantes industriales como los PFOS/PFOA superiores a 100 años; e incluso contaminantes de-

gradables en el suelo, como los nitratos, pueden llegar a permanecer más de 100 años en el acuífero. En un grupo aparte se encontrarían los metales pesados, que no se degradan, y cuyos únicos mecanismos de “inactivación” son procesos como la precipitación o la adsorción, los cuales los retiran de la solución, aunque en la mayor parte de las ocasiones de forma reversible.

3.4.2. Zona de protección general

Esta zona se define en los perímetros para captaciones que abastecen a una población de 50.000 habitantes o menos, o que consumen 10.000 m³/día o menos. Se recomienda que el límite exterior de esta zona venga definido por la isócrona mayor a 5 años de tiempo de tránsito. Al establecer restricciones sobre esta zona se pueden tener en cuenta criterios de vulnerabilidad, de forma que en los casos de vulnerabilidad alta las restricciones se hagan equivalentes a la zona de restricciones máximas, y cuando la vulnerabilidad del acuífero en esa zona sea moderada o baja, las restricciones impuestas correspondan, como mínimo, a las recomendadas sobre la zona de restricciones moderadas de los perímetros de clase 1. En la tabla 3.7 se resumen los criterios de dimensionamiento de esta zona según el tipo de acuífero.

3.4.3. Zona próxima o de restricciones máximas

Su funcionamiento se basa en garantizar que los contaminantes degradables estén en contacto con la matriz del acuífero un tiempo suficiente para que los procesos naturales consigan hacerlo inocuo o reducir su presencia a niveles aceptables. En la práctica, la eliminación absoluta de muchos contaminantes es muy difícil o precisa de un tiempo muy por encima de valores razonables. En estos casos es aceptable asimilar la inactivación a alcanzar concentraciones en el punto de captación dentro de los valores admisibles en el RDAC. En el interior de la zona próxima o de restricciones máximas no debería desarrollarse ninguna actividad que use, transporte, almacene, o genere sustancias consideradas como contaminantes de las aguas subterráneas.

Se recomienda que en acuíferos porosos la zona próxima o de restricciones máximas esté delimitada exteriormente por la isócrona de al menos 5 años de tiempo de tránsito. En acuíferos kársticos o fisurados esta zona corresponderá a zonas de vulnerabilidad alta (ver tabla 3.7).

Un **contaminante persistente** es una sustancia química que, debido a sus características físico-químicas, resiste la degradación en el ambiente y, por lo tanto, puede acumularse en los ecosistemas y organismos vivos durante largos períodos. Estos contaminantes suelen ser bioacumulativos, es decir, se concentran en los tejidos de los seres vivos, y biomagnificables, lo que significa que su concentración aumenta a lo largo de la cadena trófica.

Según la **Convención de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes** (<https://chm.pops.int> 2001), estos compuestos presentan cuatro características clave:

- **Persistencia:** su degradación en el ambiente es extremadamente lenta.
- **Bioacumulación:** se almacenan en los tejidos grasos de los organismos vivos.
- **Transporte a larga distancia:** se dispersan a través del aire, el agua y las especies migratorias, alcanzando regiones alejadas de su fuente de emisión.
- **Toxicidad:** pueden tener efectos adversos en la salud humana y el ambiente, como toxicidad

crónica, alteraciones hormonales o daño a los ecosistemas.

Ejemplos de contaminantes persistentes

- **Compuestos orgánicos persistentes (COPs)**, por ejemplo: Dioxinas, furanos, bifenilos policlorados (PCBs) y pesticidas como el DDT.
- **Metales pesados:** (Hg, Pb, Cd, etc) no se degradan y pueden bioacumularse.
- **Plásticos de larga vida:** microplásticos y polímeros de difícil degradación.

Sustancia peligrosa: sustancia o grupo de sustancias que son tóxicas, persistentes y bioacumulables, así como otras sustancias o grupos de sustancias que entrañan un nivel de riesgo análogo. En particular, son sustancias peligrosas todas las enumeradas en los anexos IV y V del Real Decreto 817/2015, de 11 de septiembre, por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental, independientemente de la clase atribuida (prioritarias, peligrosas prioritarias, otros contaminantes o preferentes).

3.4.4. Zona alejada o de restricciones moderadas

Protege la captación imponiendo largos periodos de tránsito de forma que los contaminantes se diluyan o atenúen antes de llegar a la captación y en caso de ser detectados se tenga tiempo suficiente para tomar las medidas correctoras adecuadas.

Se recomienda que en acuíferos porosos la zona alejada o de restricciones moderadas esté delimitada exteriormente por la isócrona de al menos 10 años de tiempo de tránsito. En acuíferos kársticos o fisurados esta zona corresponderá a zonas de vulnerabilidad moderada (ver tabla 3.7).

3.4.5. Zona de restricciones mínimas o envolvente

Esta zona y sus restricciones se extienden, de forma ideal, a toda el área de alimentación de la captación, garantizando un prolongado tiempo de contacto del agua con la matriz sólida. Su objetivo es proteger la captación frente a contaminantes de larga persistencia. En cualquier caso, y al igual que sucede con la zona alejada, se debe evitar el desarrollo de cualquier actividad que emplee sustancias de elevada persistencia o toxicidad en alguno de sus procesos.

3.4.6. Recomendaciones acerca de la interpretación de las actividades enumeradas en el anexo VIII

La tabla 3.9 (procedente del anexo VIII del RDPH) presenta una relación de actividades que deben ser restringidas o prohibidas en las diferentes zonas en las que se dividen los perímetros de protección. Esta tabla incluye numerosas actividades potencialmente contaminantes de los acuíferos, si bien no es una tabla exhaustiva, pudiendo ser ampliada en caso necesario. Por ejemplo, en el primer grupo de contaminantes "Vertidos líquidos (sin depurar)", puede ser necesario añadir los vertidos de tipo industrial o minero que pueden generar efluentes contaminantes. En cualquier caso, siempre es necesario analizar el alcance de las actividades enumeradas en el anexo y no guiarse únicamente por el título del grupo genérico al que pertenecen. Se ponen estos ejemplos:

- Los almacenes de graneles o de productos que no tienen un empaquetado o embalado individual pueden contener, desde productos líquidos que fácilmente penetrarían en el acuífero en caso de vertido accidental, hasta sólidos inertes cuyo impacto sobre el agua subterránea es nulo. En cualquier caso, cuando se trata de productos no identificados o clasificados en la legislación vigente como peligrosos su almacenamiento dentro de los límites del perímetro de protección debe estar restringida.
- La presencia de cuarteles, depósitos o zonas militares, se restringe expresamente en todas las zonas, pero estas instalaciones incluyen, desde albergues de personal hasta almacenes de productos tóxicos o peligrosos, talleres o incluso zonas de maniobra en las que se manipulan sustancias tóxicas que pueden quedar esparcidas por la superficie del terreno. Cada caso debe ser valorado individualmente y clasificado en consecuencia.
- Algo similar sucede con las zonas clasificadas como industriales, que incluyen desde centros comerciales y de servicios hasta fábricas y almacenes de todo tipo.
- La presencia de campings, zonas deportivas o piscinas públicas deben ser limitadas cuando empleen productos desinfectantes tóxicos, como los organoclorados, sobre terrenos no impermeabilizados; o cuando cuentan con depósitos de combustible de gran capacidad. En otras circunstancias puede que no supongan un peligro para la calidad de las aguas subterráneas.

Las instalaciones de captación de agua, en ningún caso pueden servir de almacén de productos químicos. Era frecuente encontrar, dentro de la caseta de bombas o en un local anexo, productos de tratamiento del agua o mantenimiento de la maquinaria

almacenados en cantidades que suponen un peligro para la calidad del agua en caso de derrame accidental. Para evitar este peligro, dentro de la zona de restricciones absolutas no estará permitido almacenar ningún producto químico.

Es recomendable que, al presentar la propuesta de perímetro con su zonificación, se acompañe una declaración genérica de restricciones/prohibiciones, que englobe todas las actividades potencialmente contaminantes que han de ser limitadas. Posteriormente, dichas restricciones pueden especificarse en base a cada territorio concreto y al estudio de las actividades potencialmente contaminantes desarrolladas en la zona en estudio, siempre tomando como referencia el anexo VIII.

Se sugieren, como declaraciones generales, las siguientes:

En la zona inmediata o de restricciones absolutas:

- Se prohíbe cualquier actividad diferente a la relacionada con la captación del agua para abastecimiento.
- Se prohíbe el almacenamiento de cualquier producto químico independientemente de su naturaleza o uso.

En la zona de protección general:

- Dependiendo de la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación se podrá establecer la combinación adecuada de las declaraciones de la zona próxima, de la zona alejada y de la zona de restricciones mínimas.

En la zona próxima o de restricciones máximas:

- Se prohíbe cualquier actividad que conlleve el uso, almacenamiento, transporte o generación de sustancias consideradas contaminantes de las aguas subterráneas.
- Se prohíbe cualquier tipo de vertido.
- Se prohíbe cualquier actividad o acción que aumente la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, como por ejemplo obra civil que requiera la eliminación del suelo o parte superior de la zona no saturada, excavación de túneles etc.

En la zona alejada o de restricciones moderadas:

- Se prohíbe cualquier actividad que use, almacene, emplee o genere sustancias consideradas como contaminantes persistentes, no bio-degradables o que, por su naturaleza, puedan ser considerado como tóxicos o peligrosos.
- Se prohíbe cualquier actividad o acción que aumente la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación tal como se ha definido en el apartado anterior.

En la zona de restricciones mínimas o envolvente:

- Se prohíbe cualquier actividad que use, almacene, emplee o genere sustancias consideradas como contaminantes de elevada persistencia o peligrosidad.
- Se garantizará que el uso, almacenamiento, transporte o producción de sustancias degradables, potencialmente contaminantes de las aguas subterráneas, se realiza tomando las precauciones necesarias para evitar su vertido accidental sobre el terreno, las aguas o la atmósfera y que, en caso de producirse, se dispongan de los medios para su rápida retirada y neutralización.
- Únicamente se autorizarán actividades o acciones que puedan aumentar la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación previo informe razonado de no afección a la captación de agua subterránea y autorización por parte de la autoridad competente.

Cualquier actividad que se pretenda iniciar sobre la superficie de un perímetro de protección, deberá cumplir las restricciones impuestas a la zona en la que se ubica. Por ejemplo, si se pretende instalar una actividad sobre la zona de restricciones moderadas deberá demostrar fehacientemente que dicha

actividad no almacenará, transportará, empleará ni generará sustancias consideradas contaminantes persistentes o de elevada persistencia o peligrosidad. Así mismo deberá demostrar que no aumentará la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación.

En el artículo 243 ter.5 del RDPH se prevé la posibilidad de que un perímetro entre en conflicto con una actividad limitada o prohibida en el interior de alguna de sus zonas, en este caso:

“En el caso de que dentro del perímetro de protección existan actividades o instalaciones previas a su declaración que sean susceptibles de provocar la contaminación o la degradación del agua, los organismos de cuenca informarán de este extremo a los titulares de las actividades y al resto de administraciones, estableciéndose un régimen transitorio que permita, en la medida de lo posible, la adaptación de las actividades existentes con el objetivo de garantizar lo previsto en el artículo 92 bis del TRLA relativo a los objetivos medioambientales.”

3.4.7. Consideraciones a tener en cuenta en la propuesta de restricciones de actividades específicas

Se podrán especificar restricciones sobre actividades no contempladas en la tabla del anexo VIII, por ejemplo, aquellas incluidas en el inventario de actividades. Por otra parte, en el anexo VIII, se clasifican las actividades potencialmente contaminantes de las aguas subterráneas en tres categorías: prohibidas, autorizadas y condicionadas. El tipo y grado de condicionamiento dependerá tanto de la naturaleza de la actividad como de las características del acuífero sobre el que se desarrolle. En cualquier caso, como norma general, una actividad “condicionada” se debería entender como “autorizada”, siempre que tanto en su funcionamiento normal como excepcional no suponga riesgo de contaminación del suelo ni de las aguas subterráneas. En caso contrario debería ser prohibida.

Cuando una actividad se encuentre dentro de la categoría “condicionada” conviene establecer de forma explícita la naturaleza de las condiciones que autorizan o prohíben su desarrollo. Las Confederaciones Hidrográficas y las autoridades hidráulicas competentes podrán establecer especificaciones generales en su demarcación, o en determinadas masas de agua, para la interpretación de la recomendación de una actividad como “condicionada”. Igualmente, podrán establecer condiciones específicas en PPCSb situados sobre MSBT de las que se tenga constancia de situaciones de especial vulnerabilidad.

La legislación permite que la administración decida, en el territorio de su competencia, qué actividades “condicionadas” pueden ser autorizadas en cada zona o incluso establecer restricciones en función de, por ejemplo, controles de calidad. A continuación, se presentan algunos ejemplos de este tipo de interpretaciones para la categoría “condicionado”. En cada caso concreto habrá que proponer las que se estime más adecuadas:

Ejemplo 1: en la zona de restricciones moderadas se permite la construcción de vertederos de inertes siempre que se cumplan las siguientes premisas:

- Tengan una capacidad menor o igual a 15.000 toneladas.
- Los vertederos no pueden estar a una distancia entre ellos inferior a 5 km ni construirse más de uno dentro de los límites del perímetro.

Ejemplo 2: en la zona de restricciones moderadas no se permite el almacenamiento de graneles bajo las siguientes premisas:

- Si se trata de graneles líquidos de cualquier tipo.
- Si se trata de graneles sólidos salvo para los casos de productos inertes sin capacidad de contaminar las aguas subterráneas.

Ejemplo 3: dentro de los límites de la zona de restricciones máximas se permite la ganadería extensiva siempre que se cumplan las siguientes premisas:

- La carga ganadera será como máximo el 50% de la que el territorio puede admitir, expresada en UGM (unidades de ganado mayor) por ha.
- En acuíferos vulnerables esta actividad nunca será admisible.

En todo caso, se deberá tener en cuenta la legislación aplicable y a las restricciones que hagan otras administraciones en virtud de sus competencias.

En el caso de masas de agua identificadas en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales de buen estado químico, sería recomendable que el grupo de actividades clasificadas como “condicionadas” en el

anexo VIII, se prohíban, en cualquier caso, hasta que la masa deje de estar en riesgo, y en esta nueva situación reevaluar la prohibición en función de las características de la masa de agua, su vulnerabilidad etc.

Tabla 3.9 Actividades potencialmente contaminantes de las aguas subterráneas no permitidas, condicionadas y permitidas en las diferentes zonas de los perímetros de protección. (Basado en el anexo VIII del RDPH).

	Zona de protección			
	R. Absolutas	R. Máximas	R. Moderadas	R. Mínimas
Vertidos líquidos (sin depurar)				
Fosas sépticas.	No.	No.	No.	Condicionado
Aguas de redes de alcantarillado pluviales.	No.	No.	Condicionado	Si.
Vertidos industriales y mineros	No.	No.	No.	No.
Residuos sólidos				
Vertederos residuos inertes	No.	No.	Condicionado	Condicionado
Vertederos residuos no peligrosos.	No.	No.	No.	No.
Vertederos residuos peligrosos.	No.	No.	No.	No.
Depósitos de seguridad de residuos peligrosos.	No.	No.	No.	No.
Aplicación agrícola de efluentes, fangos y purines tratados				
Aguas residuales con tratamiento primario.	No.	No.	No.	No.
Aguas residuales con tratamiento primario y biológico.	No.	No.	No.	Condicionado
Aguas residuales con tratamiento primario, secundario y terciario.	No.	Condicionado	Si.	Si.
Fangos de depuración estabilizados que cumplen RD 1310/90.	No.	No.	Condicionado	Condicionado
Aplicación purines estabilizados por compostaje.	No.	No.	Condicionado	Condicionado

3. Directrices para el dimensionamiento de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas destinadas al consumo humano

Tabla 3.9 Continuación

	Zona de protección			
	R. Absolutas	R. Máximas	R. Moderadas	R. Mínimas
Aplicación de purines no estabilizados por compostaje.	No.	No.	No.	No.
Aplicación de estiércoles sólidos.	No.	No.	Condicionado	Si.
Actividades industriales sujetas la legislación IPPC1				
Actividades industriales sujetas a IPPC no conectadas a la red de saneamiento municipal.	No.	No.	No.	No.
Actividades industriales sujetas a IPPC, conectadas a la red de saneamiento municipal.	No.	No.	No.	Condicionado
Almacenamiento de graneles.	No.	No.	Condicionado	Condicionado
Almacenamiento de productos insalubres, nocivos y peligrosos procedentes de actividades industriales IPPC	No.	No.	Condicionado	Condicionado
Balsas.	No.	No.	No.	Condicionado
Depósitos de almacenamiento enterrados.	No.	No.	No.	Condicionado
Almacenamiento temporal o trasiego de sustancias contaminantes.	No.	No.	Condicionado	Condicionado
Transporte de sustancias contaminantes a través de conducciones.	No.	No.	No.	Condicionado
Transporte rodado de sustancias contaminantes excepto fertilizantes.	No.	No.	No.	Condicionado
Desaguaces y chatarras.	No.	No.	No.	Condicionado
Gasolineras y depósitos de hidrocarburos.	No.	No.	No.	Condicionado
Centrales térmicas de producción energética.	No.	No.	No.	No.
Estaciones y subestaciones eléctricas y transformadores.	No.	No.	Condicionado	Condicionado
Obras subterráneas, infraestructuras y equipamientos.				
Pozos, sondeos y galerías para abastecimiento público.	Condicionado	Condicionado	Condicionado	Condicionado
Otros pozos, sondeos y galerías de captación.	No.	No.	No.	No.
Canteras, minas túneles, excavaciones, redes viarias, aeródromos y edificaciones bajo el nivel freático.	No.	No.	No.	Condicionado
Canteras, minas túneles, excavaciones, redes viarias, aeródromos y edificaciones, en seco.	No.	No.	No.	Condicionado
Inyección o recarga de aguas resultantes de operaciones mineras o asociadas a la construcción y mantenimiento de obras de ingeniería o edificación.	No.	No.	No.	No.
Rellenos y terraplenes con suelos contaminados.	No.	No.	No.	No.
Cuarteles, depósitos o zonas militares.	No.	No.	No.	No.
Estaciones de tratamiento de aguas residuales.	No.	No.	Condicionado	Condicionado
Cementerio.	No.	No.	No.	Condicionado
Campings, zonas deportivas y piscinas públicas.	No.	No.	Condicionado	Si.

Tabla 3.9 Continuación

	Zona de protección			
	R. Absolutas	R. Máximas	R. Moderadas	R. Mínimas
Zoológicos y safaris.	No.	No.	Condicionado	Si.
Zonas industriales.	No.	No.	No.	Condicionado
Actividades agrícolas				
Granjas de ganado porcino y vacuno.	No.	No.	Condicionado	Condicionado
Granjas de ganado caprino y ovino.	No.	No.	Condicionado	Condicionado
Granjas de aves y conejos.	No.	No.	Condicionado	Condicionado
Ganadería extensiva.	No.	Condicionado	Condicionado	Condicionado
Depósitos de fertilizantes.	No.	No.	Condicionado	Condicionado
Depósitos y balsas de purines.	No.	No.	No.	No.
Almacenamiento de estiércoles.	No.	No.	Condicionado	Condicionado
Aplicación de fertilizantes o plaguicidas.	No.	No.	Condicionado	Condicionado

3.5. Etapa V: Informe técnico y propuesta de perímetro

Los antecedentes y trabajos para el diseño del perímetro de protección se recogerán en un **informe técnico** en el cual se desarrollarán, de forma explícita y detallada, cada una de las etapas del esquema general presentado en la figura 3.1 organizadas en apartados independientes.

En base al contenido del informe técnico se redactará una **propuesta de perímetro**, que es el documento en el que se describe de forma precisa y sintética la justificación, delimitación y restricciones del perímetro de protección. También contendrá, si es necesario, la propuesta de red de vigilancia de calidad. Se estructura en cuatro apartados:

- justificación legal,
- tabla con las poligonales que definen las diferentes zonas del perímetro y mapa en formato SIG con la situación de esas poligonales sobre el territorio,
- propuesta de restricciones en forma de recomendaciones generales y específicas,
- propuesta, si es necesario, de puntos de vigilancia de calidad, ubicación de los mismos sobre un mapa en formato SIG y tabla con las coordenadas.

3.5.1 Informe técnico: contenido y estructura

El informe técnico contendrá toda la información empleada para el diseño del perímetro.

Se recomienda dividirlo en los siguientes apartados:

1. Introducción.
2. Descripción y caracterización del marco geológico e hidrogeológico.
3. Descripción del SCAS destinadas al consumo humano.
4. Dimensionamiento del perímetro de protección.
 - Clasificación de la captación y tipo de acuífero.
 - Descripción del modelo conceptual.
 - Selección del método de dimensionamiento.
 - Aplicación del método seleccionado: zonificación teórica.
 - Zonificación práctica.
5. Propuesta de restricciones.
6. Recomendaciones sobre el control de calidad del agua.

A continuación, se detalla el contenido mínimo que debe incluir cada uno de los apartados, el grado de detalle dependerá de la clase de captación para la que se esté diseñando el perímetro de protección.

3.5.1.1. Introducción

En la introducción del Informe técnico se detallará el objetivo general, describiendo de forma clara y concisa su propósito y alcance, el contexto en el que se enmarca, así como los objetivos específicos relacionados con la propuesta de delimitación del perímetro de protección.

En la introducción se incluirán antecedentes, fundamentos de derecho y procedimiento administrativo (Junta de Gobierno o Plan Hidrológico).

3.5.1.2. Descripción y caracterización del marco geológico e hidrogeológico

Marco geológico: Se presentará un encuadre geológico del acuífero explotado por la captación de agua para la cual se está diseñando el perímetro de protección. Este apartado incluirá, como mínimo:

- Una descripción de la litología, del espesor (potencia) y las características más relevantes de las unidades geológicas presentes en las zonas más representativas, incluyendo columnas estratigráficas.
- Una caracterización detallada de la geología regional y local, con énfasis en la litoestratigrafía y la estructura tectónica del área.
- Cortes geológicos interpretativos y representativos, necesarios para una comprensión del modelo conceptual del funcionamiento del acuífero.

Marco hidrogeológico: Este apartado incluirá la identificación de la MSBT a la que pertenece la captación, así como una caracterización general del acuífero. Se deberá proporcionar información detallada sobre:

- Tipo de acuífero (libre, confinado o semiconfinado) y su delimitación espacial.
- Extensión superficial y profundidad aproximada de la unidad acuífera.
- Descripción de los mecanismos de recarga y descarga, incluyendo precipitación, recarga desde masas de agua superficiales, conexión con otras formaciones, descargas al mar etc.
- Propiedades hidrogeológicas, como transmisividad, permeabilidad y capacidad de almacenamiento.
- Mapa piezométrico, evolución previsible de niveles, dirección y sentido del flujo subterráneo etc.
- Identificación de barreras hidráulicas como fallas, contactos impermeables, etc.
- Cortes hidrogeológicos interpretativos y representativos enfocados a explicar la estructura del acuífero, su relación con otros acuíferos, con las áreas de descarga y recarga, con otras masas de agua etc.
- Cualquier dato relevante obtenido de informes, bibliografía técnica o científica etc., por ejemplo, mapas hidrogeológicos, piezométricos, ensayos de bombeo, hidroquímica, etc.

3.5.1.3. Descripción del SCAS destinadas al consumo humano

Este apartado deberá ajustarse al apartado 1.1 de esta guía, contemplando como mínimo:

- La ubicación exacta de los puntos de captación.
- Las características constructivas de las captaciones (profundidad, material del entubado, tipo y posición de las rejillas, posición de los tramos aislados, etc.
- Situación y características de la bomba de extracción.
- Población abastecida, su distribución temporal y el volumen de concesión.
- Distribución temporal de los caudales extraídos.

Toda esta información deberá presentarse acompañada de un plano o esquema de situación a escala adecuada, que permita obtener una visión clara y global del SCAS.

En caso de que varias captaciones estén incluidas en el título concesional, pero que no se puedan incluir en un único SCAS se elaborarán dos o más estudios técnicos que se presentarán de forma conjunta y se harán constar en la descripción del sistema.

3.5.1.4. Dimensionamiento del perímetro de protección

Clasificación de la captación y tipo de acuífero

Clasificación de la captación: se indicará la clase de captación según la población abastecida y el caudal extraído teniendo en consideración la evolución previsible, tanto de la población como del caudal, con el fin de anticipar una posible reclasificación.

Se especificará si el perímetro se diseña para una captación aislada o para más de una de forma conjunta, en este caso habrá que aclarar si se elabora un informe técnico único para todas las captaciones o varios.

Clasificación del acuífero: el acuífero se clasificará como poroso, kárstico, fisurado o asimilable a poroso, y si son varios los acuíferos captados, se indicará la clasificación de cada uno de ellos.

Descripción del modelo conceptual

Un buen modelo conceptual debe sintetizar toda la información geológica, hidrogeológica, climática, topográfica y de uso del agua disponible, de forma que permita explicar el funcionamiento del acuífero, incluyendo las fuentes de recarga y las vías de descarga, la relación con otras masas de agua y con formaciones próximas. El modelo además debe explicar las posibles vías de ingreso de contaminantes y la forma en que puede llegar al punto de captación.

El nivel de detalle del modelo debe ser acorde con la clasificación de la captación para la cual se esté diseñando el perímetro de protección.

Selección del método de dimensionamiento

Se justificará adecuadamente el método de dimensionamiento seleccionado. De preferencia se emplearán los métodos recomendados en los apartados 3.2 y 3.3. Pueden emplearse otros métodos siempre que existan razones técnicas que lo justifiquen.

Aplicación del método seleccionado: zonificación teórica

Se aplicará el **método elegido detallando de forma explícita el origen de los datos** empleados en todos los cálculos o en la determinación de los valores de vulnerabilidad.

Si se usa un programa informático (Pepote, Zappel, etc.) se especificará la versión del programa y se suministrarán los ficheros de entrada de datos de forma que sea posible replicar los resultados presentados.

Siempre que sea posible se proporcionará junto con el valor de los parámetros en los que se basan los cálculos su correspondiente incertidumbre.

El resultado final en todos los casos será un mapa, en formato SIG con la delimitación teórica de las zonas de protección.

– Modelos matemáticos de flujo

El informe deberá ir acompañado con una descripción de las hipótesis asumidas y de los datos y resultados alcanzados en cada uno de los pasos propuestos para llevar a cabo la modelación matemática. Para que se puedan replicar las simulaciones se facilitarán copia de las carpetas de trabajo que incluyan tanto los ficheros con los datos de entrada (geometría, condiciones de contorno y acciones) como las opciones de simulación seleccionadas y los resultados alcanzados. El informe y datos adjuntos deben permitir reproducir los resultados del modelo y comprobar el efecto de las simplificaciones asumidas.

– Métodos de Wyssling o Jacobs y Bear

Se presentará una tabla con el valor y origen de los parámetros empleados. En caso de haber utilizado alguna versión modificada del método (como la versión ZAPPEL), deberá especificarse claramente la versión y el tipo de modificación aplicada. Se proporcionarán todos los datos necesarios para replicar los cálculos.

– Método de las distancias

Para poder aplicar este método es imprescindible justificar adecuadamente que la captación se encuentra en una zona naturalmente bien protegida, en la que el agua permanece en el acuífero el tiempo suficiente para purificarse de forma natural.

– Métodos basados en el análisis de vulnerabilidad (EPIK, COP, DISCO y DRASTIC)

Se detallará el origen de los datos y el procesamiento utilizado para la obtención de cada factor, así como su estandarización a la escala de grados y valores correspondiente al método seleccionado.

Se adjuntarán las coberturas geoespaciales con los metadatos de los mapas temáticos de cada factor y el mapa del índice de vulnerabilidad calculado, todo en formato digital. Para cada tipo de mapa, se incluirá una tabla con los atributos, índices de vulnerabilidad y tabla de equivalencia (índice/zonas de protección), en la que se reflejen los valores numéricos asignados a cada unidad espacial.

Zonificación práctica

La zonificación práctica modifica la zonificación teórica al considerar aspectos como la geología, hidrogeología, topografía, climatología, uso del territorio etc. Debe ser coherente con el modelo conceptual de funcionamiento del acuífero.

Se debe documentar adecuadamente, sintetizando en una tabla resumen, las singularidades identificadas en el modelo que pueden modificar la zonificación teórica ajustando los límites de las zonas

de protección en consecuencia (en el apartado 3.3.5 se presentan algunos de los factores que con frecuencia modifican la zonificación teórica).

La zonificación práctica será la que se incluya en la propuesta final de perímetro, en ella se deberá especificar con claridad cuántas y cuáles son las zonas de protección consideradas: inmediata, próxima, alejada, envolvente para captaciones clase 1, e inmediata y general para el resto. En caso necesario también las zonas satélite.

3.5.1.5. Propuesta de restricciones

Para cada una de las zonas definidas en el perímetro se detallarán las actividades permitidas, autorizables o prohibidas.

Se recomienda incluir, un conjunto de actividades genéricas con recomendaciones de restricción/prohibición que englobe todas las actividades potencialmente contaminantes que deben ser limitadas en cada zona. Posteriormente, estas restricciones deberán adaptarse al contexto específico de cada territorio, en función de las actividades actuales o previsibles sobre el mismo. En cualquier caso, se debe partir siempre de la tabla del anexo VIII del RDPH, justificando adecuadamente cualquier modificación de dicha tabla.

El resultado final de este apartado será una tabla de restricciones generales y específicas para cada zona del perímetro, así como las especificaciones necesarias para los casos condicionados.

3.5.1.6. Recomendaciones sobre el control de calidad del agua

En caso de ser conveniente establecer un plan de control de la calidad del agua se presentará un anexo en el que se describa:

- la ubicación exacta y características técnicas de los puntos de muestreo,
- la frecuencia de muestreo recomendada,
- los parámetros a analizar *in situ* y en laboratorio,
- los parámetros de especial vigilancia y sus valores de alerta.

3.5.1.7. Anexos, tablas y mapas

Conviene incluir un anexo en el que se recojan, las tablas y mapas, no incluidas en otros apartados, que sean necesarios para respaldar y visualizar de forma clara y estructurada la información técnica utilizada para definir los perímetros. Cada tabla o mapa debe ser mencionado al menos una vez en el texto principal del informe. Si hay muchos elementos, conviene incluir un índice de anexos.

Principales tablas que pueden incluirse:

- tabla de parámetros técnicos,
- inventario de actividades potencialmente contaminantes,
- tabla de limitaciones o restricciones,
- tabla resumen de perímetro propuesto con datos generales del perímetro definido: área total, coordenadas de los vértices de la poligonal, tipo de protección, etc.

Mapas imprescindibles:

- mapa de ubicación geográfica de todas las captaciones del SCAS,
- mapa base topográfico. Útil para justificar barreras naturales o límites del perímetro,
- mapa de usos del suelo y de inventario de actividades,

- mapas temáticos de los factores empleados para evaluar la vulnerabilidad,
- mapa de zonificación teórica del perímetro de protección,
- mapa de zonificación práctica que refleje el perímetro de protección propuesto.

3.5.2. Propuesta de perímetro

La propuesta de perímetro es un documento sintético, independiente del informe técnico descrito en el apartado anterior, en el que se recoge de forma sintética:

- la justificación legal de la necesidad de establecer el perímetro de protección. Marco en la legislación nacional y en los planes hidrológicos.
- las poligonales de cada una de las zonas que forman parte del perímetro. Se proporcionarán en formato SIG y en una tabla de vértices con coordenadas, en la que se detalle la zona a la que pertenece cada una de ellas (inmediata, próxima, alejada, etc.).
- las restricciones que se imponen a cada una de las zonas, en forma de tabla de restricciones específicas para cada SCAS, así como las particularidades correspondientes a los casos condicionados.
- si es pertinente la propuesta de perímetro contendrá las características de la red de control de calidad (ubicación de los puntos de muestreo, frecuencia de muestreo, parámetros a determinar *in situ* y en laboratorio, etc.).



4. Recomendaciones sobre el control de calidad del agua en los perímetros de protección

Cuando la degradación natural de un contaminante no es posible o resulta insuficiente, el perímetro de protección debe diseñarse de manera que permita detectar su presencia con el tiempo necesario para aplicar medidas paliativas o correctoras. El objetivo final es evitar que la contaminación alcance a la población. Esto puede lograrse mediante la implementación de un sistema de vigilancia de la calidad del agua subterránea, que permita identificar con antelación la presencia de sustancias no deseadas en el acuífero y activar los mecanismos de actuación correspondientes.

El RDAC, en su artículo 1.a., dentro del Capítulo II titulado “Características del agua de consumo y su control”, señala que la administración pública deberá designar un punto de muestreo para el control de la calidad del agua de consumo dentro de la zona de captación. Dadas las características del agua subterránea, su lento movimiento y la particular distribución espacial del área de alimentación de una captación, este único punto puede resultar insuficiente como mecanismo de alerta temprana. En este apartado se ofrecen algunas recomendaciones generales para el diseño y la operación de la red de alerta asociada a un perímetro de protección.

Para optimizar el sistema de vigilancia es necesario responder a cuatro preguntas:

- ¿qué sustancias es necesario controlar ?,
- ¿cuál debe ser la ubicación de los puntos de control, y cuántos son necesarios ?,
- ¿cuál es la frecuencia de muestreo recomendable ?,
- ¿cómo deben ser tomadas las muestras ?.

4.1. ¿Qué sustancias es necesario controlar?

Para establecer los parámetros que deben ser controlados previamente es necesario:

- **Establecer los valores de calidad de fondo natural**

Antes de establecer un listado de compuestos a controlar, se debe determinar los valores del fondo hidroquímico del acuífero, su evolución histórica y tendencia previsible.

- **Identificar las actividades potencialmente contaminantes**

Con el fin de optimizar la situación de los puntos de control y los parámetros a analizar se procederá a identificar y valorar las actividades potencialmente contaminantes de las aguas subterráneas que se desarrollen dentro de los límites del área de alimentación de la captación.

- **Seleccionar los indicadores de contaminación más adecuados**

- En caso de existir un análisis de riesgo este puede servir como base para la elección de los compuestos a controlar.
- En todos los puntos de la red se hará una caracterización físico-química general (C.E., pH y mayoritarios) y de indicadores específicos de las actividades potencialmente contaminantes que

puedan afectar al agua captada (nitratos si hay actividad agraria, indicadores microbiológicos, amonio o nitritos si hay granjas, metales pesados o hidrocarburos seleccionados si hay actividad industrial o gasolineras, microorganismos indicadores fecales, etc.)

4.2. ¿Cuál debe ser la ubicación de los puntos de control, y cuántos son necesarios?

La ubicación y número de puntos de control dependerá tanto del tipo de acuífero (poroso, asimilable a poroso, kárstico o fisurado) como de su grado de homogeneidad e isotropía, y del tamaño de la población abastecida. En general una elevada velocidad del agua, anisotropía o heterogeneidad son factores que hacen necesario disponer de un mayor número de puntos de control.

Los puntos de control pueden ser sondeos activos en otros usos, por ejemplo, sondeos de riego, o ser piezómetros contruidos exprofeso. En cualquier caso, es imprescindible asegurar que capta la misma formación que el sondeo de abastecimiento que se protege mediante el perímetro, que su construcción no permite la mezcla con agua de otras formaciones y que el sondeo permite que el agua del acuífero fluya a su través.

Como norma general:

- Los puntos de control se situarán aguas arriba de la captación y aguas abajo de las actividades potencialmente contaminantes, en la dirección principal del flujo.
- En el caso de no existir focos potenciales de contaminación identificados, los puntos de control se situarán en una línea principal de flujo, aproximadamente en el punto medio de la distancia que separa las isócronas que identifican las diferentes zonas del perímetro.
- En acuíferos kársticos o fisurados se seguirá la misma filosofía que en los porosos, prestando especial atención a la orientación de las redes de fracturación/karstificación.
- El número de puntos de control dependerá de la complejidad del sistema hidrogeológico, de su vulnerabilidad a la contaminación, del nivel de anisotropía, de la presencia de heterogeneidad o discontinuidades, etc. Como mínimo debería haber un punto de control en cada una de las zonas definidas. En la zona de restricciones absolutas la autoridad sanitaria es la competente y la propia captación es un punto de control.
- En sistemas kársticos o fisurados, sobre todo cuando existe una elevada fragmentación de las zonas vulnerables a la contaminación, no es posible dar una norma general y debe recurrirse a un estudio hidrogeológico detallado para establecer el número óptimo de puntos de control y su localización más adecuada.

4.3. ¿Cuál es la frecuencia de muestreo recomendable?

La frecuencia de muestreo se determinará en función del tiempo de tránsito entre el punto de control y la captación de abastecimiento, teniendo en cuenta además factores como el riesgo que suponen los contaminantes monitorizados. Se trata de tener tiempo suficiente para reaccionar ante la presencia de contaminación. Como mínimo se muestreará y analizará la red con una frecuencia anual. En caso de sistemas tensionados o con un elevado volumen de extracción se podrá aumentar la frecuencia de muestreo.

4.4. ¿Cómo deben ser tomadas las muestras?

Como norma general se seguirá lo establecido en el RDAC. Para lo no especificado en esta norma se seguirán las recomendaciones habituales para el muestreo de agua subterránea (*Guía para el muestreo de las aguas subterráneas y la solución del suelo*, IGME (2016). ISBN 978-84-9138-012-2), así como las recomendaciones publicadas por el MITECO y los procedimientos establecidos en el *Protocolo de muestreo de aguas subterráneas en emplazamientos contaminados* (NIPO: 665-25-056-5) y el *Protocolo para las actuaciones de protección de la calidad de las aguas subterráneas frente a la contaminación puntual* (NIPO: 665-25-057-0), MITECO (septiembre 2025).

4.5. Documentación, base de datos y GIS

Se deben incluir los puntos de control del perímetro en NABIA (sistema de información del estado de las masas de agua), así como la información de los resultados obtenidos en los controles. Esta información es fundamental para evaluar la efectividad y el control del funcionamiento del perímetro, así como facilitar la toma de decisiones ante eventos de contaminación.

4.6. Plan de contingencias

En el caso de detectarse la presencia de contaminación deberá actuarse según lo establecido en la Sección 4.^a (Actuación ante incidencias) del Capítulo II del RDAC.

A efectos de optimizar la respuesta ante una incidencia de este tipo es imprescindible valorar adecuadamente la situación del punto de control en el esquema de flujo subterráneo, en especial ha de valorarse el tiempo de tránsito estimado desde el punto de control a la captación de abastecimiento.

La recomendación general es que los perímetros de protección de clase I en acuíferos porosos se diseñen empleando modelos matemáticos de flujo. Este tipo de herramientas son muy adecuadas para cal-

cular tiempos de tránsito y facilitan la labor de establecer protocolos de actuación en caso de que se detecten eventos de contaminación en el interior de los límites de los perímetros de protección.

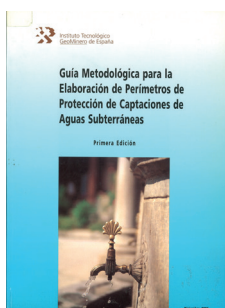


Bibliografía recomendada

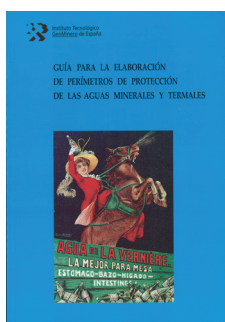
Existe una extensa bibliografía metodológica sobre el diseño de perímetros de protección de captaciones de agua subterránea, que abarca desde enfoques altamente especializados —adaptados a diversos contextos geológicos y económicos— hasta estudios comparativos de carácter general. Con el objetivo de ofrecer una orientación práctica, se presenta y comenta una selección de publicaciones consideradas adecuadas para profundizar en cada uno de los métodos. Se incluyen enfoques alternativos a los propuestos en esta guía, además de las referencias originales —generalmente en inglés— de los métodos descritos. Asimismo, se han incorporado textos de referencia en hidrogeología que pueden ayudar a resolver dudas. No se trata de un listado exhaustivo, sino práctico; el lector podrá encontrar fácilmente en la web muchas otras referencias complementarias. Para facilitar la búsqueda, las referencias se han agrupado en bloques temáticos: síntesis metodológicas, softwares específicos, páginas web, hidrogeología general, temas específicos, métodos de diseño de perímetros, vulnerabilidad a la contaminación, otras publicaciones interesantes y legislación.

Síntesis metodológicas

Las cuatro síntesis que se recogen en este apartado son excelentes referencias metodológicas y conceptuales. No obstante, la más reciente tiene ya más de 22 años, en lo relativo a procedimiento administrativo y aspectos legales pueden considerarse obsoletas.



Guía Metodológica para la Elaboración de Perímetros de Protección de Captaciones de Aguas Subterráneas. (Moreno y Martínez, 1991). Recoge, de forma estructurada, los criterios de establecimiento de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas y describe la metodología necesaria para llevarlos a la práctica. También describe los estudios preliminares que es necesario realizar. Además, incluye un apartado de discusión de aspectos económicos apoyándose en ejemplos reales. Por último, recopila y comenta la normativa sobre perímetros y calidad del agua vigente en ese momento.



Guía para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas mineromedicinales termales y de bebida envasadas ITGE (1995). Esta guía es una versión adaptada al caso de las captaciones de aguas mineromedicinales, termales y de bebida envasadas de la guía de 1991. Hace hincapié en el apartado de trabajos previos y técnicas especiales que se suele usar en este tipo de captaciones. Además, describe el contenido que debe contener un informe de perímetros para este tipo de captación.



Guía para la delimitación e implantación de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas para abastecimiento público. Ministerio de Medio Ambiente (2002). Describe criterios y recomendaciones para la delimitación de las diversas zonas a definir en el interior de perímetro de protección, así como orientaciones sobre los condicionamientos exigibles a actividades o instalaciones potencialmente contaminantes, en su interior.



Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación al territorio (Martínez Navarrete & García García, 2003). Se trata de una detallada revisión de la Guía de 1991 en la que además de poner al día el estado del arte de las metodologías de diseño de perímetros, se actualiza el marco legal incluyendo la situación en otros países del entorno. Se incluye un capítulo que trata la metodología a aplicar a la hora de establecer prioridades en la implantación de perímetros. En esta publicación destaca la aplicación práctica de la metodología descrita en varios casos de estudio y un análisis comparativo de los resultados obtenidos.

Software específico

Existen programas informáticos que permiten aplicar con facilidad varios de los métodos analíticos propuestos para medios porosos:

- La aplicación “PEPOTE” desarrollada por el Área del Ciclo Hídrico de la Diputación Provincial de Alicante (<https://ciclohidrico.com/download/delimitacion-de-perimetros-de-proteccion-para-captaciones-de-aguas-subterraneas/>). Se trata de un software de escritorio que permite solucionar las ecuaciones del método de Wyssling, la aplicación del método de Rehse y de una aproximación analítica basada en el tiempo de viaje de un número significativo de partículas de contaminante desde el punto de aplicación a la captación. Se encuentra pendiente de actualización.

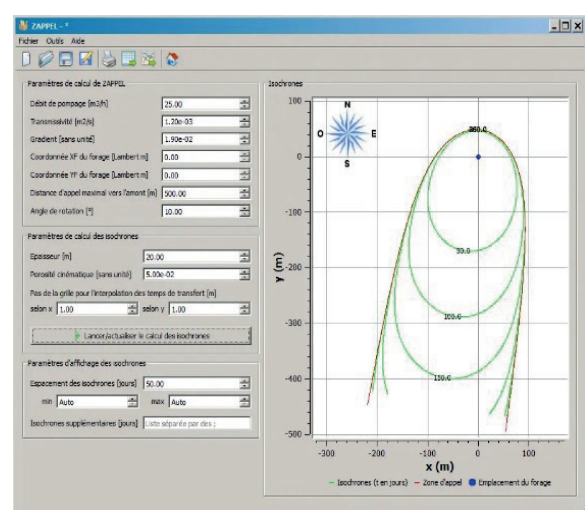
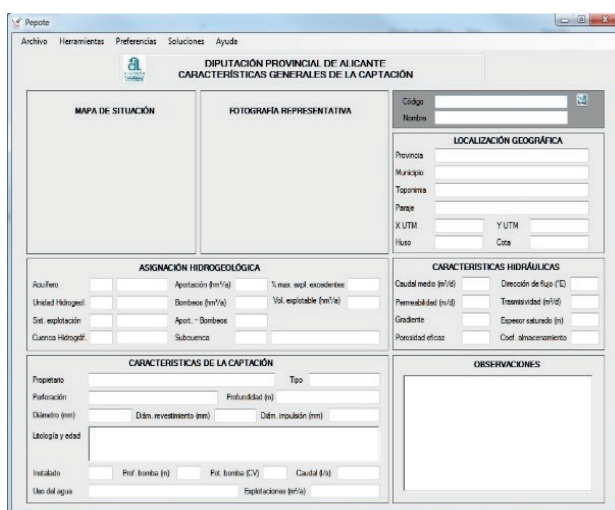


Figura a A la izquierda una vista del interfaz de usuario de la aplicación “PEPOTE”, a la derecha de la aplicación “ZAPPEL”

- La aplicación "ZAPPEL" (<https://www.brgm.fr/en/software/zappel-plotting-isochrones-catchment-area-water-well>), similar a la anterior en su concepto e interfaz, ha sido desarrollada por el BRGM francés Bureau de Recherches Géologiques et Minières). Permite delimitar el área de llamada de una captación situada sobre un acuífero poroso, así como definir isócronas. Es sencillo de usar, aunque las coordenadas de la captación deben ser expresadas en sistema Lambert.
- Diversos programas basados en ModFlow y modelos similares (VisualModFlow, Model Mouse, Feflow etc.) que facilitan la simulación del flujo y el transporte en el medio poroso mediante diferentes métodos numéricos. <https://www.waterloohydrogeologic.com/wellhead-capture-zone-source-protection-areas/>

Webs

- Wellhead Protection Area (WHPA) Model

<https://www.epa.gov/water-research/wellhead-protection-area-whpa-model>

WHPA es un programa de simulación de flujo subterráneo semi-analítico utilizado para la delimitación de zonas de captura en áreas de protección de captaciones de aguas subterráneas. Está compuesto por cuatro módulos: RESSQC, MWCAP, GPTRAC y MONTEC. WHPA es aplicable a acuíferos homogéneos que presentan flujo subterráneo bidimensional y estacionario, es adecuado para evaluar distintos tipos de acuíferos (confinados, semiconfinados y no confinados). El modelo es capaz de simular condiciones de frontera tipo barrera o río que se extienden a lo largo de toda la profundidad del acuífero. WHPA puede considerar múltiples pozos de extracción e inyección, y permite evaluar cuantitativamente los efectos de la incertidumbre en los parámetros de entrada sobre la zona de captura delimitada. Además, el programa puede utilizarse como post-procesador de modelos numéricos bidimensionales de flujo subterráneo.

Textos de hidrogeología general

- Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1979) Groundwater. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, Vol. 7632, 604.

Se trata de una obra fundamental en la hidrogeología, ampliamente reconocida por su enfoque riguroso y didáctico. Proporciona una base sólida para la comprensión de los procesos físicos que gobiernan el flujo de agua subterránea. Es una referencia clave tanto para estudiantes como para profesionales del área. Existe una versión en línea traducida al español: <https://fc79.gw-project.org/espanol/>

- Heath, R. C. (1983). **Basic Ground-Water Hydrology**. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2220. <https://pubs.usgs.gov/wsp/2220/report.pdf>

Texto general muy didáctico, es una introducción clara y accesible a los principios fundamentales de la hidrología subterránea. Publicado por el U.S. Geological Survey, combina conceptos teóricos con aplicaciones prácticas, facilitando la comprensión del comportamiento del agua subterránea en distintos contextos geológicos. Es una obra especialmente útil para estudiantes, técnicos y tomadores de decisiones en la gestión de recursos hídricos.

- La página <https://hidrologia.usal.es/temas.html> de la Universidad de Salamanca constituye una buena fuente de recursos para una formación básica en hidrogeología. El autor ha publicado el contenido de esta página en formato de un libro titulado Hidrología Superficial y Subterránea <https://hidrologia.usal.es/Libro.htm>

- P.E. Martínez Alfaro, P. Martínez Santos, S. Castaño Castaño. Fundamentos de Hidrogeología (2006). Ediciones Mundi-Prensa. 284 p. ISBN 9788484762393.

Texto de hidrogeología didáctico, está escrito en lenguaje sencillo haciendo hincapié en la aplicación práctica de los conceptos teóricos. A lo largo del texto, estructurado en cinco capítulos, se aborda el estudio de la fase externa del ciclo hidrológico, el comportamiento del agua en el subsuelo -tanto en la zona saturada como en la no saturada- los procesos que condicionan la calidad química de las aguas naturales y su contaminación como consecuencia de las actividades humanas. Finalmente se explican algunos métodos útiles para el tratamiento de datos hidrogeológicos.

Textos que profundizan en temas específicos

- Villanueva Martínez, M., & Iglesias López, A. (1984). Pozos y Acuíferos: Técnicas de Evaluación mediante ensayos de bombeo. Instituto Geológico y Minero de España. ISBN 84-7474-258-7

Referencia técnica esencial para la caracterización hidráulica de acuíferos. Aborda los principios teóricos del flujo subterráneo, el diseño y ejecución de ensayos de bombeo y su interpretación mediante modelos analíticos y gráficos. Su contenido es especialmente útil para profesionales involucrados en la gestión de recursos hídricos subterráneos y el dimensionamiento de captaciones.

- Devlin, J.F. (2020). Groundwater Velocity. The Groundwater Project.
<https://doi.org/10.21083/978-1-77470-000-6>.

Referencia en la explicación de metodologías para el cálculo de la velocidad del agua en los acuíferos, incluye tanto métodos alternativos como tecnologías clásicas.

- AIH-GE (2022) Guía de buenas prácticas para el diseño, construcción, sellado y clausura de pozos de captación de agua subterránea. ISBN: 978-84-920529-7-4
https://www.aih-ge.org/wp-content/uploads/Guia_buenas_practicas_pozos_digital.pdf

Esta guía tiene por objetivo ayudar a todas las partes que intervienen en la construcción y mantenimiento de los sondeos de abastecimiento a hacer que este tipo de obra cumpla con unos mínimos de calidad, con los que aumentar su durabilidad y su relación coste-eficiencia y con los que evitar que los pozos constituyan tanto una vía de contaminación preferencial de los acuíferos como una trampa debido al inadecuado sellado tras su abandono.

- MIMAM (2008) Las galerías drenantes en España. Análisis y selección de qanat(s). Colección: Gestión tradicional del agua, patrimonio cultural y sostenibilidad. Número 2. Hermosilla Pla, J. (editor). ISBN: 978-84-8320-453-5

El libro presenta un estudio exhaustivo sobre las galerías drenantes, también conocidas como qanat(s). El estudio abarca diversas regiones del país, con especial énfasis en las áreas mediterráneas, donde la concentración de estas galerías es notable. Se han catalogado y analizado más de 8.000 galerías, identificando 19 tipologías diferentes basadas en criterios como el origen del agua, las características constructivas y el entorno geográfico. Muchas de estas galerías se encuentran en estado de abandono o deterioro, lo que subraya la necesidad de su conservación y puesta en valor.

- Goldscheider, N., 2010. Chapter 8 Delineation of spring protection zones, pp 305-338. Book: Groundwater Hydrology of Springs. Elsevier. ISBN 9781856175029.
doi.org/10.1016/B978-1-85617-502-9.00008-6.

Destaca como aborda la delimitación de las cuencas hidrográficas de los manantiales mediante una combinación de criterios topográficos, geológicos, hidrogeológicos e hidrológicos, utilizando diversos métodos de investigación, como el balance hídrico y el uso de trazadores, tanto naturales como artificiales. Asimismo, revisa los métodos de evaluación y cartografía de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas, consistentes con el enfoque europeo y otros métodos de mapeo, así como la validación de los mapas de vulnerabilidad y las zonas de protección de las fuentes.

- Auge, M., 2007. Vulnerabilidad de acuíferos conceptos y métodos. Serie contribuciones técnicas ordenamiento territorial N° 7, Dirección de Geología Ambiental y Aplicada. SEGEMAR. ISSN 03289052

Hace una breve referencia a las definiciones, a los componentes y a los métodos más difundidos para caracterizar la vulnerabilidad del agua subterránea respecto a la contaminación y se proponen dos nuevos; uno para acuíferos libres y otro para semiconfinados.

Publicaciones sobre métodos de diseño de perímetros y métodos paramétricos de estimación de la vulnerabilidad intrínseca

Método Disco

- Alain Pochon, François Zwahlen (2002) Guide pratique Délimitation des zones de protection des eaux souterraines en milieu fissuré. Méthode des distances, méthode des isochrones, méthode DISCO Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP). Université de Neuchâtel, Centre d'hydrogéologie <https://link.springer.com/article/10.1007/s10040-008-0323-0>

Esta guía práctica establece el procedimiento a seguir para la demarcación de zonas de protección en acuíferos fisurados. La metodología propuesta contempla un primer paso de recopilación e interpretación de datos relacionados con la cuenca y el acuífero, con el fin de evaluar su vulnerabilidad y heterogeneidad. En función del resultado de esta evaluación, se sugieren distintos enfoques: el método de las "distancias" para acuíferos no vulnerables, el método de las "isócronas" para acuíferos vulnerables homogéneos (asimilables a porosos) y el método multicriterio "DISCO" para acuíferos fisurados, altamente heterogéneos y vulnerables.

Método Wyssling

- Wyssling, Lorenz (1979) Eine neue Formel zur Berechnung der Zuströmdauer (Laufzeit) des Grundwassers zu einem Grundwasser-Pumpwerk Eclogae Geologicae Helvetiae. Schweizerische Geologische Gesellschaft. DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-164843>

El documento presenta el método de Wyssling y analiza su aplicabilidad, señalando las suposiciones fundamentales necesarias para su implementación. La deducción matemática se basa en una superposición del flujo subterráneo natural, que discurre en paralelo, con el flujo centrípeto generado por la estación de bombeo. Se determina el tiempo de tránsito en función del recorrido del flujo.

Método de Jacobs y Bear

- Lallemand - Barrès, A. y Roux, J.C. 1989. Guide méthodologique d'établissement des périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine. Manuels et méthodes 33. Éditions du BRGM. Orleans, 221 pp.

En esta guía se desarrollan diversos métodos de diseño de perímetro e incluyen sus fundamentos hidrogeológicos, análisis del riesgo de contaminación, normativa legal y pautas para el diseño, vigilancia y mantenimientos de zonas protegidas.

Método EPIK

- Nathalie Doerfliger, Francois Zwahlen (Practical guide, groundwater vulnerability mapping in karstic regions (EPIK). Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL), VU-2504-E 0 SAEFL 1998. *University of Neuchâtel, Centre of Hydrogeology*.

Guía técnica elaborada en 1998 para la Oficina Federal de Medio Ambiente, los Bosques y el Paisaje (SAEFL) de Suiza. Ofrece un enfoque metodológico innovador para la delimitación de zonas de protección de aguas subterráneas en regiones kársticas. Esta metodología, conocida como método EPIK, se fundamenta en un modelo conceptual del sistema hidrogeológico kárstico y se apoya en herramientas SIG para la cartografía y evaluación de la vulnerabilidad.

- N. Doerfliger P.-Y. Jeannin F. Zwahlen. Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). *Environmental Geology* 39 (2) December 1999 7 Q Springer-Verlag.

Se presenta el método EPIK como una metodología avanzada para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos kársticos. Este método se basa en un enfoque multicriterio que integra herramientas SIG para delinear zonas de protección del agua subterránea.

Método COP

- J. M. Vías; B. Andreo; M. J. Perles; F. Carrasco; I. Vadillo · P. Jiménez (2006). Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. Application in two pilot sites in Southern Spain. *Hydrogeology Journal* (2006) 14: 912-925. [DOI 10.1007/s10040-006-0023-6](https://doi.org/10.1007/s10040-006-0023-6).

Presenta el método COP como una herramienta para evaluar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos carbonatados en regiones kársticas. Este método fue desarrollado en el marco de la Acción Europea COST 620 y se aplicó en dos acuíferos del Sur de España. Sierra de Llíbar (acuífero kárstico de flujo por conductos) y Torremolinos (acuífero fisurado con flujo difuso). Los resultados obtenidos en ambos casos se compararon con los proporcionados por otros métodos ampliamente utilizados a nivel mundial (como DRASTIC, GOD y AVI). La comparación realizada, junto con las técnicas de validación empleadas (datos hidrogeológicos y ensayo con trazadores) permitió identificar las ventajas del uso del método COP en la evaluación de acuíferos carbonáticos.

- Bartolomé Andreo, Nico Goldscheider, Iñaki Vadillo, Jesús María Vías, Christoph Neukum, Michael Sinreich, Pablo Jiménez, Julia Brechenmacher, Francisco Carrasco, Heinz Hötzl, María Jesús Perles, Francois Zwahlen, Karst groundwater protection: First application of a Pan-European Approach to vulnerability, hazard and risk mapping in the Sierra de Llíbar (Southern Spain). *Science of the Total Environment* 357 (2006) 54-73.

Presenta la primera aplicación de todos los componentes propuestos por la Acción Europea COST 620 en su enfoque para la protección del agua subterránea en medios kársticos (incluye métodos de cartografía de la vulnerabilidad intrínseca y específica, validación de los mapas de vulnerabilidad, así como cartografía de peligros y riesgos). El estudio se realizó en la Sierra de Llíbar, un sistema hidrogeológico kárstico ubicado en Andalucía, España. Se elaboraron dos mapas de vulnerabilidad específica: uno para coliformes fecales y otro para BTEX. La evaluación de la vulnerabilidad fue validada mediante ensayos de trazado, así como con métodos hidrológicos, hidroquímicos y de análisis isotópico.

Método PaPriKa

- Kavouri, K., Plagnes, V., Tremoulet, J. et al. PaPRIKa: a method for estimating karst resource and source vulnerability—application to the Ouyse karst system (southwest France). *Hydrogeol J* 19, 339-353 (2011). <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0688-8>

Metodología diseñada para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos kársticos y derivada de métodos previos como RISKE y EPIK. Esta metodología se aplica al sistema kárstico de Ouyse, ubicado en la región de Causses, en el suroeste de Francia, y constituye uno de los nueve sitios piloto donde se probó y estandarizó el método.

Método AVI

- Stempvoort, D. V., Ewert, L., & Wassenaar, L. (1993). Aquifer vulnerability index: a gis - compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Canadian Water Resources Journal / Revue Canadienne Des Ressources Hydriques*, 18(1), 25-37. <https://doi.org/10.4296/cwrj1801025>

Presenta el Índice de Vulnerabilidad del Acuífero (AVI), un método utilizado para cartografiar la vulnerabilidad del agua subterránea. Este se basa en dos parámetros clave: el espesor de cada unidad sedimentaria situada por encima del acuífero superior y la conductividad hidráulica estimada de cada una de estas capas.

Método GOD

- Foster, S. (1987) Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy: International Conference, 1987, Noordwijk Aan Zee, the Netherlands Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants. Netherlands Organization for Applied Scientific Research, The Hague, 69-86.

En este trabajo, Foster introduce y analiza los conceptos fundamentales relacionados con la vulnerabilidad de los acuíferos, el riesgo de contaminación y las estrategias de protección. Se enfoca en la necesidad de evaluar cómo las actividades humanas pueden afectar la calidad del agua subterránea, proponiendo métodos para identificar áreas más susceptibles a la contaminación. Además, discute la importancia de desarrollar estrategias de protección basadas en la comprensión de estos riesgos. Propone el método GOD un modelo paramétrico que únicamente necesita tres parámetros relacionados con la presencia y tipo de acuífero, el material que hay sobre la zona saturada y su profundidad.

Método Drastic

- Aller L., Lehr J. H., Petty R. & Bennett T. 1987 DRASTIC: A Standardized System to Evaluate Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. In: *Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water: Prevention, Detection and Restoration*, National Water Well Association, Worthington, OH, USA, pp. 38-57.

Descripción del método DRASTIC. Se trata de un método paramétrico de evaluación de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos detríticos.

Método Sintacs

- Civita, M. and De Maio, M. (1997) SINTACS Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento, Metodologia e automazione. Pitagora Ed., Bologna.

Presenta el método SINTACS, desarrollado por Civita y De Maio, para evaluar y mapear la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos frente a la contaminación. Combina siete parámetros claves en un sistema de puntuación automatizado mediante SIG. Su desarrollo supuso un avance relevante frente a modelos anteriores (como DRASTIC), elevando la precisión en contextos europeos y constituyéndose en referencia normativa en Italia.

Vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas

- Comisión Europea, Dirección General de Investigación e Innovación y Zwahlen, F., *COST Action 620 : vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers : final report*, Zwahlen, F.(editor), Publications Office, 2004.

La Acción COST se encargó de desarrollar un enfoque común europeo mejorado y coherente para la protección de las aguas subterráneas kársticas, Impulsando la creación de nuevas herramientas para facilitar la gestión de las zonas kársticas y sus recursos hídricos. El informe final está dividido en dos partes. La primera parte presenta los nuevos enfoques desarrollados conjuntamente por los Grupos de Trabajo de la Acción COST 620. Consta de siete capítulos: introducción,

vulnerabilidad de las aguas subterráneas, vulnerabilidad intrínseca, vulnerabilidad específica, mapeo de peligros, evaluación de riesgos y recopilación y validación de datos. La segunda parte presenta los métodos y aplicaciones desarrollados por los diversos equipos de investigación.

Otras publicaciones interesantes

- Domenico, P.A. and Schwartz, F.W., 1997. Physical and Chemical Hydrogeology, 2nd Ed. John Wiley & Sons, 528 pgs. ISBN 978-0-471-59762-9. Available from: Wiley.

Este libro muestra cómo aplicar los principios de la hidrogeología a diversos problemas relacionados con el suministro de agua, la contaminación y los recursos energéticos. Aborda los ensayos hidráulicos, la modelación del transporte de contaminantes, la determinación de procesos y parámetros, y la remediación. También aborda la definición y descripción de parámetros hidrogeológicos como la porosidad, la permeabilidad y el flujo en entornos continentales, marinos y sus límites.

- McWhorter, D.B. and Sunada, D.K., 1977. Ground-water hydrology and hydraulics. Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch, Colorado, 304 pgs. ISBN-13: 978-1-887201-61-2 Available from: Water Resources Publications

Manual académico, con una presentación equilibrada entre teoría y aplicaciones rigurosas, que abordan los conceptos físicos y matemáticos fundamentales del flujo subterráneo.

Legislación

- Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas. Ministerio de Medio Ambiente «BOE» núm. 176, de 24 de julio de 2001 Referencia: BOE-A-2001-14276
- Real Decreto 817/2015, de 11 de septiembre, por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental. Referencia: BOE-A-2015-9806
- Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos preliminar I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo «BOE» núm. 103, de 30 de abril de 1986 Referencia: BOE-A-1986-10638
- DIRECTIVA 2000/60/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas
- DIRECTIVA 2006/118/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 12 de diciembre de 2006 relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro
- DIRECTIVA (UE) 2020/2184 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 16 de diciembre de 2020 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano (versión refundida) (Texto pertinente a efectos del EEE)
- Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro.
- Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC)
- Guidance Document No. 16 Guidance on Groundwater in Drinking Water Protected Areas

Referencias bibliográficas

- Aller, L., T. Bennet, J. Lehr, R. Petty, and G. Hackett. 1987. *DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings*. Ada, Oklahoma: United States Environmental Protection Agency, EPA/600/2-87-035.
- Arraes, T. de M., and J. E. G. Campos. 2007. "Proposição de critérios para avaliação e delimitação de bacias hidrogeológicas." *Revista Brasileira de Geociências* 37 (1). <https://papegeo.igc.usp.br/portal/wp-content/uploads/tainacan-items/15906/46745/9289-10978-1-SM.pdf>.
- Auge, M. 1986. "Hydrodynamic Behavior of the Puelche Aquifer in Matanza River Basin." *Ground Water* 24 (5): 636-642.
- Auge, M. 2004. "Vulnerabilidad de acuíferos." *Revista Latino-Americana de Hidrogeología* 4: 85-103.s
- Baalousha, Husam. 2011. "Fundamentals of Groundwater Modelling." In *Groundwater: Modelling, Management*, edited by L. F. Konig and J. L. Weiss, 113-130. ISBN 978-1-60456-832-5.
- Bear, J. 1979. *Hydraulics of Groundwater*. New York: McGraw-Hill.
- Carbonell, A. 1993. *Groundwater Vulnerability Assessment: Predicting Relative Contamination Potential under Conditions of Uncertainty*. Washington, DC: National Research Council, National Academy Press.
- Custodio, E. 1995. "Consideraciones sobre el concepto de vulnerabilidad de los acuíferos a la polución." In *II Seminario Hispano-Argentino sobre Temas Actuales de Hidrología Subterránea, Serie Correlación Geológica* 11: 99-122. San Miguel de Tucumán.
- Daly, D., A. Dassargues, D. Drew, S. Dunne, N. Goldscheider, S. Neale, I. C. Popescu, and F. Zwahlen. 2002. "Main Concepts of the 'European Approach' to Karst-Groundwater-Vulnerability Assessment and Mapping." *Hydrogeology Journal* 10 (2): 340-345.
- Doerfliger, N., P.-Y. Jeannin, and F. Zwahlen. 1999. "Water Vulnerability Assessment in Karst Environments: A New Method of Defining Protection Areas Using a Multi-Attribute Approach and GIS Tools (EPIK Method)." *Environmental Geology* 39 (2): 165-176.
- Foster, S. 1987. "Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution, Risk and Protection Strategy." In *Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollution*, Vol. 38, edited by W. Van Duijvenbooden and H. G. Van Waegeningh, 69-86. The Hague: TNO Committee on Hydrological Research.
- Foster, S., and R. Hirata. 1991. *Determinación del Riesgo de Contaminación de Aguas Subterráneas: Una Metodología Basada en Datos Existentes*. Lima: CEPIS.
- Freeze, R. A., and J. A. Cherry. 1979. *Groundwater*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Galofré, A. 1966. "Cálculo de la transmisividad a partir de los descensos específicos." In *Estudio de los Recursos Hidráulicos Totales de las Cuencas de los Ríos Besós y Bajo Llobregat*, 7.69-7.73. Barcelona:

- Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental y Servicio Geológico de Obras Públicas.
- Gogu, R. C., V. Hallet, and A. Dassargues. 2003. "Comparison of Aquifer Vulnerability Assessment Techniques. Application to the Néblon River Basin (Belgium)." *Environmental Geology* 44: 881-892. <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0842-x>.
- Goldscheider, N. 2005. "Fold Structure and Underground Drainage Pattern in the Alpine Karst System Hochfien-Gottesacker." *Eclogae Geologicae Helvetiae* 98 (1): 1-17.
- Goldscheider, N. 2010. "Delineation of Spring Protection Zones." In *Groundwater Hydrology of Springs*, 305-338. Amsterdam: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-502-9.00008-6>.
- Guerra Chavarino, E. 2006. "Los viajes de agua de Madrid." *Anales del Instituto de Estudios Madrileños* 46: 419-446.
- López-Geta, J. A., J. M. Fornés Azcoiti, G. Ramos González, and F. Villarroya Gil. 2009. *Las Aguas Subterráneas: Un Recurso Natural del Subsuelo*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Mangin, A. 1975. *Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques*. Thèse de Doctorat d'État. Dijon. Reimpreso en *Annales de Spéléologie*, 1974-75.
- Meuli, C., and K. Wehrle. 2001. *Spring Catchment*. St. Gallen: SKAT. ISBN 3-908001-96-X.
- Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage (OFEFP). 1998. *Guide Pratique: Cartographie de la Vulnérabilité en Régions Karstiques (EPIK)*. Berne. http://guf.unibe.ch/dokugs2/CartographieKarstiques.pdf?_Publications_from_www.WATERandFISHERIES.ch.
- Ravbar, N., and N. Goldscheider. 2007. "Proposed Methodology of Vulnerability and Contamination
- Risk Mapping for the Protection of Karst Aquifers in Slovenia." *Acta Carsologica* 36 (3): 397-411.
- Vrba, J., and A. Zaporozec. 1994. *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability*. Vol. 16. Hannover: IAH, Verlag Heinz Heise.
- Zareidarmiyani, A., F. Parisio, R. Makhnenko, H. Salarirad, and V. Vilarrasa. 2021. "How Equivalent Are Equivalent Porous Media?" *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1029/2020GL089163>.
- Zaragoza, H. 2019. *La Recarga de Acuíferos: Análisis de su Estimación de Acuerdo con la Información Disponible, el Caso del Acuífero del Valle de San Juan del Río, Querétaro*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35297.94566>.
- Zwahlen, F. 2004. *Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers: Final Report, COST Action 620*. Luxembourg: European Commission Directorate-General XII, Science, Research and Development. EUR 20912.

Mapas y recursos web

- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). "Mapa de Vulnerabilidad a la Contaminación de los Mantos Acuíferos España Peninsular, Baleares y Canarias."
<https://web.igme.es/publicaciones/Consulta/Libro/2707>.
- "Mapa de Vulnerabilidad a la Contaminación a Escala 1:500.000. Atlas Geocientífico del Medio Natural de la Comunidad de Madrid."
<https://info.igme.es/catalogo/resource.aspx?portal=1&catalog=3&ctt=1&lang=deu&dlang=eng&-llt=dropdown&q=puntos%20de%20agua&master=infoigme&shdt=false&resource=7832>.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). "Mapa de Cultivos y Aprovechamientos de España. Sistema de Información Geográfica de Datos Agrarios."
<https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/sistema-de-informacion-geografica-de-datos-agrarios/mca.aspx>.



El Real Decreto 665/2023, de 18 de julio, ha introducido modificaciones significativas en el RDPH en relación con los perímetros de protección de las captaciones de agua destinadas al consumo humano, desarrollando en su anexo VIII diversas recomendaciones para la restricción de actividades dentro de dichos perímetros.

El artículo 243 ter establece la obligación de que las administraciones competentes en el abastecimiento urbano y los organismos de cuenca establezcan los perímetros de protección de todas las captaciones de agua destinadas al consumo humano incluidas en el Registro de Zonas Protegidas, al que se refiere el artículo 99 bis del TRLA, siempre que suministren un volumen medio de al menos 10 metros cúbicos diarios o abastezcan a más de 50 personas.

El presente documento tiene como finalidad orientar a las administraciones competentes en el abastecimiento urbano, a los organismos de cuenca, a las administraciones hidráulicas y a los operadores sobre la metodología de diseño de los perímetros de protección, con el objetivo de garantizar el cumplimiento de la normativa vigente y asegurar una adecuada protección de las captaciones de agua subterránea destinadas al consumo humano.