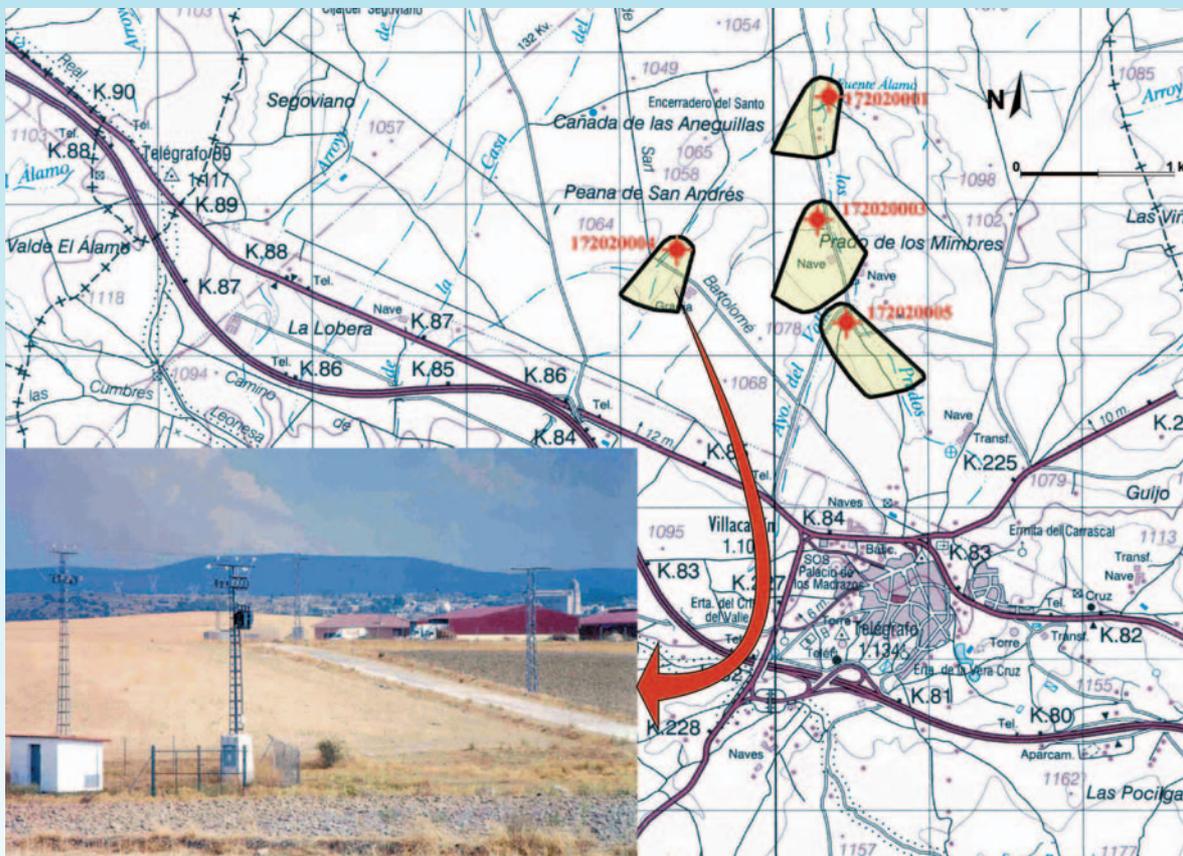


Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación al territorio.



Autores: Carlos Martínez Navarrete
Álvaro García García



MINISTERIO
DE CIENCIA
Y TECNOLOGÍA



Instituto Geológico
y Minero de España

Perímetros de protección para captaciones de
agua subterránea destinada al consumo humano.
Metodología y aplicación al territorio.

Autores:
Carlos Martínez Navarrete
Álvaro García García

IGME. MADRID, 2003

Serie: HIDROGEOLOGÍA Y AGUAS SUBTERRÁNEAS

MARTÍNEZ NAVARRETE, CARLOS

Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación al territorio/

Martínez Navarrete Carlos, García García Álvaro – Madrid: IGME, 2003 (Hidrogeología y Aguas subterráneas; 10)

282 P.; 21X29,7 cm.

I.S.B.N.: 84-7840-496-1

1 Aguas subterráneas. 2 Perímetro protección. 3 Abastecimiento urbano. I. García García, Álvaro. II Instituto Geológico y Minero de España.

556

EDITOR

Carlos Martínez Navarrete
Doctor en Ciencias Geológicas.

Las opiniones expresadas en el presente libro son de responsabilidad exclusiva de sus autores y no coinciden necesariamente con las del Instituto Geológico y Minero de España.

Ninguna parte de este libro puede ser reproducida o transmitida en cualquier forma o por cualquier medio, electrónico o mecánico, incluido fotografías, grabación o por cualquier sistema de almacenar información sin el previo permiso escrito de los autores y del editor.

Portada: Captación de abastecimiento a la localidad de Villacastín (Segovia) y perímetros de protección propuestos en la misma.

*Créditos fotografías: 1 - 13 Carlos Martínez Navarrete
14 Virginia Polytechnic Institute and State University
<http://www.research.ut.edu/resmag/scienceco/extremecells.html>*

©INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA
C/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid
Web: <http://www.igme.es>

I.S.B.N.: 84-7840-496-1
N.I.P.O.: 405-03-018-6
Depósito Legal: M-50.013-2003

DISEÑO GRÁFICO: Álvaro García García
Fotocomposición: Inforama, S.A. - Príncipe de Vergara, 210 - 28002 MADRID
Imprime: Iberdraphi 2002, S.L.L. Mar Tirreno, 7 bis. 28830 SAN FERNANDO DE HENARES Madrid

AGRADECIMIENTOS

La edición del presente libro, síntesis del análisis metodológico realizado en el Instituto Geológico y Minero de España referente a la delimitación e implementación en el territorio de los perímetros de protección para captaciones de aguas subterráneas destinadas al consumo humano, ha sido posible gracias a los consejos, ayudas y sugerencias efectuadas durante todas las etapas de su elaboración por Juan Antonio López Geta, Director de Hidrogeología y Aguas Subterráneas del IGME, José Antonio Fernández Sánchez, Jefe del Área de Estudios Hidrogeológicos del IGME y Pedro Emilio Martínez Alfaro, Catedrático de Hidrogeología del Departamento de Geodinámica de la Universidad Complutense de Madrid.

Hay que destacar asimismo las numerosas aportaciones efectuadas por Francisco Carrasco Cantos, Profesor Titular del Área de Geodinámica del Departamento de Ecología y Geología de la Universidad de Málaga, y Fermín Villarroya Gil, Profesor Titular del Departamento de Geodinámica de la Universidad Complutense de Madrid.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1ª PARTE	
2. DELIMITACIÓN DE PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO EN DIVERSOS PAÍSES. SÍNTESIS DEL MARCO LEGAL, ESTRATEGIA DE PROTECCIÓN Y METODOLOGÍA EMPLEADA.	7
2.1. Delimitación de perímetros de protección en Alemania.....	8
2.2. Delimitación de perímetros de protección en Francia.....	9
2.3. Delimitación de perímetros de protección en el Reino Unido.....	11
2.4. Delimitación de perímetros de protección en Irlanda.....	12
2.5. Delimitación de perímetros de protección en Bélgica.....	13
2.6. Delimitación de perímetros de protección en Holanda.....	13
2.7. Delimitación de perímetros de protección en Italia.....	15
2.8. Delimitación de perímetros de protección en Portugal.....	16
2.9. Delimitación de perímetros de protección en Dinamarca.....	17
2.10. Delimitación de perímetros de protección en Suiza.....	19
2.11. Delimitación de perímetros de protección en Estados Unidos.....	20
2.12. Delimitación de perímetros de protección en Canadá.....	21
2.13. Delimitación de perímetros de protección en Australia.....	22
3. ANÁLISIS DEL MARCO LEGAL ESPAÑOL REFERENTE A LA DELIMITACIÓN DE PERÍMETROS DE PROTECCIÓN	23
3.1. Los perímetros de protección de captaciones de abastecimiento urbano en la legislación.....	23
3.2. Efectividad de la regulación de actividades en el ámbito del perímetro de protección.....	27
3.3. Análisis crítico del encuadre legal de los perímetros de protección "de la cantidad" en las captaciones de abastecimiento urbano.....	29
4. CRITERIOS PARA ESTABLECER UN ORDEN DE PRIORIDAD ENTRE DIFERENTES MUNICIPIOS EN LA ELABORACIÓN DE PERÍMETROS DE PROTECCIÓN. EJEMPLO DE APLICACIÓN EN LA PROVINCIA DE ALICANTE	31
4.1. Criterios para establecer un orden de prioridad en la elaboración de perímetros de protección.....	31
4.1.1. Vulnerabilidad intrínseca.....	31
4.1.2. Focos potenciales de contaminación.....	31
4.1.3. Población fija y estacional.....	32
4.1.4. Situación actual del abastecimiento.....	32
4.1.5. Situación socioeconómica del municipio.....	33
4.1.6. Coste del estudio e implantación de cada perímetro de protección.....	33
4.2. Orden de prioridad en la elaboración de los perímetros de protección de los municipios de la provincia de Alicante y coste estimativo.....	34
5. APROXIMACIONES MATEMÁTICAS PARA DEFINIR EL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y EL TRANSPORTE DE SOLUTOS EMPLEADAS PARA DELIMITAR PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO URBANO	39

2ª PARTE

6. PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO URBANO EN MEDIOS CON POROSIDAD INTERGRANULAR O ASIMILABLES EN SU FUNCIONAMIENTO A LOS MISMOS. EJEMPLO DE SU APLICACIÓN EN UN ACUÍFERO DETRÍTICO EN LA LOCALIDAD DE VILLACASTÍN (SEGOVIA)	45
6.1. Análisis de la información requerida para definir la protección a establecer en las captaciones de abastecimiento urbano.....	45
6.2. Zonación de los perímetros de protección.....	46
6.3. Métodos para la delimitación de los perímetros de protección de la calidad.....	50
6.3.1. Métodos hidrogeológicos.....	51
6.3.2. Método de análisis del sistema de flujo combinado con el cálculo del tiempo de tránsito.....	51
6.3.3. Método del radio fijo calculado: Ecuación volumétrica y Método de la recarga.....	56
6.3.4. Método del radio fijo calculado. Función del descenso.....	59
6.3.5. Método de Wyssling.....	61
6.3.6. Análisis del sistema de flujo combinado con la ecuación de flujo uniforme.....	68
6.3.7. Método de Jacobs y Bear.....	71
6.3.8. Método de solución analítica simple para la aproximación a isocronas que definen zonas de transporte.....	74
6.3.9. Método de Krijgsman y Lobo Ferreira.....	76
6.3.10. Método de Rehse para el cálculo del poder depurador de los materiales.....	81
6.3.11. Modelos matemáticos. Aplicación de los programas Visual MODFLOW y Visual MODPATH.....	83
6.3.12. Modelos analíticos: WhAEM-2000.....	87
6.3.12.1. Evolución y estado actual.....	87
6.3.12.2. Delimitación de zonas de protección mediante la utilización del WhAEM200.....	89
6.3.13. Método de Hoffman y Lillich.....	90
6.3.14. Método de Albinet.....	91
6.3.15. Nomograma de Van Waegeningh y Van Duijvenboden.....	92
6.3.16. Nomógrafo de Pettyjon.....	94
6.3.17. Método de Horsley.....	96
6.4. Comparación de los perímetros de protección de la calidad obtenidos aplicando diferentes métodos.....	97
6.4.1. Zona de los perímetros de protección de la calidad definida empleando un tiempo de tránsito de 1 día y la obtenida mediante otros criterios alternativos.....	100
6.4.2. Zona de los perímetros de protección de la calidad definida empleando un tiempo de tránsito de 50 días y la obtenida mediante otros criterios alternativos.....	101
6.4.3. Zona de los perímetros de protección de la calidad definida empleando un tiempo de tránsito de 4 años y la obtenida mediante otros criterios alternativos.....	107
6.4.4. Zona de los perímetros de protección de la calidad definida empleando un tiempo de tránsito de 25 años y la obtenida mediante otros criterios alternativos.....	112
6.5. Propuesta final de perímetros de protección de la calidad.....	115
6.6. Establecimiento de planes de emergencia y sistemas de vigilancia.....	119
6.7. Análisis metodológico para la protección del recurso hídrico en cantidad.....	121
6.8. Propuesta final de protección de la cantidad en los sondeos de abastecimiento.....	124
6.9. Propuesta de modificaciones legales relativas a los perímetros de protección de la calidad y a la protección del recurso hídrico en cantidad en las captaciones de abastecimiento urbano.....	132
6.9.1. Propuesta de contenido de una norma parcial para otorgamiento de autorizaciones y concesiones en el acuífero captado para abastecimiento.....	132
6.9.2. Propuesta de modificaciones legales relativas a los perímetros de protección de la calidad.....	134

7. PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO URBANO EN MEDIOS KÁRSTICOS. MÉTODOS Y CONSIDERACIONES ESPECÍFICAS	137
7.1. Vulnerabilidad de las captaciones en medios kársticos.....	138
7.1.1. Procesos kársticos.....	140
7.1.2. Consecuencias de los procesos kársticos en la vulnerabilidad del agua subterránea.....	140
7.1.3. El papel de la cubierta de protección y las condiciones de infiltración.....	141
7.1.4. Características del epikarst.....	142
7.2. Método EPIK.....	142
7.2.1. Principios y etapas en la aplicación del método multiparamétrico EPIK.....	143
7.2.1.1. Evaluación de los parámetros E, P, I y K.....	143
7.2.1.2. Cálculo del Índice de Protección F.....	148
7.2.1.3. Delineación de las zonas de protección.....	150
7.2.1.4. Ajuste del método y verificación.....	151
7.3. Método PI.....	151
7.4. Método COP.....	156
7.5. Empleo de otros índices de vulnerabilidad. Consideraciones acerca de su idoneidad.....	156
7.5.1. Índice DRASTIC.....	156
7.5.2. Índice SINTACS.....	160
7.5.3. Índice GOD.....	160
7.5.4. Métodos aplicados en Irlanda.....	160
7.6. Análisis de la precisión obtenida al emplear diferentes métodos de vulnerabilidad.....	162
7.7. Empleo de trazadores.....	163
7.7.1. Trazadores artificiales.....	163
7.7.2. Trazadores naturales.....	164
7.7.3. Ensayos de trazado.....	164
7.7.4. Interpretación de los ensayos con colorantes.....	165
8. PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO URBANO EN MEDIOS FISURADOS. MÉTODOS Y CONSIDERACIONES ESPECÍFICAS	173
8.1. Metodología para la protección de captaciones en medios fisurados aplicada en Suiza.....	178
8.1.1. Características de los medios fisurados.....	178
8.1.2. Metodología para la delimitación de las zonas de protección en medio fisurado.....	179
8.1.2.1. Toma de datos de base. Evaluación de la vulnerabilidad de la captación.....	180
8.1.2.2. Adquisición de datos complementarios para las captaciones vulnerables. Evaluación del grado de heterogeneidad del acuífero.....	182
8.1.2.3. Delimitación de las zonas de protección para las captaciones vulnerables según el método adecuado al grado de heterogeneidad del acuífero.....	185
8.1.3. Delimitación de zonas de protección en acuíferos fisurados asimilables a medios continuos equivalentes.....	186
8.1.4. Método de cartografía multicriterio "DISCO". Delimitación de las zonas de protección en acuíferos fisurados fuertemente heterogéneos.....	187
8.2. Metodología para la delimitación de perímetros de protección en medios fracturados basada en la definición de contornos de probabilidad para determinar el riesgo de impacto al medio ambiente.....	191
8.3. Método de Bolsenkötter.....	195
9. PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO URBANO EN ACUÍFEROS CONFINADOS. MÉTODOS Y CONSIDERACIONES ESPECÍFICAS	197
9.1. Consideraciones acerca de los acuíferos confinados.....	197
9.2. Características de un acuífero confinado.....	198
9.2.1. Geología.....	198
9.2.2. Características hidrológicas.....	198
9.3. Determinación de la existencia y grado de confinamiento de un acuífero.....	199
9.3.1. Aproximación geológica.....	199

9.3.2. Aproximación hidrogeológica.....	199
9.3.3. Aproximación hidroquímica.....	200
9.3.3.1. Análisis de la composición química del agua.....	200
9.3.3.2. Datación de las aguas.....	200
9.3.4. Diferenciación cuantitativa entre acuíferos confinados y semiconfinados.....	203
9.4. Delimitación de perímetros de protección de una captación en medios confinados.....	203
9.4.1. Criterios hidrodinámicos para la delimitación de perímetros de protección en acuíferos confinados.....	203
9.4.2. Métodos para el cálculo de áreas de protección de captaciones en acuíferos confinados.....	204
9.4.2.1. Para el cálculo de áreas de protección con gradiente despreciable.....	204
9.4.2.2. Cálculo del área de protección con gradiente regional significativo.....	206
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	209

3ª PARTE

ANEXO I: Análisis de la información requerida para definir la protección a establecer en las captaciones de abastecimiento urbano. Ejemplo de su aplicación en un acuífero detrítico en la localidad de Villacastín (Segovia).....	221
1. Situación geográfica.....	221
2. Marco geológico.....	221
2.1. Litoestratigrafía.....	221
2.2. Tectónica.....	224
3. Socioeconomía.....	224
3.1. Población.....	224
3.2. Actividad socioeconómica del municipio.....	225
4. Marco hidrogeológico.....	225
5. Hidrogeología del entorno de Villacastín.....	228
5.1. Acuífero del Terciario detrítico.....	228
5.2. Captaciones en materiales graníticos.....	234
6. Problemática del abastecimiento a la población.....	240
6.1. Infraestructura del abastecimiento.....	240
6.2. Necesidades de agua para abastecimiento.....	244
7. Vulnerabilidad del acuífero frente a la contaminación.....	245
7.1. Inventario de focos potenciales de contaminación.....	245
7.2. Vulnerabilidad de las diferentes zonas.....	254
8. Planeamiento urbanístico.....	255
ANEXO II: Perdurabilidad de la contaminación en el agua subterránea.....	259
Perdurabilidad de la contaminación bacteriológica.....	259
Perdurabilidad de la contaminación química.....	269

1. INTRODUCCIÓN

El abastecimiento humano mediante la captación de aguas subterráneas tiene una gran importancia en numerosos países de Europa, llegando a suponer en algunos casos la práctica totalidad del agua utilizada para este fin, como se indica en la tabla 1.

En España el abastecimiento procede de agua subterránea en un 19 % de las poblaciones mayores de 20.000 habitantes y de un 70 % en las menores de 20.000 habitantes (Ministerio de Medio Ambiente, MIMAM, 2000).

La protección de las captaciones de abastecimiento urbano se realiza principalmente mediante el esta-

blecimiento de perímetros de protección. Éstos pueden definirse como un área en torno a una captación en la cual, de forma graduada, se restringen o prohíben las actividades o instalaciones susceptibles de contaminar las aguas subterráneas o que afecten al caudal realmente aprovechado para el abastecimiento a la población (Moreno Merino *et al.*, 1991).

Los resultados obtenidos tras delimitar perímetros de protección de captaciones de abastecimiento urbano durante décadas en numerosos países (Alemania, Francia, Reino Unido, Holanda, Dinamarca, Estados Unidos y Australia entre otros muchos), indican que constituyen un sistema eficaz para encontrar un compromiso entre una protección adecuada y suficiente del recurso y el respeto, en la medida de lo

Tabla 1: Abastecimiento con aguas subterráneas.

		PAÍS	POBLACIÓN ABASTECIDA
EUROPA	UNIÓN EUROPEA	Alemania ¹	73,3 %
		Austria ²	99,3 %
		Dinamarca ³	99 %
		España ⁴	30 %
		Finlandia ⁵	61,2 %
		Francia ⁶	56,4 %
		Grecia ²	63 %
		Holanda ⁷	65%
		Irlanda ⁸	20-25 %
		Italia ²	80,3 %
		Luxemburgo ²	69 %
		Portugal ²	79,9 %
	Reino Unido ⁹	33 %	
	Suecia ²	49 %	
	OTROS	Islandia ²	84,1 %
Noruega ²		13 %	
República Checa ²		44 %	
Suiza ¹⁰		80 %	
EUROPA (media)			70 %
Otros países	Estados Unidos ¹¹		37 %

Fuente: (1) BMU, 2003; (2) Agencia Europea de Medio Ambiente, 1999; (3) GEUS, 1997; (4) López Geta *et al.*, 2001; (5) SYKE, 2001; (6) Ministère de la santé, de la famille et des personnes handicapées, 1998; (7) WOB, 2000; (8) GSI, 2000; (9) Environment Agency, 2002; (10) Von Gunten, 2000; (11) USGS, 2002

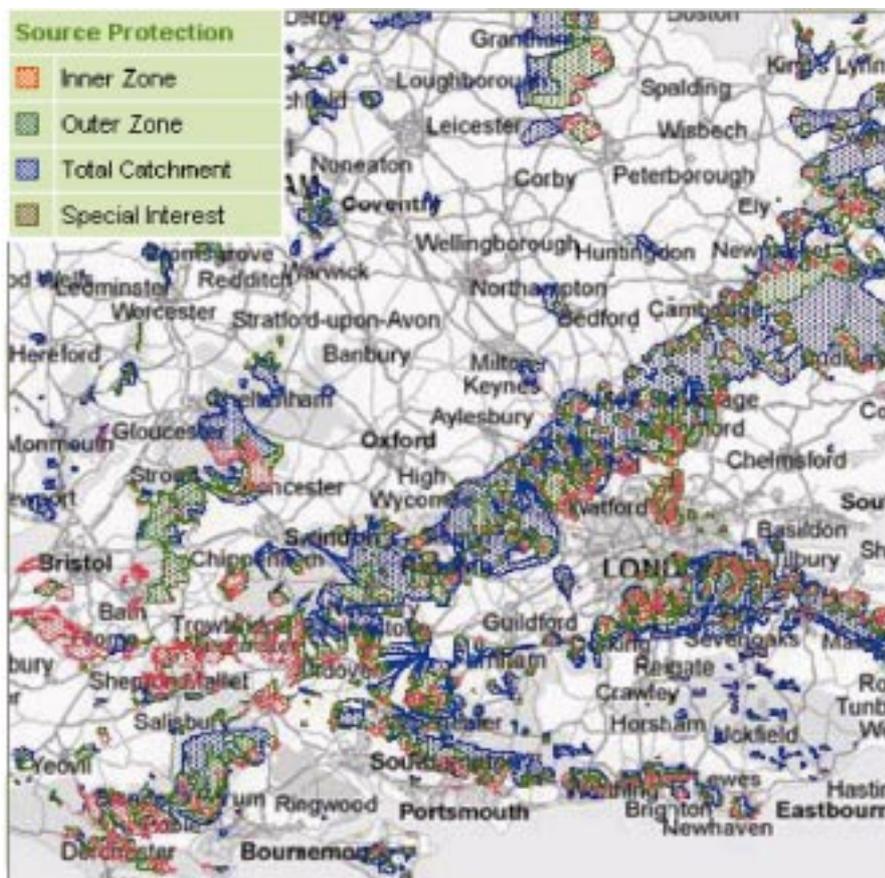
posible, de la actividad socioeconómica de la región circundante.

En su conjunto los perímetros de protección en los países con mayor tradición en su aplicación abarcan una amplia superficie, así en Alemania, pionera en este campo, suponen el 20 % de la extensión total del país (Vorreger, 1998), en Holanda ocupan un 4% de la superficie del territorio nacional con una extensión de 140.000 ha (Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment, 1994). En el Reino Unido se han implantado de manera efectiva más de 1.500 zonas de protección de captaciones (Environment Agency, 1998). Las zonas incluidas en el ámbito de un perímetro de protección pueden ser consultadas en el portal de Internet de la Environment Agency al haberse incluido en un sistema de información geográfica la totalidad de los perímetros de protección establecidos en Inglaterra y Gales. Como ejemplo se indican en la figura 1 los perímetros de protección definidos en el sudeste de Inglaterra. Esta situación de aplicación de las normas de protección del agua subterránea de manera efectiva sobre el terreno contrasta con la situación existente en nuestro país.

En España la aprobación final por la Junta de Gobierno del Organismo de cuenca de los perímetros de protección de captaciones de abastecimiento urbano propuestos desde 1985, su inclusión en los Planes Hidrológicos de cuenca y la implantación real en el terreno de las restricciones a la calidad así como las referentes a la cantidad del recurso que conllevan, es muy reducida.

Hay que resaltar, no obstante, que los perímetros de protección de las aguas minerales y termales si tienen una implementación en el territorio notable. Estos perímetros se regulan por una legislación específica y presentan una problemática y metodología propia, que no es objeto de este trabajo.

Los motivos de la escasa implantación en nuestro país de los perímetros de protección de captaciones de abastecimiento urbano son variados. Entre otros cabe destacar su impreciso tratamiento legal, los conflictos competenciales entre las diferentes administraciones (estatal, autonómica y local) involucradas, y las consecuencias socioeconómicas de su aplicación a los municipios afectados.



Fuente: Environment Agency, 2003

Figura 1: Zonas de los perímetros de protección definidos en el sureste del Reino Unido.

A estos factores hay que añadir una falta de coordinación y armonización de los sistemas de delimitación, al no existir una metodología que trate conjuntamente todos los aspectos legales, técnicos, y sociales involucrados, que unifique criterios y subsane las deficiencias detectadas. Por último, pero no menos importante, cabe destacar la escasa concienciación pública ante los problemas de contaminación, al ser relativamente reciente el interés de la sociedad española por el medio ambiente.

Al estructurar este trabajo se ha optado por analizar en primer lugar el marco legal referente a la delimitación de perímetros de protección de captaciones de abastecimiento urbano en España, su tratamiento en diversos países, los criterios que pueden emplearse para establecer un orden de prioridad entre diferentes municipios en su implantación regional y las principales características de las aproximaciones matemáticas que permiten definir el flujo de agua subterránea y el transporte de solutos empleadas para delimitarlos.

En la segunda parte se analiza la metodología aplicable a la delimitación de perímetros de protección de la calidad y en la protección del recurso hídrico en cantidad en las captaciones de abastecimiento urbano, analizándose los diferentes métodos aplicables según las características del material captado (con porosidad intergranular o asimilable en su funcionamiento al mismo, kárstico o fisurado).

Para ello se ha empleado como hilo conductor la metodología propuesta para medios con porosidad intergranular, seleccionándose para ello su aplicación a un acuífero detrítico no consolidado, dadas sus características, que los hacen especialmente indi-

cados para la delimitación de perímetros de protección, la amplia extensión que tienen en España y las numerosas poblaciones ubicadas en los mismos.

La metodología se ilustra con los resultados de su aplicación a las captaciones de abastecimiento urbano de la localidad de Villacastín que, presenta características y problemática adecuadas a su generalización a otras zonas.

El desarrollo efectuado corresponde al análisis de la información requerida para definir la protección a establecer en las captaciones de abastecimiento urbano, zonación y métodos aplicables para la determinación de perímetros de protección de la calidad, la comparación de los resultados obtenidos empleando diferentes métodos (hidrogeológicos, analíticos, modelos matemáticos) para evaluar su precisión, la propuesta final de perímetro de protección a establecer así como el análisis y aplicación de la metodología para la protección del recurso hídrico en cantidad.

Estos aspectos técnicos se complementan con una propuesta de modificaciones legales relativa a los perímetros de protección de la calidad y a la protección del recurso hídrico en cantidad en las captaciones de abastecimiento urbano que colabore a subsanar las actuales deficiencias e indefiniciones y aumentar su implementación real en el territorio.

La metodología desarrollada para los medios con porosidad intergranular se completa con el análisis de los métodos y consideraciones específicas aplicables a los medios kársticos, a los fisurados, así como a los acuíferos confinados en apartados específicos del trabajo.

1ª PARTE

2. DELIMITACIÓN DE PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO EN DIVERSOS PAÍSES. SÍNTESIS DEL MARCO LEGAL, ESTRATEGIA DE PROTECCIÓN Y METODOLOGÍA EMPLEADA

Las reglamentaciones existentes respecto a la delimitación de "zonas de protección" para captaciones de agua subterránea y las normas o estándares utilizados para ello son muy dispares en los diferentes países en que se utiliza esta figura para la protección de la calidad y, en algunos casos, de la cantidad de agua subterránea destinada al abastecimiento humano.

Así, las diferencias en el tratamiento de las zonas de protección se reflejan no sólo en la existencia de éstas en la legislación nacional, siendo competencia en determinados casos de las legislaciones provinciales o estatales al tratarse de estados de tipo federado, con competencias descentralizadas en algunos casos, sino en el número de zonas a establecer, las exigencias mínimas en las dimensiones de éstas que cada país, estado o región exige y las actividades e

instalaciones que quedan prohibidas, restringidas o sujetas a autorización dentro de cada una de las zonas de protección que se establecen en el interior del perímetro y la relación de estas actividades e instalaciones que se indican. Esta disparidad se pone de manifiesto ya desde un primer momento al comparar el nombre que se otorga a cada zona, y que en muchos casos indican el objetivo para el que se han delimitado (protección absoluta, respeto, protección bacteriológica...).

En los apartados siguientes se analiza la normativa existente en diferentes países (Tabla 2) considerados como representativos de la diversidad existente, y el tratamiento que se da a la figura del *perímetro de protección* o figuras análogas a ella, los criterios propuestos para la delimitación y la metodología utilizada en cada país junto con las prohibiciones y/o restricciones que se consideran para las zonas en los casos más representativos.

Se adjunta un esquema simplificado de la norma aplicada en cada uno y una figura explicativa de las zonas que se tienen en cuenta en aquellos casos que ésta es representativa de la generalidad de las zonas establecidas en cada país.

Tabla 2: Delimitación de perímetros de protección en diversos países.

PAÍS	PERÍMETROS DE PROTECCIÓN INCLUIDOS EN LA LEGISLACIÓN	ZONACIÓN ESPECÍFICA INCLUIDA EN LA LEGISLACIÓN	REGULACIÓN DE ACTIVIDADES EN LA LEGISLACIÓN NACIONAL
ALEMANIA	NACIONAL	ESTATAL	ESTATAL
FRANCIA	NACIONAL	NACIONAL	NACIONAL
REINO UNIDO	NACIONAL	NO	NO
IRLANDA	NACIONAL	NACIONAL	PROVINCIAL
BÉLGICA	NACIONAL	PROVINCIAL	PROVINCIAL
HOLANDA	NACIONAL	NACIONAL	PROVINCIAL
ITALIA	NACIONAL	NACIONAL	NACIONAL
PORTUGAL	NACIONAL	NACIONAL	NACIONAL
DINAMARCA	NACIONAL	NACIONAL	NACIONAL
SUIZA	NACIONAL	NACIONAL	NACIONAL
ESTADOS UNIDOS	NACIONAL	NO	NO
CANADÁ	PROVINCIAL	PROVINCIAL	PROVINCIAL
AUSTRALIA	ESTATAL-TERRITORIAL	ESTATAL-TERRITORIAL	ESTATAL-TERRITORIAL

2.1. Delimitación de perímetros de protección en Alemania

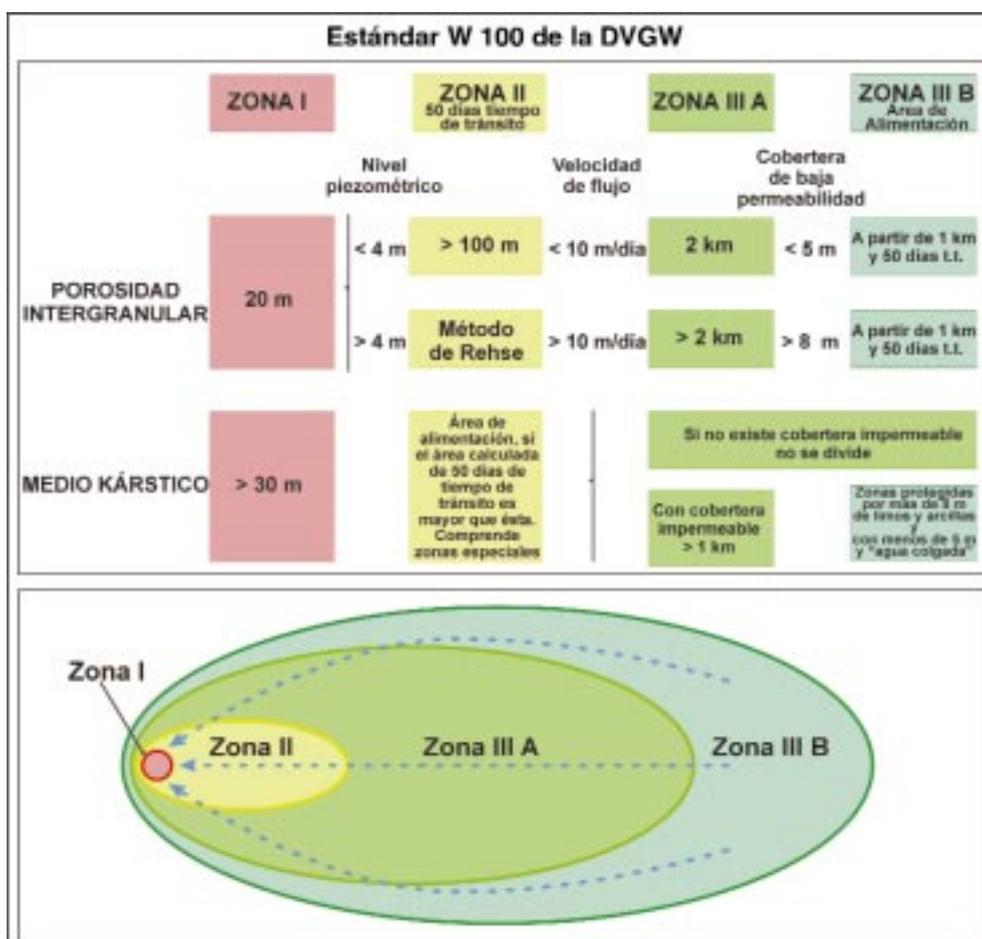
En Alemania (Umweltbundesamt, 2002; IUSCOMP, 2002; BMU y Umweltbundesamt, 2001) se contempla dentro de la legislación marco el establecimiento de *Áreas de Agua Protegida* para captaciones de abastecimiento, recogidas en la última formulación de la Ley Federal del Agua (Wasserhaushaltsgesetz, WHG, BGBl. I p. 1695, de 12 de noviembre de 1996, enmendada en 2000 y 2001), en su artículo 19 en la Ordenanza del Agua Subterránea, de 18 de marzo de 1997. Esta legislación marco es de obligado cumplimiento por parte de los Estados Federados, debiendo cada uno de ellos promulgar sus propias leyes territoriales sobre aguas para desarrollar la mencionada legislación marco y tienen la obligación de llevar a cabo el establecimiento de las *Áreas de Agua Protegida* y la imposición de las sanciones correspondientes a los infractores de las regulaciones que se imponen en estas zonas.

Dentro de la legislación marco no se especifican las zonas en las que debe dividirse cada *Área de Agua Protegida* siendo los estados federados los que han de desarrollar en cada caso legislaciones que dicten

las dimensiones de cada una de las zonas y en su caso la metodología que se ha de aplicar.

Generalmente la delimitación de las *Áreas de Agua Protegida* se lleva a cabo mediante la aplicación del Estándar W 101 (cuadro 1) elaborado por la Asociación Técnica Alemana del Gas y el Agua (DVGW, 1995), que ha sido aceptado por todos los Estados Federados. En este estándar se propone la delimitación de tres zonas con diferentes restricciones (I, II y III), aunque, según los casos, se puede considerar la posibilidad de subdividir la última de éstas en zona IIIA y zona IIIB.

Este estándar toma en consideración, para llegar a la propuesta de delimitación de las zonas, el tipo de acuífero que se trata (con porosidad intergranular o asimilable y kárstico o asimilable), la profundidad del nivel piezométrico, la velocidad de flujo del agua subterránea y la posible existencia de una cobertera de baja permeabilidad por encima del acuífero así como su espesor. Con todos estos datos se determinan los tamaños de cada una de las zonas de protección que están comprendidos entre los siguientes valores (ver cuadro 1):



Cuadro 1: Desarrollo del estándar W 101 para delimitación de perímetros de protección en Alemania.

- Zona I (Campo del pozo): siempre mayor de 20 m.
- Zona II (Zona estrecha): mayor de 100 m o 50 días de tiempo de tránsito (zona de alimentación en acuíferos kársticos).
- Zona IIIA (Zona ancha): a partir de 2 km.
- Zona IIIB (Zona ancha): zona de alimentación, siempre mayor de 1 km y 50 días de tiempo de tránsito.

El estándar W 101 propone así mismo un listado de actividades prohibidas o sujetas a restricciones que es desarrollado en cada caso por cada uno de los Estados Federados, por ejemplo en Baviera (Jedlitschka, 1994). Los requerimientos mínimos son los siguientes:

– **Zona I.** Se prohíbe: todo tipo de tráfico; agricultura, horticultura y silvicultura; uso de fertilizantes y pesticidas; todas las actividades prohibidas en la Zona II.

– **Zona II.** Se prohíbe: construcción y ampliación de edificios comerciales e industriales y las reformas; carreteras, vías férreas y otras instalaciones de transporte y sus reformas; transporte de sustancias contaminantes o radiactivas; almacenamiento de combustibles; abonos; criaderos de ganado y elevado número de cabezas; contenedores de abono, almacén de abonos sólidos o silos; almacenamiento de fertilizantes y pesticidas químicos; transporte de aguas residuales; instalación o extensión de drenes; drenaje de aguas de lluvia procedentes de tejados o carreteras u otros sistemas de transporte sobre el terreno; transformadores y líneas eléctricas con fluidos de refrigeración o aislantes; baño y acampada; todas las actividades prohibidas en la Zona III.

– **Zona III.** Se prohíbe:

- En la zona **III A:** manipulación de sustancias contaminantes, excepto en pequeñas cantidades para uso doméstico y almacenamiento de combustible para uso doméstico y agrícola; transformadores y líneas eléctricas con líquidos refrigerantes o aislantes soterrados; alcantarillado, excepto el absolutamente necesario; descarga de aguas residuales en el terreno que fluyan hacia la Zona II; monocultivos y cultivos especiales, jardines; asentamientos, edificios residenciales y otros edificios a menos que todas las conducciones, incluyendo las de saneamiento, se encuentren fuera de la zona; desarrollo y ampliación de cementerios; mercados, ferias, festivales y otros acontecimientos fuera de recintos acondicionados y carreras de vehículos de motor; gasolineras; almacenes de material de construcción; producción de minerales y rocas; excava-

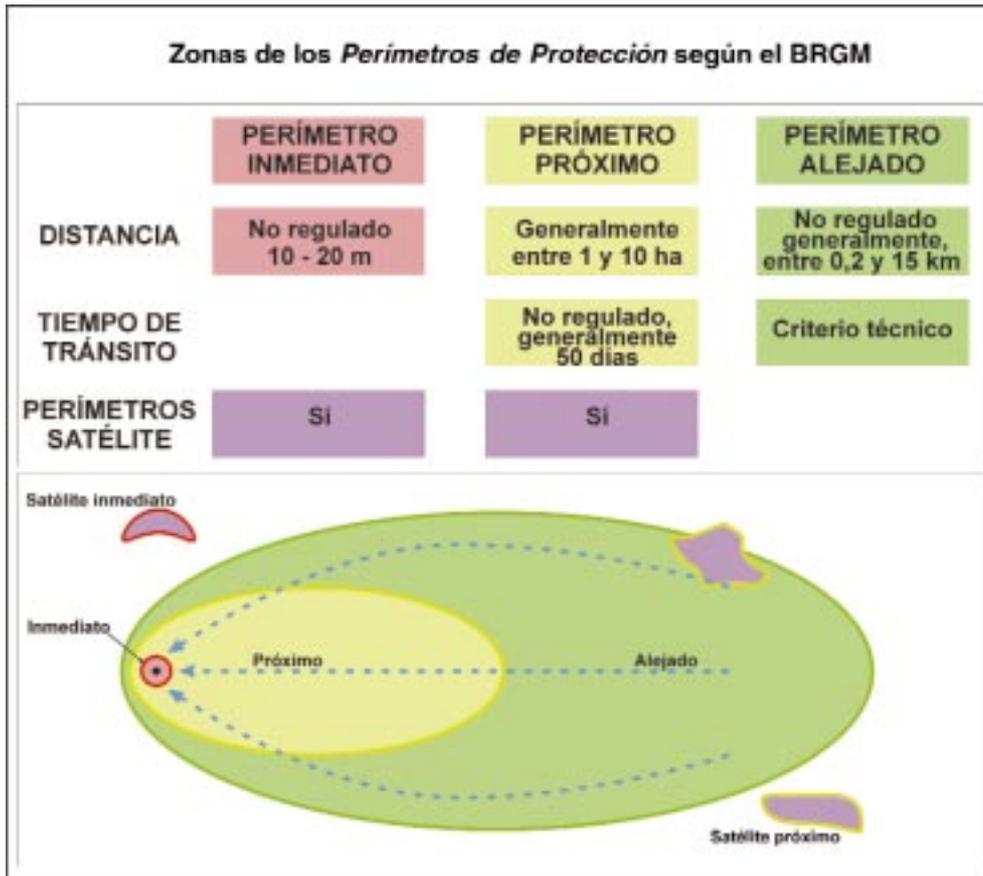
ciones, excepto las destinadas a las instalaciones existentes y obras civiles, así como voladuras y perforaciones; desarrollo y ampliación de áreas de agua artificiales (estanques...); todas las actividades incluidas en la Zona III B.

- En la zona **III B:** asentamientos industriales, especialmente los que conlleven el uso o almacenamiento de sustancias contaminantes y radiactivas (refinerías, plantas químicas, acerías, almacenamiento de sustancias químicas...); alcantarillados, incluyendo desagües para tormentas, excepto que se revisen regularmente; construcción o ampliación de depuradoras a menos que sea para mejorar la protección del agua; liberación de aguas residuales al terreno; plantas de tratamiento, manipulación, almacenamiento y depósito de residuos sólidos, restos de automóviles, chatarra y neumáticos, almacenamiento de residuos de centrales térmicas e incineradoras y escombreras de canteras y minas si el lixiviado puede afectar al agua subterránea; uso agrícola y silvícola, excepto si no afecta a la calidad del agua subterránea; aeropuertos y lugares de manipulación y clasificación de carga; uso de materiales que puedan ser lavados y producir lixiviados (escombros, residuos de incineradoras...); aguas de tormenta procedentes de carreteras y otros sistemas de transporte excepto drenaje de diques y sistemas de distribución extensos; minería y producción de petróleo y gas, desarrollo de instalaciones subterráneas de almacenamiento de contaminantes y almacenamiento de carbón o residuos mineros; extracción de rocas y minerales; producción de energía térmica; instalaciones militares y deportivas; campos de tiro y golf; áreas residenciales.

Normalmente en la aplicación al terreno de las limitaciones a las actividades que consideran cada uno de los Estados Federados se lleva a cabo una política de indemnizaciones e incentivos a las personas que se puedan ver afectadas por las mismas, en especial con agricultores (Gamel y Urban, 2001) para reducir los impactos que producen los abonos, fertilizantes y pesticidas que se utilizan de manera común.

2.2. Delimitación de perímetros de protección en Francia

En Francia (cuadro 2) la protección de las captaciones de agua para abastecimiento humano se basa en la Ley 64-1245, de 16 de diciembre de 1964, relativa al régimen del agua y a la lucha contra la contaminación, que establece la obligatoriedad de elaborar perímetros de protección para todas las nuevas captaciones de abastecimiento; el Decreto del Minis-



Cuadro 2: Recomendaciones del BRGM para delimitación de perímetros de protección en Francia.

terio de Salud 89/3, relativo al agua de consumo humano y sus circulares de aplicación de 24 de julio de 1990 y de 8 de enero de 1993; y en la Ley del Agua 92/3, en su artículo 13.1 que indica la obligación del establecimiento de un perímetro de protección en un plazo de 5 años para todas aquellas captaciones que no tengan una protección natural.

En esta legislación se regula que los *Perímetros de Protección* constarán de tres zonas (*inmediata, próxima y alejada*), aunque mediante el decreto 89/3 se indica también la posibilidad de establecer *perímetros satélite* fuera de las zonas comúnmente definidas. La propuesta de delimitación de los perímetros de protección en Francia se debe de llevar a cabo siempre por un *hidrogeólogo agregado* (experto), mediante estudio geológico, hidrogeológico y de evaluación de la vulnerabilidad y de los riesgos de contaminación existentes.

El perímetro de protección viene determinado por el acto de declaración de utilidad pública de los trabajos de extracción de agua destinada al consumo colectivo humano, tomándose las tres zonas ya señaladas en las que, en cada caso, se reglamentarán y/o prohibirán determinadas instalaciones que puedan afectar a la calidad del agua. Una vez esta-

blecidos los límites del perímetro de protección, éste se declarará mediante Decreto del Consejo de Estado previo sometimiento al Consejo Departamental de Higiene y en determinados casos al Consejo Superior de Higiene Pública de Francia.

En el perímetro inmediato se prohibirán todas las actividades y será necesario que sea vallado, en el perímetro próximo se prohibirán las actividades que puedan dejar el agua no apta para consumo humano y se regularán otras actividades y en el perímetro alejado se tendrán en cuenta, según la naturaleza del terreno, las actividades que pueden ser peligrosas para la calidad del agua.

En el acto de declaración de un perímetro de protección, se han de tener en cuenta las indemnizaciones que correspondan a los ocupantes del terreno declarado de protección como consecuencia de las medidas que se tomarán para la protección del agua. Éstas se determinan mediante las reglas de expropiación por causa de utilidad pública.

En el cuadro 2 se indican las dimensiones generalmente aplicadas para la delimitación de los perímetros de protección en Francia según el Servicio Geológico Francés (Lallemand-Barrés y Roux, 1999).

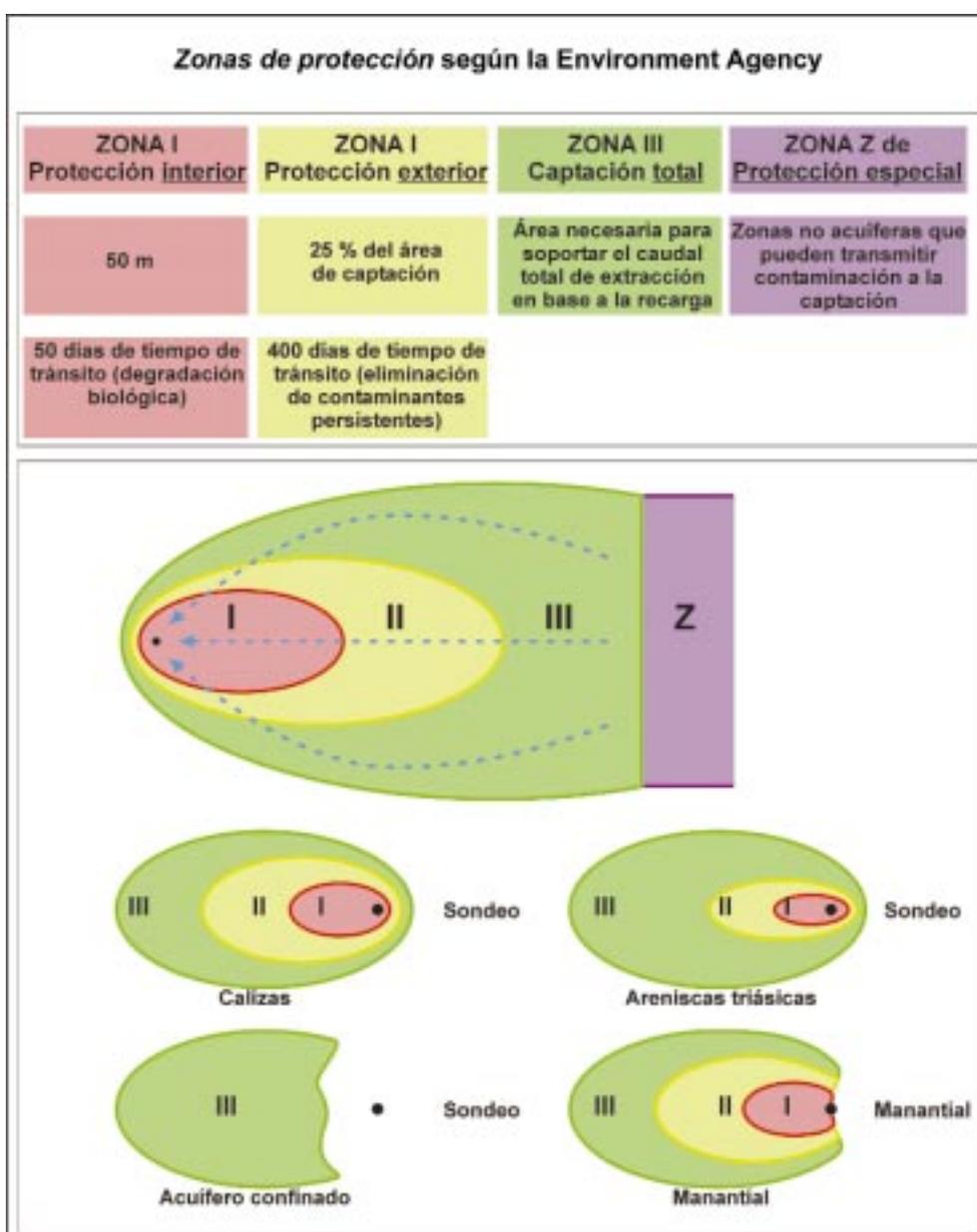
2.3. Delimitación de perímetros de protección en el Reino Unido

En el Reino Unido la protección de las aguas subterráneas está recogida en la Ley de Recursos Hídricos (Water Resources Act), de 1991, que tiene por objeto la regulación general de la calidad y cantidad del recurso hídrico, y por la Ley del Medio Ambiente (Environment Act), de 1995, que enmienda a la anterior y crea la Environment Agency otorgándole competencias, en Gales e Inglaterra, para el control y la protección de la calidad del agua y para la conservación de los usos del recurso.

Está establecido en la Ley de Recursos Hídricos que la agencia puede solicitar el establecimiento de

Zonas de Protección del Agua al Gobierno (además de *Áreas Sensibles a los Nitratos*).

La Environment Agency es un órgano consultivo que tiene competencia en materia de medio ambiente en su conjunto que delimita *Zonas de Protección de Captaciones* (Source Protection Zone), que carecen de carácter normativo, según el marco técnico que la propia agencia ha establecido (Environment Agency, 1998). Estas medidas técnicas desarrolladas por la Environment Agency (cuadro 3) contemplan el establecimiento de tres zonas de protección (*I ó de Protección Interior, II ó de Protección Exterior y III ó de Captación Total*) que se delimitarán en función de las características hidrogeológicas del acuífero y de la dirección del flujo del agua subterránea. Además



Cuadro 3: Delimitación de perímetros de protección en el Reino Unido.

también se propone la posibilidad del establecimiento de *zonas Z* o de *interés especial* que eventualmente podrían llegar a transmitir contaminación a la captación que se está tratando de proteger.

Además de la existencia de las tres zonas se considera por parte de la Environment Agency que las dimensiones de las zonas de protección no tienen que ser siempre similares y por tanto propone diferencias para cuatro situaciones hidrogeológicas diferentes de la captación de abastecimiento combinadas con el tipo de captación (sondeo o manantial), en las que incluso se puede llegar a no definir las primeras zonas si el contexto es propicio para ofrecer una protección natural a la captación (acuífero confinado).

Las actividades que se podrán controlar y restringir en cada una de las zonas se dividen en ocho categorías que son: control de los caudales de extracción (protección cuantitativa); modificaciones físicas de los acuíferos y del flujo del agua subterránea; vertidos de residuos sobre el terreno; contaminación del terreno; vertidos de efluentes líquidos y aguas residuales; vertidos a estratos del subsuelo; contaminación difusa del agua subterránea y resto de actividades que puedan representar una amenaza para la calidad del agua. Todas ellas quedan reflejadas en el documento "Policy and Practice for the Protection of Groundwater" que determina el modo de actuar para el establecimiento de perímetros.

2.4. Delimitación de perímetros de protección en Irlanda

En Irlanda (DELG, EPA y GSI, 1999; Daly, 2002), se han promulgado en el año 1999 reglamentaciones para la protección del agua subterránea y para el desarrollo de leyes a escala local para combatir la contaminación de origen agrícola. Asimismo, en mayo de 1999 el Servicio Geológico de Irlanda, la Agencia de Protección del Medio Ambiente, el Departamento de Medio Ambiente y los gobiernos locales han desarrollado conjuntamente una metodología para la elaboración de *Esquemas de Protección del Agua Subterránea* de cada condado con el objetivo de proteger los recursos de agua subterránea en los mismos y específicamente las captaciones de abastecimiento a poblaciones.

Cada plan establece (Daly y Misstear, 2001) un mapa con las diferentes *Zonas de Protección del Agua Subterránea* de todo el condado, definidas en base al análisis de la importancia de los acuíferos y al análisis de la vulnerabilidad natural del agua subterránea ante la contaminación, complementado con informes específicos de protección de las captaciones de

abastecimiento y matrices específicas para cada contaminante. Éstas indican la regulación a establecer para la actividad contaminante contemplada según la importancia de los acuíferos y los materiales del mismo así como las diferentes zonas de protección del agua subterránea de las captaciones de abastecimiento en función de la vulnerabilidad de los materiales. Se han elaborado hasta el momento las matrices correspondientes a los vertederos, al abono con residuos orgánicos y a sistemas de aguas residuales para casas aisladas.

Las *Áreas de Protección de las Captaciones* se subdividen normalmente en dos zonas. La *Zona de Protección Interna*, destinada a proteger contra la contaminación bacteriológica, se define como una distancia arbitraria de 300 m o mediante un radio fijo calculado en función de un tiempo de tránsito de 100 días. La *Zona de Protección Externa* se define como una distancia arbitraria de 1000 m, o alternativamente como el área requerida para proporcionar un volumen de recarga suficiente, obtenida mediante el radio fijo calculado: método de la recarga, o delimitando la zona de alimentación de la captación.

Las restricciones contempladas en las matrices elaboradas para cada actividad contaminante, por lo que respecta a las áreas de protección de las captaciones, son las siguientes:

MATRIZ DE RESTRICCIONES PARA VERTEDEROS		
GRADO DE VULNERABILIDAD	ÁREAS DE PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES	
	Interna	Externa
Extremo	R4	R4
Alto	R4	R4
Moderado	R4	R4
Bajo	R4	R3 ¹

R3¹: Generalmente no aceptable a menos que se demuestre que: el agua subterránea en el acuífero es confinada, o no hay un impacto significativo en el agua subterránea y no es posible una ubicación alternativa en una zona de menor riesgo.

R4: no aceptable.

MATRIZ DE RESTRICCIONES PARA ABONO CON RESIDUOS ORGÁNICOS		
GRADO DE VULNERABILIDAD	ÁREAS DE PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES	
	Interna	Externa
Extremo	R4	R4
Alto	R4	R2 ¹
Moderado	R3 ²	R2 ¹
Bajo	R3 ²	R2 ¹

R2¹: aceptable sujeto a una carga máxima de nitrógeno orgánico (incluyendo el depositado por los animales pastando) que no exceda de 170 kg/ha/año.

R3²: generalmente no aceptable a menos que no haya una ubicación alternativa disponible y exista evidencia que demuestre que no se producirá contaminación.

R4: no aceptable.

MATRIZ DE RESTRICCIONES PARA SISTEMAS DE AGUAS RESIDUALES PARA CASAS AISLADAS		
GRADO DE VULNERABILIDAD	ÁREAS DE PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES	
	Interna	Externa
Extremo	R3 ²	R3 ¹
Alto	R2 ¹	R2 ¹
Moderado	R2 ¹	R2 ¹
Bajo	R2 ¹	R1

R1: aceptables sujetos a buenas prácticas (selección del sistema, construcción, operación y mantenimiento conforme a las normas de la Agencia de Protección Medioambiental).

R2³: aceptable sujeto a buenas prácticas, y las siguientes condiciones adicionales:

Espesor mínimo de 2 m de suelo no saturado por debajo de la zanja de percolación o fosa séptica.

La autoridad debe asegurar que la calidad del agua subterránea de la captación no se verá alterada con las casas existentes por acumulación de nitratos o contaminantes microbiológicos.

R2⁴: aceptable sujeto a buenas prácticas, los requerimientos indicados para R2³ y la siguiente condición adicional:

No se establecerá ningún sistema de tratamiento a menos de 60 m de captaciones de abastecimiento urbano o industrial.

R3¹: No aceptable generalmente a menos que: la fosa séptica convencional se instale con un espesor mínimo de 2 m de zona no saturada por debajo de la zona de percolación; la autoridad asegure que la calidad del agua subterránea de la captación no se verá alterada con las casas existentes por acumulación de nitratos o contaminantes microbiológicos. Además no se establecerá ningún sistema de tratamiento a menos de 60 m de captaciones de abastecimiento urbano o industrial y debe acordarse un mantenimiento y gestión con el suministrador del sistema.

R3²: No aceptable generalmente a menos que el sistema de tratamiento, diferente de las fosas sépticas, con los requisitos indicados por la Agencia Medioambiental, se instale con un espesor mínimo de 1,2 m de zona no saturada y cumpla las condiciones indicadas en el epígrafe precedente.

2.5. Delimitación de perímetros de protección en Bélgica

En Bélgica (Lallemand-Barrés y Roux, 1999) las *Zonas de Protección* de captaciones de abastecimiento están contempladas a nivel nacional en la Ley Federal, de 26 de marzo de 1971, relativa a la protección de las aguas subterráneas (B.S. de mayo de 1971) modificada por el Reglamento/Decreto Ley de 30 de julio de 1992 (B.S. de 29 de agosto de 1992) y la Ley Federal de 9 de julio de 1976, relativa a la regulación de la explotación de un área destinada a la obtención de agua (B.S. de 28 de agosto de 1976), aunque las administraciones competentes en materia de aguas subterráneas responsables del establecimiento de las zonas de protección son los Gobiernos Regionales mediante sus propios decretos, decisiones ejecutivas y circulares.

Así la legislación concerniente a las zonas a establecer en un perímetro de protección varían en

cada región, aunque en todos los casos se definen tres zonas, que son determinadas mediante diversos criterios y denominadas de manera diferente, e incluso en algún caso se pueden considerar subdivisiones de las mismas, en función del objetivo de protección que plantean y de los criterios que se consideran.

Se presentan en el cuadro 4 las zonas contempladas en las legislaciones de las tres regiones: Flamenca, Valona y Bruselas y los aspectos más importantes considerados para cada zona, en los casos en los que se introducen criterios de delimitación (características del medio, tipo de acuífero) junto con la representación esquemática de las zonas que se consideran en la Región Flamenca.

En este caso la regulación de actividades, prohibición, condicionamientos y licencias, dependen en cada caso de la administración regional por lo que no existe una norma unificada.

2.6. Delimitación de perímetros de protección en Holanda

La protección de las captaciones de agua subterránea en Holanda, cuadro 5, (Van Waegeningh, 1981; Ministry of Housing, Spatial planning and Environment, 1994; Van Put, 2001) está regida a nivel nacional por dos leyes que son: la Ley de Protección del Suelo, de 1996, enmendada y la Ley de Gestión Medioambiental, de 1 de marzo de 1993.

Previo a la Ley del Suelo sólo se llevaba a cabo la protección a nivel provincial de pequeñas zonas para evitar la contaminación mediante agentes patógenos y ocasionalmente de zonas mayores para la eliminación de contaminantes persistentes.

En la Ley del Suelo se desarrollaban dos niveles de protección de los que el primero era una *protección general* con el objetivo de proteger y asegurar los usos del suelo mediante leyes y otras regulaciones a nivel nacional, y el segundo correspondía a una *protección especial* estableciendo una protección adicional y desarrollando las figuras del *Área de Protección del Suelo* y el *Área de Protección de las Aguas Subterráneas*.

Las *Áreas de Protección de las Aguas Subterráneas*, de acuerdo con esta legislación eran consideradas responsabilidad de las provincias, tanto en su delimitación como en su implementación sobre el terreno y cumplimiento de las restricciones y actividades impuestas en las zonas. El establecimiento de estas áreas de protección podía considerarse en algún caso de carácter temporal hasta la consecución de una protección general suficiente a nivel nacional.



Cuadro 4: Delimitación de perímetros de protección en Bélgica.



Cuadro 5: Delimitación de perímetros de protección en Holanda.

El primer estadio de la aplicación de esta ley tenía en cuenta únicamente la protección a establecer para las captaciones de abastecimiento público, aunque en alguna provincia se tuvieron en cuenta también las zonas en las que se preveía el establecimiento futuro de captaciones. Este estadio concluyó con el establecimiento de las áreas de protección para todas las captaciones existentes.

La Ley de Gestión Medioambiental modifica la anterior mediante la sustitución de las *Áreas de Protección de Aguas Subterráneas* por *Áreas de Protección Medioambiental* que extienden sus objetivos de protección incluyendo en ellas la protección de rasgos ecológicos y áreas de silencio y que se recogerán en una única ordenanza provincial. Además de esto, se produce por la aplicación de esta ley una transferencia de competencias a los municipios para el otorgamiento de nuevas licencias, aunque existe una problemática entre los éstos y las provincias al ser éstas las responsables de la protección del agua.

En Holanda de manera general se realiza una zonificación (cuadro 5) que viene dada por un criterio de tiempo de tránsito del agua dentro del acuífero que asegure diferentes objetivos. De manera general se establecen tres zonas de restricciones (*captación o extracción, protección I y protección II*), pero el número de zonas depende de la litología existente, que provoca grandes diferencias en los flujos, y por tanto en las zonas kársticas o fisuradas las zonas de

protección I y II se agrupan en una sola que se le otorga un máximo de un radio fijo de 2 km. En algunas provincias se definen zonas mayores de 50 ó 100 años de tiempo de tránsito que se asimilan al área de alimentación o recarga.

La regulación de actividades dentro de las zonas en estas áreas se hace mediante la promulgación de ordenanzas provinciales que prohíben todas las actividades de alto riesgo en las zonas de captación y de protección.

2.7. Delimitación de perímetros de protección en Italia

En Italia se establece la necesidad de crear *Áreas de Salvaguarda de los Recursos Hídricos* que afectan a las aguas subterráneas mediante el Decreto del Presidente de la República n. 236, (AmbienteDiritto.it, 2003). Estas áreas de salvaguarda se deben llevar a cabo por las autoridades competentes, que son los gobiernos regionales, y su objetivo es mantener y mejorar las características *cualitativas* de las aguas destinadas al consumo humano, si bien en el desarrollo de los artículos se hace referencia a la *protección cuantitativa* en la segunda de las zonas.

La legislación italiana es muy concreta en cuanto a las zonas que se deben definir en torno a la captación destinada a abastecimiento (cuadro 6), y si



Cuadro 6: Delimitación de perímetros de protección en Italia.

bien propone como en la mayoría de los países tres zonas (*protección absoluta, respeto y protección*), contempla la posibilidad de subdividir la segunda en función del riesgo de contaminación y vulnerabilidad característica de la zona (*respeto restringido y alargado*). Los criterios para la delimitación de estas zonas que recoge la legislación corresponden únicamente a la imposición de un radio mínimo que puede ser ampliado en función de los estudios realizados.

Además, la legislación italiana define claramente para cada zona cuales son las actividades que se han de prohibir y cuales son las que han de estar sometidas a regulaciones. Éstas son:

- **Zona de protección absoluta:** Prohibida toda actividad excepto actividades de operación de la captación.
- **Zona de respeto:**
 - Prohibición de: vertido de lodos y aguas residuales; almacenamiento de pesticidas y fertilizantes; uso de sustancias químicas, pesticidas y fertilizantes (o al menos restringido); vertido de aguas de escorrentía urbana al subsuelo; cementerios; excavaciones en zonas comunicadas con el acuífero; nuevos pozos que puedan producir afectaciones a la calidad y/o cantidad del agua; vertederos; almacenamiento de productos o sustancias químicas peligrosas y sustancias radiactivas; fábricas de vehículos, talleres y desguaces; pozos de infiltración; pasto y estabulación de ganado que produzca más de 170 kg/ha día de nitrógeno en los efluentes.
 - Regulación por las regiones o provincias autónomas de: alcantarillados; construcciones residenciales y urbanización; obras viarias, vías férreas e infraestructuras de servicio en general; la práctica agrícola y el plan de utilización de fertilizantes y pesticidas antes establecidas.
- **Zona de protección:** Limitaciones y prescripciones para instalaciones civiles, productivas, turísticas, agroforestales y zootécnicas.

2.8. Delimitación de perímetros de protección en Portugal

En Portugal el Decreto-Ley n.º 382/99 de 22 de septiembre promulgado por el Ministerio de Medio Ambiente (Krigisman y Lobo Ferreira, 2001; ESTIG, 2003) sobre el establecimiento de Perímetros de Protección dice específicamente que "*Un instrumento preventivo para asegurar la protección de las aguas subterráneas es la institución de perímetros de pro-*

tección de las captaciones de aguas subterráneas destinadas al abastecimiento público".

Éste indica que la delimitación de los perímetros se realiza recurriendo a métodos hidrogeológicos apropiados teniendo en cuenta los caudales de explotación y las condiciones de captación y características del sistema acuífero. Todo ello debe atender a los aspectos económicos de la zona, por la imposición de restricciones de uso del terreno.

La delimitación se lleva a cabo por las Direcciones Regionales de Medio Ambiente siendo la aprobación de los perímetros competencia del Gobierno a través del Consejo de Ministros.

En este texto legal se especifican las dimensiones mínimas que han de tener las zonas de los perímetros que se delimitan, habitualmente tres (*inmediata, intermedia y alargada*) con la posibilidad de establecer zonas adicionales de *protección especial* y de *protección contra la intrusión de la cuña salina* (cuadro 7). Se recomienda en caso de que no exista otro método más preciso la aplicación del cálculo de un radio fijo mínimo para las zonas, en función del tiempo de tránsito y en función de la litología que presenta el acuífero, distinguiéndose hasta 6 tipos de acuíferos.

Además se especifican detalladamente las actividades que están sujetas a prohibición en cada una de las zonas que se establezcan, así como las indemnizaciones que sean necesarias para la aplicación de las restricciones.

Estas prohibiciones y condicionamientos en las zonas de protección son:

- En la zona de **Protección Inmediata** están prohibidas todas las actividades excepto las de conservación y mejora de la captación.
- En la zona de **Protección Intermedia** se pueden prohibir o restringir: para evitar la contaminación: pastoreo; usos agrícolas y pecuarios; aplicación de pesticidas móviles y persistentes; edificaciones; carreteras y ferrocarriles; cámpings; instalaciones deportivas; depuradoras; colectores de aguas residuales; fosas sépticas; instalaciones industriales; cementerios; canteras y excavaciones; explotaciones mineras; embalses y obras o excavaciones destinadas almacenamiento de aguas u otras sustancias que se puedan infiltrar; depósitos de chatarra.

Se prohíben: infraestructuras aeronáuticas; estaciones de servicio; depósitos de materiales radioactivos, hidrocarburos y de residuos peligrosos; transporte de hidrocarburos, materiales radioacti-

Zonas Protección en la legislación de Portugal				
	Inmediata	Intermedia t=50 días	Alargada t=3.500 días	Especial
Confinado poroso	20 m	Entre 40 m y n	Entre 350 m y n	
Libre poroso	40 m	Entre 60 m y n	Entre 500 m y n	
Semiconfinado poroso	30 m	Entre 50 m y n	Entre 400 m y n	
Carbonatado	60 m	Entre 280 m y n	Entre 2.400 m y n	
Igneo y metamórfico fisurado	60 m	Entre 140 m y n	Entre 1.200 m y n	
Igneo y metamórfico poco fisurado o alterado	40 m	Entre 60 m y n	Entre 50 m y n	

$$r_i(t) = \sqrt{\frac{Q \cdot t}{\pi \cdot n_c \cdot b}}$$

Cuadro 7: Delimitación de perímetros de protección en Portugal.

vos o de otras sustancias peligrosas; canalizaciones de productos tóxicos; lixiviados y residuos sanitarios.

- En la zona de **Protección Alargada** se pueden prohibir o condicionar: uso de pesticidas móviles y persistentes; colectores de aguas residuales; fosas sépticas; embalses y obras o excavaciones destinadas al almacenamiento de aguas u otras sustancias que se puedan infiltrar; depuradoras; cementerios; canteras y explotaciones mineras, infraestructuras aeronáuticas; estaciones de servicio; depósitos de chatarra.

Se prohíben depósitos de materiales radioactivos, hidrocarburos y de residuos peligrosos; transporte de hidrocarburos, materiales radioactivos o de otras sustancias peligrosas; canalizaciones de productos tóxicos; refinerías e industrias químicas; lixiviados y residuos sanitarios.

- En la zona de **Protección Especial**, se prohíbe cualquier actividad e instalación.
- En las zonas de **Protección contra el avance de la cuña salina**, se pueden limitar los caudales de explotación y prohibir la concesión de autorizaciones para la realización de nuevas captaciones.

2.9. Delimitación de perímetros de protección en Dinamarca

En Dinamarca la protección de las aguas subterráneas está regulada por tres leyes a nivel nacional (Andersen y Thomsen, 1994; Danish Environmental Agency, 2003), que son: la Ley Consolidada de Abastecimiento de Agua, de 26 de febrero de 1999, y sus enmiendas; la Ley Consolidada de Protección Medioambiental, de 15 de julio de 1997, y sus enmiendas; y la Ley de Emplazamientos de Depósito de Residuos, de 13 de junio de 1990.

Se establecen dos tipos de planes para la administración del agua, los *Planes de Recursos Hídricos* que corresponden a los consejos regionales y establecen las líneas maestras para el uso del agua y su protección, con la delimitación de *Áreas Prioritarias* en las que la protección es necesaria debido a la vulnerabilidad que presentan, y los *Planes de Abastecimiento de Agua* que corresponden a los consejos locales para coordinar los abastecimientos.

La planificación del consejo regional decidirá si se debe tener en cuenta la protección de zonas de captación y de agua subterránea. Además se llevará a cabo la delimitación de las áreas de interés para el

abastecimiento, las áreas vulnerables y las áreas prioritarias.

Se establece asimismo en la Ley Consolidada de Abastecimiento de Agua que parte de las tasas cobradas por el abastecimiento, competencia del consejo local, sean destinadas a la protección del recurso en la medida en que la monitorización y protección de éste sea considerada necesaria.

En la Ley Consolidada de Protección Medioambiental se establece la posibilidad de establecer un *Área de Protección*, por parte de los consejos regionales, en la que "... no se llevarán a cabo actividades y no existirán sustancias, productos ni materiales susceptibles de contaminar el agua".

El Ministerio de Medio Ambiente es el responsable de fijar en cada área el grado de restricción aplicable a ciertas actividades potencialmente contaminantes que se reflejan en esta ley, aunque el consejo regional tiene la potestad de establecer restricciones en mayor o menor grado a otras actividades potencialmente contaminantes.

La delimitación de los perímetros de protección es responsabilidad del Ministerio de Medio Ambiente a través de Servicio Geológico Dinamarca y Groenlandia (GEUS). En los perímetros de protección delimitados en Dinamarca (cuadro 8) se distingue una zonación realizada en base al establecimiento de

radios fijos o la toma en consideración del tiempo de tránsito del agua en el acuífero, que incluye dos zonas de protección (*zona estrecha* y *zona sanitaria*) considerando la primera como protección contra los vertidos peligrosos y el uso de pesticidas y la segunda como protección contra las aguas residuales de alcantarillado.

Además de estas dos zonas se han elaborado guías y recomendaciones para la localización de futuras zonas de vertido y otros focos potenciales de contaminación.

Hasta el momento actual se ha llevado a cabo un programa de definición de *Proyectos Prioritarios de Focos de Contaminación y Aguas Subterráneas* con el objetivo de establecer e implementar procedimientos generales relativos a la gestión y protección del agua en cantidad y calidad. Además dentro de estas actuaciones se ha elaborado un modelo matemático de los recursos de agua de la totalidad del país utilizando el programa MIKE SHE, empleando celdas de 1 km² y una discretización vertical de 7 a 9 capas considerando así la geología, el flujo dinámico y el tipo de contaminante entre otros (Sorensen y Refsgaard, 2001). Partiendo de ese modelo a escala nacional se realizan submodelos regionales (Henriksen *et al.*, 1997) con un mallado menor que permiten simular el transporte de contaminantes empleándose como herramienta para ubicar los futuros pozos de abastecimiento, analizar el rango de con-



Cuadro 8: Delimitación de los perímetros de protección en Dinamarca.

taminación de los pozos existentes y establecer zonas de protección en torno a las captaciones de abastecimiento urbano.

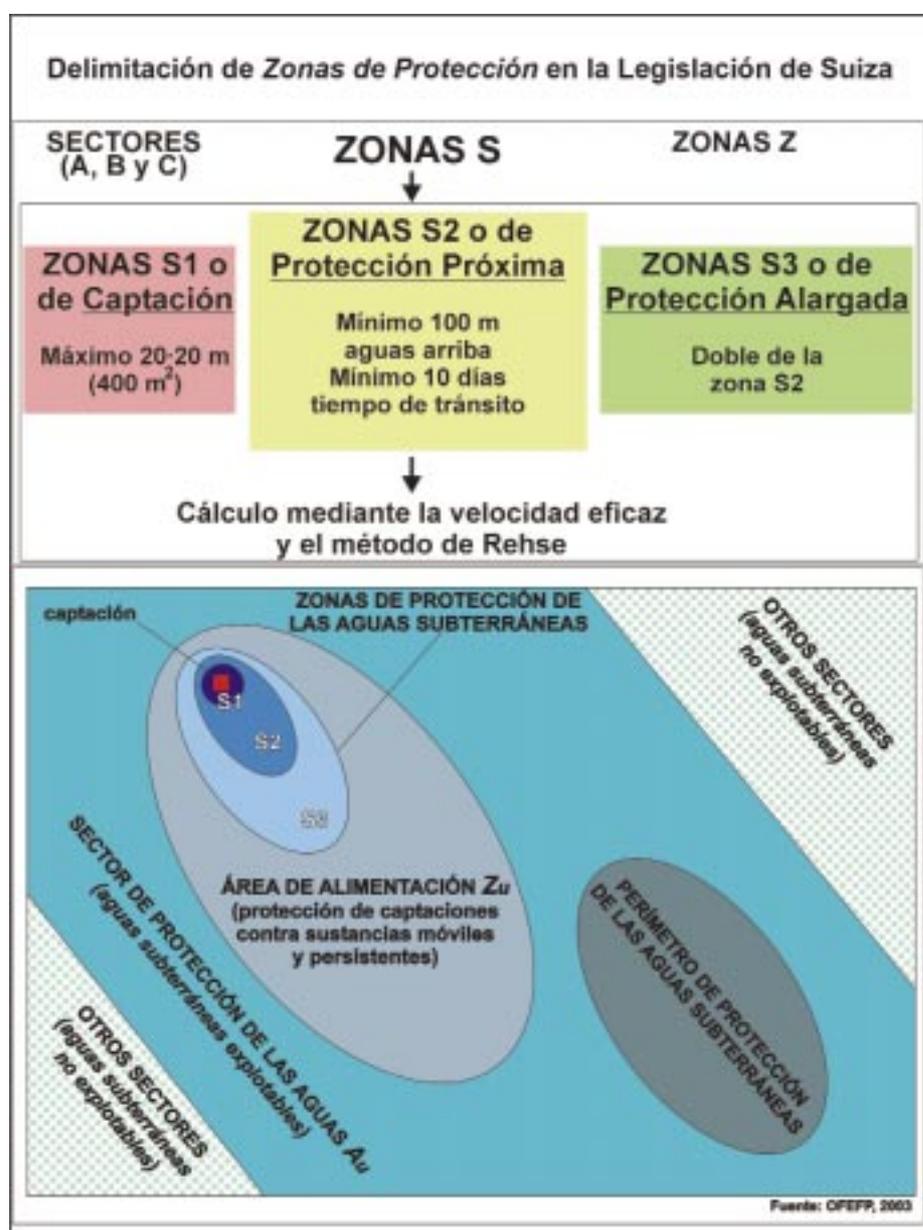
2.10. Delimitación de perímetros de protección en Suiza

En Suiza (OFEFP, 1998; OFEFP, 2002; Confoederatio Helvetica, 2003) se establece la exigencia de delimitación de *Zonas de Protección de Aguas Subterráneas* mediante la Ley de Protección de las Aguas (LEaux, RS 814.20), de 24 de enero de 1991 (modificada el 24 de diciembre de 1999), para la protección de las captaciones de agua potable de interés público contra la contaminación. Así mismo, la Ordenanza sobre la Protección de las Aguas (OEaux,

RS 914.201), de 21 de enero de 1998, que las contempla dentro de las medidas de organización del territorio. Esta legislación de la Confederación Helvética es de obligado cumplimiento por parte de los Cantones que componen ésta.

En la legislación helvética (cuadro 9) se definen:

- **Sectores**, de protección general (A, aprovechable como acuífero; B, no aprovechable pero con posible comunicación con un acuífero; y C, no acuíferos).
- **Zonas S**, (S1, S2 y S3) que corresponden a las zonas de los perímetros de protección de pozos y manantiales.
- **Zonas Z**, que delimitan el área de alimentación (superficial y subterránea).



Cuadro 9: Delimitación de perímetros de protección en Suiza.

La figura del perímetro de protección corresponde pues a las Zonas S1, S2 y S3 que, según la legislación, en medios con porosidad intergranular (“blandos”) las zonas S2 y S3, se determinarán en base al caudal máximo extraíble en una situación de estiaje y en medios kársticos y fisurados las zonas de protección se delimitarán en función del grado de vulnerabilidad del área de alimentación, según: formaciones de rocas próximas a la superficie, formación de las capas de la cobertera, condiciones de infiltración y desarrollo del sistema kárstico o de discontinuidades.

Existe un amplio desarrollo normativo de las actividades o instalaciones que están sujetas a prohibición en cada uno de los sectores, zonas S y zonas Z dentro de los textos legales citados.

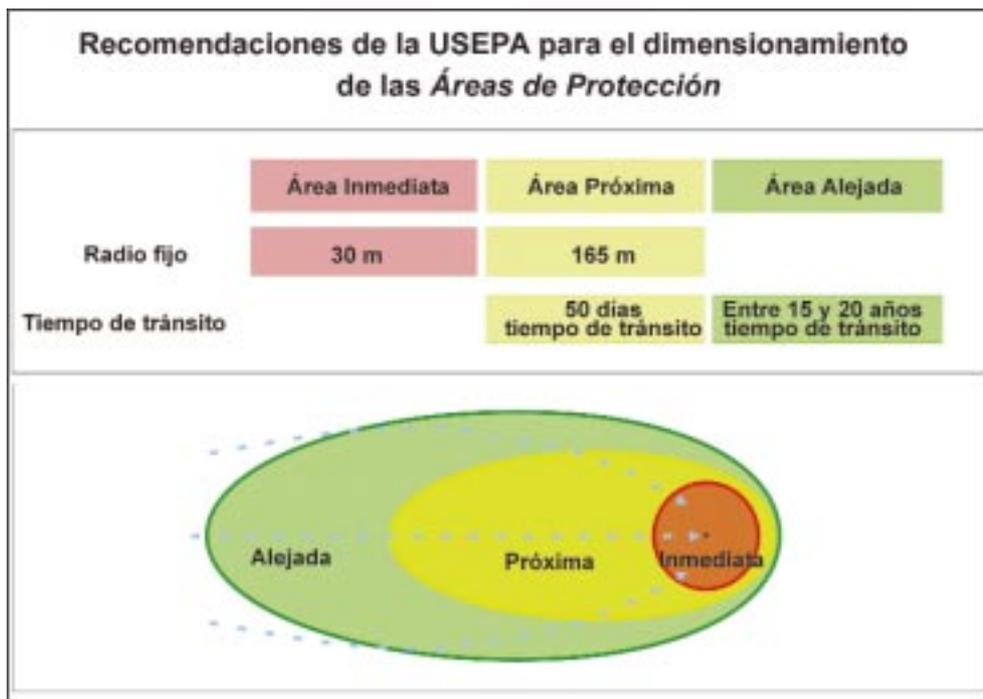
2.11. Delimitación de perímetros de protección en Estados Unidos

En Estados Unidos (USEPA, 2003 a; 2003 b) la protección de las aguas subterráneas se basa fundamentalmente en la Ley de Agua de Bebida Segura (Safe Drinking Water Act, SDWA) de 1974, que regula todos los aspectos concernientes al agua de bebida, y en particular a las Enmiendas a la SDWA de 1986 que introducen la figura del perímetro de protección de la calidad para pozos o Áreas de Protección de Pozos (Wellhead Protection Areas) en su sección 148, asumiendo las competencias referentes a la implantación de éstos los Estados y siendo, en un primer momento, de carácter optativo a realizar en

tres años, y las Enmiendas a la SDWA de 1996 que establecen los programas estatales de protección de captaciones de agua en las secciones 1452 y 1453. Estos programas son de dos tipos: Programas de Valoración de Fuentes de Agua (Source Water Assessments) de carácter obligatorio a llevar a cabo por los Estados y los Programas de Protección de Captaciones de Agua (Source Water Protection Programs) que se llevan a cabo mediante leyes de rango estatal y local, no federales, y que impulsan la delimitación de las zonas de protección de captaciones de abastecimiento y su implantación.

Habitualmente en Estados Unidos la delineación de perímetros de protección se lleva a cabo siguiendo las recomendaciones para su dimensionamiento dadas por la United States Environment Protection Agency (USEPA) que indica la necesidad de establecer una zonación con diferenciación de tres áreas de protección: inmediata, próxima, y alejada (cuadro 10). Los criterios recomendados para la obtención de éstas son la adopción de un radio fijo en las dos primeras o de un tiempo de tránsito del agua subterránea en la segunda y en la tercera como se indica en el cuadro 10.

No existe una regulación de actividades general para aplicar en los perímetros de protección debido a que el establecimiento de éstos se realiza a nivel de los municipios que serán los que en último término propongan las restricciones y prohibiciones necesarias dentro de las zonas establecidas generalmente mediante una Ordenanza Municipal de Protección de los Pozos”.



Cuadro 10: Delimitación de perímetros de protección en los Estados Unidos.

2.12. Delimitación de perímetros de protección en Canadá

En Canadá (CCA, 2002) a nivel federal existe una Ley de Aguas de Canadá (Canada Water Act, R.S. 1985, c. C-11), que obliga a una recopilación de datos sobre la calidad de las aguas y la mayoría de las iniciativas de protección se llevan a cabo dentro del Programa Nacional de Sitios Contaminados. La Política federal sobre aguas (Federal Water Policy) de 1987 establece que el gobierno federal elaborará estrategias y directrices para la evaluación y protección de las aguas del subsuelo.

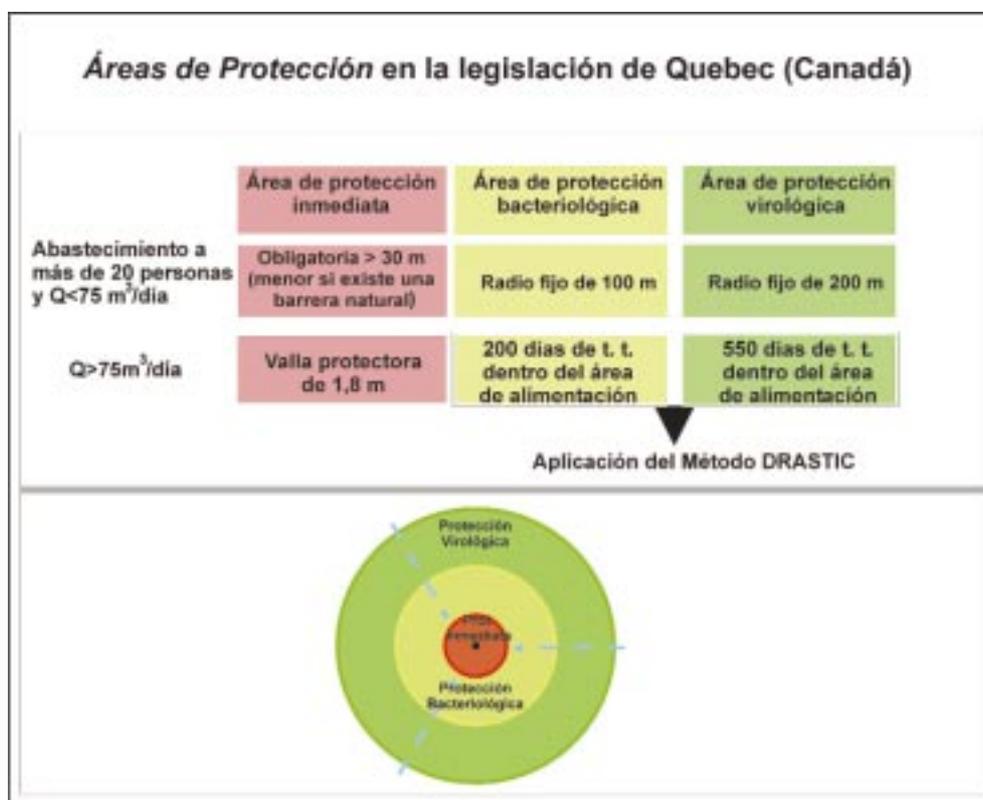
La mayoría de los gobiernos provinciales establecen cierto tipo de protección de las aguas subterráneas a través de una legislación sobre contaminación del agua mediante reglamentos específicos. Sin embargo y dado que la delimitación de los perímetros depende no del Gobierno Federal sino de los gobiernos provinciales, existen provincias en las que no existe una legislación específica para la protección de las captaciones de agua subterránea.

Se ha considerado adecuado el análisis de la legislación de la provincia de Quebec (Environnement Québec, 2003 a; 2003 b) debido que su promulgación es muy reciente (Reglamento Sobre la Capta-

ción de Aguas Subterráneas, que desarrolla la Ley sobre la Calidad del Medio Ambiente, de 2001), y sobre todo a la singularidad que presenta al definir las *Áreas de Protección*, siendo delimitadas la segunda y la tercera zona en función de la eliminación de los contaminantes bacteriológicos y virológicos respectivamente, por lo que esta última zona es diferente, por su delimitación bajo tal criterio, respecto al resto de casos que se analizan (cuadro 11). Además se fijan unos radios mínimos de las zonas en función del caudal de la captación y de la población que abastece.

Para la delimitación de las zonas se indica en la legislación la obligatoriedad de definir la vulnerabilidad de las mismas mediante la aplicación del método DRASTIC (Apartado 7.4.1.).

Como en los casos anteriores se definen igualmente tres zonas de protección siendo la primera el entorno inmediato del pozo, la segunda la considerada necesaria para la eliminación de contaminantes bacteriológicos y la tercera la necesaria para la eliminación de contaminantes virológicos. La figura adjunta representa, a modo de ejemplo, los radios fijos mínimos que se han de considerar sin tener obligatoriamente que ser las zonas concéntricas y simétricas.



Cuadro 11: Delimitación de perímetros de protección en Quebec (Canadá).

2.13. Delimitación de perímetros de protección en Australia

La Federación Australiana tiene un triple sistema de gobierno: Commonwealth, Gobierno del Estado-Territorio y Gobierno Local. La constitución australiana concede al Gobierno del Estado-Territorio los *residuos de poder* no específicamente asignados al Gobierno Federal incluyendo la mayoría de los aspectos de la gestión de recursos. Cada Estado tiene su propia legislación, estructura social y objetivos de política hídrica, consecuentemente cada Estado gestiona sus recursos de modo diferente y tiene la responsabilidad de la gestión del recurso hídrico. La Commonwealth puede intervenir no obstante en la gestión de recursos naturales en aras del interés general.

A modo de ejemplo se desarrollan a continuación las medidas para la protección del agua en Western Australia (Water and Rivers Commission, 1999; 2000 a; 2000 b; 2000c; Laws, 2001).

Los abastecimientos existentes y los que se vayan a establecer en el futuro se protegen mediante *Áreas de Captación de Agua de Bebida Pública (PDWSAs)* que se han establecido mediante la Ley Nacional de Áreas de Abastecimiento, de 1947, y la Ley de Aguas de Abastecimiento, Alcantarillado y Drenaje Metropolitano, de 1909. Ambas son administradas bajo la Ley de la Comisión de Aguas y Ríos, de 1995. Esta legislación capacita a la Comisión de Aguas y Ríos, responsable de la gestión y protección del recurso hídrico en Western Australia, para controlar actividades potencialmente contaminantes, regular el uso del suelo, inspeccionar permisos y prevenir o limpiar la contaminación.

Las PDWSAs comprenden *Áreas de Control de la Contaminación del Agua Subterránea (UWPCA)*, que protegen abastecimientos de agua subterránea de poca profundidad, *Áreas de Captación*, que protegen fuentes de abastecimiento superficiales como las presas, y *Reservas de Agua*, que protegen las fuentes de abastecimiento de aguas superficiales, captaciones de agua subterránea y PDWSAs ya existentes.

No se considera siempre apropiado aplicar el mismo nivel de protección en todo el ámbito de las PDWSAs, por ello se han diferenciado tres tipos de *Áreas de Protección Prioritaria*:

- **Prioridad 1 (P1):** su objetivo es asegurar que no se produce degradación del recurso. El propietario del suelo normalmente es el Estado con el objetivo de que la máxima calidad del agua de abastecimiento sea el principal valor de uso del suelo. Se gestiona con el principio de *evitación del riesgo*.
- **Prioridad 2 (P2):** su objetivo es asegurar que no se produce incremento en el riesgo de contaminación de la fuente de abastecimiento. Se declaran en áreas con baja intensidad de desarrollo, como las rurales, ya existentes. La protección de las fuentes de abastecimiento es una prioridad alta en estas áreas. Se gestionan con el principio de *minimización del riesgo* y por tanto se permite algún desarrollo bajo directrices específicas.
- **Prioridad 3 (P3):** se definen para limitar el riesgo de contaminación a la fuente de abastecimiento. Se declaran en zonas donde ésta debe coexistir con otros usos del suelo, tales como residencial, comercial y desarrollos industriales de poca intensidad. La protección se establece mediante directrices generales más que mediante restricciones al uso del suelo. Si la fuente de abastecimiento se contamina, el agua puede tener que ser tratada o sustituirla por una fuente alternativa.

Existen tablas que detallan para una gran cantidad de actividades su regulación en las zonas de prioridad P1, P2 y P3 en las PDWSAs.

Además de esta clasificación en *Áreas de Protección Prioritarias (P1, P2 y P3)* se definen *Perímetros de Protección de Pozos* y *Zonas de Protección de Embalses* para proteger ambos frente a la contaminación en el entorno inmediato de los mismos. Éstos se definen como un círculo con radio de 500 m en las zonas P1 y un radio de 300 m en las zonas P2 y P3. En los mismos se aplican condiciones especiales tales como el vallado alrededor de las captaciones.

3. ANÁLISIS DEL MARCO LEGAL ESPAÑOL REFERENTE A LA DELIMITACIÓN DE PERÍMETROS DE PROTECCIÓN

En este capítulo se analizará la legislación española referente a la delimitación de perímetros de protección de las captaciones de abastecimiento urbano y su problemática.

La delimitación de perímetros de protección en las captaciones de aguas minerales y termales no se considerará en el mismo, al no ser su problemática (López Geta *et al.*, 1996 b) objeto de este trabajo, y estar reguladas por una legislación específica, como indica el artículo 1.4 del texto refundido de la Ley de Aguas (BOE, 2001 c).

3.1. Los perímetros de protección de captaciones de abastecimiento urbano en la legislación

El perímetro de protección de captaciones de agua para abastecimiento público es una figura contemplada en la Directiva Marco del Agua (D.M.A.), (Unión Europea, 2000), que está prevista en la legislación española de aguas: art. 42, 56 y 97 c del Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas (BOE, 2001 c), art. 172 y 173 del Reglamento del Dominio Público Hidráulico, (R.D.P.H.), aprobado por R.D. 849/1986, de 11 de abril (BOE, 1986); art. 82 del Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica, (R.A.P.A.P.H.), aprobado por R.D. 927/1988, de 29 de julio (BOE, 1988) y, de un modo genérico, en los artículos 7 y 13 del Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano (BOE, 2003 a).

La planificación hidrológica en España contempla los perímetros de protección de captaciones de abastecimiento en el Plan Hidrológico Nacional, (P.H.N.) (BOE, 2001 b), así como en los Planes Hidrológicos

de cuenca, aprobados mediante el R.D. 1664/1998 de 24 de julio (BOE, 1998 b).

Puede asimismo apoyarse en la legislación del suelo: art. 9 de la Ley 6/1998, de 13 de abril, sobre régimen del suelo y valoraciones (BOE, 1998 a), de ámbito estatal y en las diversas leyes de urbanismo.

Estos perímetros *"tienen por finalidad la protección de captaciones de agua para el abastecimiento a poblaciones o de zonas de especial interés ecológico, paisajístico, cultural o económico"* (artículo 173.2 del R.D.P.H.).

La legislación estatal prevé dos posibilidades a la hora de la determinación del perímetro, ya sea a través de los planes hidrológicos (artículo 42 del texto refundido de la Ley de Aguas) o en su ausencia o para completar sus determinaciones por el Organismo de cuenca (artículo 56.3 del texto refundido de la Ley de Aguas y artículo 173 del R.D.P.H.).

El procedimiento se iniciará (artículo 173.3 del R.D.P.H.):

- *"De oficio en las áreas de actuación del Organismo de cuenca.*
- *A solicitud de la autoridad medioambiental.*
- *A solicitud de la autoridad municipal.*
- *A solicitud de cualquiera otra autoridad sobre la que recaigan competencias sobre la materia"*.

La delimitación del perímetro corresponde a la Junta de Gobierno del Organismo de cuenca (artículo 28 del texto refundido de la Ley de Aguas).

Las actividades que pueden ser restringidas o prohibidas en el área definida por el perímetro de protección están indicadas en el artículo 173.6 del R.D.P.H.

"Éstas son:

- a) *Obras de infraestructuras: minas, canteras, extracción de áridos.*

- b) *Actividades urbanas: fosas sépticas, cementerios, almacenamiento, transporte y tratamiento de residuos sólidos o aguas residuales.*
- c) *Actividades agrícolas y ganaderas: Depósito y distribución de fertilizantes y plaguicidas, riego con aguas residuales y granjas.*
- d) *Actividades industriales: almacenamiento, transporte y tratamiento de hidrocarburos líquidos o gaseosos, productos químicos, farmacéuticos y radiactivos, industrias alimentarias y mataderos.*
- e) *Actividades recreativas, camping, zonas de baños”.*

Como puede apreciarse, el alcance, extensión e importancia de las restricciones llegaría a impedir prácticamente el desarrollo de cualquier actividad si se aplicase a toda la extensión del perímetro. No obstante, el artículo 173.5 del R.D.P.H. señala respecto a las actividades ya indicadas: *“Podrán imponerse condicionamientos en el ámbito del perímetro a ciertas actividades o instalaciones que puedan afectar a la cantidad o la calidad de las aguas subterráneas. Dichas actividades o instalaciones se relacionarán en el documento de delimitación del perímetro”.*

Estos condicionamientos no tienen por qué ser similares en toda la extensión del perímetro de protección, por lo que, aunque no define qué zonas deben considerarse ni en base a qué criterios, sí se admite en la práctica la zonación.

El sistema más frecuentemente empleado consiste en dividir el perímetro en diversas zonas alrededor de la captación, graduadas de mayor a menor importancia en cuanto a las restricciones de actividad impuesta sobre ellas.

En la inmensa mayoría de los estudios de perímetros de protección elaborados entre 1985 y diciembre de 1999 se establecía como referencia legal para la protección de la calidad y la cantidad el artículo 54.3 de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de aguas (BOE, 1985). Este artículo se desarrollaba en el artículo 173 del R.D.P.H. de 1986.

La modificación de la Ley de Aguas (BOE, 1999 b) recogida en el texto refundido de la misma (BOE, 2001 c) en su artículo 56.3 (que corresponde al antiguo 54.3) contempla únicamente la determinación de perímetros de protección para preservar las aguas subterráneas frente a la contaminación. En este sentido es más restrictivo que el artículo 173.5 del R.D.P.H., que preveía la imposición de condicionamientos en el ámbito del perímetro a actividades o

instalaciones que pueden afectar tanto a la calidad como a la cantidad de las aguas subterráneas. Este cambio establecido en la ley sin que se modificasen ni derogasen los artículos que se refieren a los perímetros de protección en los Reglamentos (R.D.P.H., 1986 y R.A.P.A.P.H., 1988), que desarrollaban la Ley de 1985, plantea alguna incertidumbre sobre el marco legal aplicable a los perímetros de protección que tienen como objetivo salvaguardar la cantidad, como se analizará con mayor detalle en el apartado 3.3.

En este sentido debe resaltarse que el Real Decreto 606/2003, de 23 de mayo, por el que se modifica el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico (BOE, 2003 b), es una *“norma limitada a los aspectos más necesitados de desarrollo reglamentario”* que aplaza *“ a un futuro próximo la revisión completa de las normas de desarrollo en materia de aguas”* (BOE, 2003 b), que no incluye modificación alguna en los artículos referentes a los perímetros de protección. Su no inclusión se debe con toda probabilidad a que considera que dichos artículos se verán afectados por la necesaria transposición de la Directiva Marco del Agua, así como por la simplificación de procedimientos administrativos y la *“necesidad de recoger los nuevos conceptos metodológicos y criterios derivados de desarrollos tecnológicos”* (BOE, 2003 b).

Hay que destacar además que la planificación hidrológica en España se establece empleando dos instrumentos: El Plan Hidrológico Nacional y los Planes Hidrológicos de cuenca, con su lógica repercusión en el establecimiento de los perímetros de protección.

El tratamiento de los perímetros de protección y otros mecanismos de protección de las captaciones de abastecimiento urbano en los diversos Planes Hidrológicos de cuenca, aprobados mediante el R.D. 1664/1998 de 24 de julio (BOE, 1998 b), aparece sintetizado en las tablas 3 y 4.

El análisis de las mismas indica:

- Solamente aparecen definidos los perímetros de protección de captaciones de abastecimiento urbano indicados en los Planes Hidrológicos de las cuencas del Tajo y del Guadalquivir. La metodología empleada en la delimitación de muchos de ellos plantea además incertidumbres sobre una adecuada salvaguarda del recurso hídrico.
- No se han incluido numerosos perímetros de protección elaborados por las Confederaciones Hidrográficas, el IGME y otros organismos e instituciones desde 1985.

- Se contempla la obligatoriedad de elaborar perímetros de protección en las nuevas captaciones de abastecimiento únicamente en los Planes Hidrológicos de las cuencas del Tajo, Guadalquivir y Júcar cuando hubiera sido un mecanismo eficaz de impulsar la implantación de los mismos en todas las cuencas.
- En la mayoría de los Planes se incluyen previsiones de perímetros de protección a elaborar en el primer y segundo horizonte del Plan, si bien basados mayoritariamente únicamente en función del tamaño de la población, sin considerar otra serie de criterios para establecer un orden de prioridad en su implantación, como el análisis de la situación actual del abastecimiento, las características hidrogeológicas de los acuíferos captados, la importancia de la actividad potencialmente contaminante, vulnerabilidad frente a la contaminación y el riesgo de contaminación existente entre otros.
- La protección del recurso en las áreas con problemas de sobreexplotación definidas en diferentes Planes puede ser eficaz para la salvaguarda de la cantidad, pero no sustituye la protección de la calidad frente a actividades potencialmente contaminantes existentes.

La insuficiente atención, la diversidad de criterios y de detalle con que han sido contemplados los perímetros de protección en los Planes Hidrológicos de cuenca, junto con la repercusión que respecto a las mismas ha supuesto la modificación de la Ley de Aguas, con posterioridad a su aprobación, hace necesario establecer su coordinación.

Los criterios de coordinación de los Planes Hidrológicos de cuenca se reflejan en el artículo 6 del Plan Hidrológico Nacional, P.H.N. (BOE, 2001 b), indicando que *“el Consejo de Ministros, previo informe del Consejo Nacional del Agua y de las Administraciones Hidráulicas autonómicas de las cuencas intracomunitarias, regulará, mediante Real Decreto, en el plazo máximo de 2 años desde la entrada en vigor de esta Ley los criterios de coordinación relativos a aspectos técnicos y metodológicos, que deberán tenerse en cuenta en la revisión de los Planes Hidrológicos de cuenca”*. El apartado c de este artículo contempla la *“delimitación de los perímetros de protección tanto de aquellos en los que se prohíba el ejercicio de actividades que pudieran constituir un peligro de contaminación y degradación del dominio público hidráulico, como los perímetros de protección de acuíferos definidos en el Reglamento del Dominio Público Hidráulico y otros de carácter facultativo. Se deter-*

minará igualmente la relación de dichos perímetros con otras figuras de protección” (artículo 6 c del P.H.N.).

El artículo 6 de la Ley del P.H.N. no clarifica por tanto los criterios de coordinación para la delimitación de perímetros de protección, e indica únicamente que se regularán mediante Real Decreto en el plazo máximo de 2 años, quedando hasta ese momento pendiente de aclarar la normativa legal aplicable.

Por último cabe indicar que los perímetros de protección están expresamente contemplados en la Directiva Marco del Agua, D.M.A. (Unión Europea, 2000), que indica en sus artículos 6 y 7 la necesidad de establecer en el plazo de 4 años desde su entrada en vigor (que se produjo el día de su publicación en el Diario Oficial de las Comunidades Europeas, el 22 de diciembre de 2000), un registro de todas las zonas incluidas en cada demarcación hidrográfica que hayan sido declaradas objeto de una protección especial relativa a sus aguas superficiales o subterráneas o a la conservación de los hábitats. Entre esas zonas se incluyen específicamente todas las masas de agua, superficiales o subterráneas (entendiendo, según define la Directiva, estas últimas como un volumen claramente diferenciado de aguas subterráneas en un acuífero o acuíferos), utilizadas para la captación de agua destinada al consumo humano que proporcionen un promedio de más de 10 m³ diarios o que abastezcan a más de 50 personas, y todas las masas de agua destinadas al consumo humano en el futuro.

Contempla que los Estados miembros velarán por la necesaria protección de las masas de agua especificadas con objeto de evitar el deterioro de su calidad y podrán establecer perímetros de protección para las mismas.

Se establecerán además programas de seguimiento del estado de las aguas, que en el caso de las aguas subterráneas incluye su estado químico y su estado cuantitativo, alcanzando mayor precisión en el caso de las zonas protegidas. Las medidas necesarias para garantizar la protección de dichas masas de agua deberán haber sido establecidas antes de 22 de diciembre de 2009 y deberán ser operativas como máximo 3 años después de dicha fecha (como indica el artículo 11). No cabe duda que de una manera directa o indirecta *“el futuro texto de transposición de la DMA obligará a generalizar la fijación de perímetros en torno a captaciones de agua para uso potable”* (MIMAM, 2002 b).

Tabla 3: Perímetros de protección de las captaciones de abastecimiento en los planes hidrológicos.

CUENCA HIDROGRÁFICA	NUEVAS CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO	PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DEFINIDOS	PP A ELABORAR EN EL PRIMER HORIZONTE DEL PLAN (2008)	PP A ELABORAR EN EL SEGUNDO HORIZONTE DEL PLAN (2018)
NORTE (01)	-----	-----	-----	-----
DUERO (02)	-----	-----	Se establecerá PP (Art. 173 R.D.P.H.) para proteger la calidad: 1ª fase: Inventario de captaciones de abastecimiento definiendo zonas de influencia y focos potenciales de contaminación. 2ª fase: Estimar el grado de vulnerabilidad de las captaciones, seleccionar las que precisen PP y elaborar estos.	
TAJO (03)	Obligatorio elaborar Perímetros de protección (Art. 173 R.D.P.H. y R.T.S.) con zonificación. Con las limitaciones establecidas en Art 89 de la L.A.	Perímetros de protección (Art. 173 R.D.P.H.) con recursos reservados para usos urbanos en 1 UH (Madrid-Talavera).	Establecer PP (Art. 173 R.D.P.H. y R.T.S.) para captaciones de abastecimiento del Canal de Isabel II, diversas poblaciones y mancomunidades > 15.000 hab de UH 05 con limitaciones del Art. 89 L.A.	Perímetros de protección (Art. 173 R.D.P.H. y R.T.S.) de las captaciones de abastecimiento de 25 poblaciones de > 2.000 hab de diferentes UH.
GUADIANA (04)	-----	-----	PP poblaciones >15.000 hab.	PP poblaciones 2.000-15.000 hab.
GUADALQUIVIR (05)	Obligatorio elaborar perímetros de protección con zonificación.	<ul style="list-style-type: none"> - Establece 246 PP (Art. 173 R.D.P.H. y R.T.S.) en 45 UH para captaciones de abastecimiento, definiendo 243 mediante radio fijo 1-2 km limitando nuevas concesiones con regulaciones del Art. 173.6 R.D.P.H. - Define perímetros de protección (Art. 173 R.D.P.H.) en 3 UH con limitaciones al otorgamiento de nuevas concesiones de agua y autorizaciones de vertido. - Define perímetros de protección (Art. 173 R.D.P.H.) en 35 UH con limitaciones a las actividades o instalaciones del apartado 173.6 del R.D.P.H. para proteger la calidad. 	-----	
SUR (06)	-----	-----	Se establecerán de oficio PP de cantidad y calidad de las captaciones de abastecimiento urbano. Prioridad: 1) >15.000 hab 2) 2.000 a 15.000 hab 3) < 2.000 hab.	
SEGURA (07)	-----	-----	PP (Art. 173 R.D.P.H.) Calidad y cantidad captaciones abastecimiento >5.000 hab.	PP (Art. 173 R.D.P.H.) Calidad y cantidad captaciones abastecimiento >500 hab.
JÚCAR (08)	Obligatorio elaborar perímetros de protección con zonificación.	-----	Todas las captaciones de abastecimiento público deberán disponer de PP durante la vigencia del Plan. Prioridad en función del riesgo de contaminación y población abastecida. Considera: 1) >15.000 hab 2) 2.000 a 15.000 hab 3) < 2.000 hab.	
EBRO (09)	-----	-----	Se definirán los perímetros de protección (Art. 173 R.D.P.H.) de captaciones de abastecimiento a poblaciones >15.000 hab Se iniciará en 22 captaciones.	Se definirán los perímetros de protección (Art 173 R.D.P.H.) de captaciones de abastecimiento a poblaciones >2.000 hab. Se iniciará en 31 captaciones.
CUENCAS INTERNAS DE CATALUÑA	-----	-----	-----	-----
ISLAS BALEARES			Desarrollo de un programa, a lo largo de la vigencia del plan, para la delimitación de P.P. conforme al art. 173 del R.D.P.H. para garantizar la calidad del agua subterránea para abastecimiento (B.O. Islas Baleares, 2002).	

NOTA: El Consejo de Ministros acordó aprobar los Planes Hidrológicos de cuenca mediante el RD 1664/1998 de 24 de julio (BOE, 1998 b). Entre agosto y septiembre de 1999 se publicaron en el BOE sucesivos ordenes con los textos normativos de los diferentes Planes Hidrológicos. La Normativa contenida en los Planes Hidrológicos de cuenca no ha sido publicada. El RD 378/2001 de 6 de abril (BOE, 2001 a) aprobó el Plan Hidrológico de las Illes Balears, publicándose sus determinaciones de contenido normativo en junio de 2002.

ABREVIATURAS EMPLEADAS:

L.A.: Ley de Aguas.

R.D.P.H.: Reglamento del Dominio Público Hidráulico.

PP: Perímetros de protección

R.T.S.: Reglamentación Técnico Sanitaria de Aguas de consumo público (BOE, 1990. Derogada el 22 de febrero de 2003).

UH: Unidades Hidrogeológicas.

hab: Habitantes

Art.: Artículo.

Fuente: Modificado de Martínez Navarrete, 2002

Tabla 4: Otros mecanismos de protección de las captaciones de abastecimiento contemplados en los planes hidrológicos.

CUENCA HIDROGRÁFICA	UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS CON PROBLEMAS DE SOBREEXPLOTACIÓN Y PROTECCIÓN SIN INDICAR SOBRE LA BASE DE QUÉ ARTÍCULO.	ARTÍCULO 89 L.A. (Ley 46/1999)	ARTÍCULO 172 R.D.P.H.
NORTE (01)	Áreas a proteger en 21 UH requieren medidas de protección respecto niveles o caudales. Se establecen normas para proteger calidad y cantidad en 3 UH (Norte I), 12 UH (Norte II) y 6 UH (Norte III).	Áreas objeto de especial protección: Incluyen entre otras los acuíferos destinados a abastecimiento a poblaciones.	-----
DUERO (02)	Medidas de protección para limitar las extracciones y proteger frente a la contaminación, especialmente en los empleados para abastecimiento a poblaciones en 4 UH.	Relación de acuíferos que puedan ser declaradas de protección especial. Una vez definidos se delimitaran en cada caso los PP.	-----
TAJO (03)	-----	-----	-----
GUADIANA (04)	Declaración definitiva de sobreexplotación en 2 UH. (Guadiana I) Declaración de sobreexplotación en una parte de un acuífero. (Guadiana II).	-----	-----
GUADALQUIVIR (05)	Aplicación del artículo 171 del R.D.P.H. a 16 UH. Se definen PP en 12 UH con limitaciones a nuevas captaciones y limitaciones a los vertidos para protección de tramos fluviales.	-----	Define perímetros (Art. 172 R.D.P.H.) en los que no se otorgará concesión a menos que los titulares estén constituidos en Comunidades de usuarios en 8 UH.
SUR (06)	Identifica 6 UH con problemas graves de sobreexplotación, 7 UH con sobreexplotación local o zonal y 8 UH con indicios de intrusión.	-----	-----
SEGURA (07)	-----	-----	-----
JÚCAR (08)	-----	Normas de explotación y PP en entornos de especial protección de acuíferos destinados a abastecimiento.	-----
EBRO (09)	Estudiar si existe algún acuífero o UH sobre la que proceda la declaración provisional de acuífero sobreexplotado, en riesgo de estarlo o bien el establecimiento de un perímetro de protección, iniciándose en 5 UH.	-----	Estudiar si hay UH en que proceda definir PP (Art. 172 R.D.P.H.) en los que no se otorgará concesión sin constituir Comunidades de usuarios.
CUENCAS INTERNAS DE CATALUÑA	Se establecen: Planes zonales, Planes sectoriales y Normas de explotación de los acuíferos clasificados (Decreto 328/1988 Dpto. de Política Territorial y Obras Públicas de la Generalidad de Cataluña) y de los no clasificados.	-----	-----
ISLAS BALEARES	Declaración por parte de la Administración Hidráulica de zonas con sobreexplotación y salinización según los criterios del R.D.P.H. (B.O. Islas Baleares, 2002).		

NOTA: El Consejo de Ministros acordó aprobar los Planes Hidrológicos de cuenca mediante el RD 1664/1998 de 24 de julio (BOE, 1998 b). Entre agosto y septiembre de 1999 se publicaron en el BOE sucesivos ordenes con los textos normativos de los diferentes Planes Hidrológicos. La Normativa contenida en los Planes Hidrológicos de cuenca no ha sido publicada. El RD 378/2001 de 6 de abril (BOE, 2001 a) aprobó el Plan Hidrológico de las Illes Balears, publicándose sus determinaciones de contenido normativo en junio de 2002.

ABREVIATURAS EMPLEADAS:

L.A.: Ley de Aguas.

R.D.P.H.: Reglamento del Dominio Público Hidráulico.

R.T.S.: Reglamentación Técnico Sanitaria de Aguas de consumo público (BOE, 1990. Derogada el 22 de febrero de 2003).

PP: Perímetros de protección.

UH: Unidades Hidrogeológicas.

hab: Habitantes

Art.: Artículo.

Fuente: Modificado de Martínez Navarrete, 2002

3.2. Efectividad de la regulación de actividades en el ámbito del perímetro de protección

Para que los perímetros de protección frente a la contaminación sean realmente útiles es imprescindible garantizar la efectividad de la regulación de actividades contempladas para el ámbito del perímetro de protección en el documento de propuesta de

delimitación del mismo. En esta se indica, en una tabla específica para cada captación, los condicionamientos y prohibiciones a los que deben someterse las actividades urbanas, agrícolas, ganaderas, industriales, recreativas y las obras de infraestructura en las diferentes zonas en que se subdivide el área definida por el perímetro, graduadas de mayor a menor importancia en cuanto a las restricciones de actividad impuestas sobre ellas, si bien cabe reseñar que la determinación final del perímetro corresponde a la

Junta de Gobierno del Organismo de cuenca (artículo 28 del texto refundido de la Ley de Aguas).

Para conseguir la protección efectiva del recurso hídrico esta debe efectuarse en coordinación con una adecuada gestión y ordenación del territorio. En este sentido la propia Ley de Aguas señala en el artículo 20.1 del texto refundido (BOE, 2001 c) que *“El Consejo Nacional del Agua informará preceptivamente: [...] d) los planes y proyectos de interés general de ordenación agraria, urbana, industrial y de aprovechamientos energéticos o de ordenación del territorio en tanto afecten sustancialmente a la planificación hidrológica o a los usos del agua”*. Además en el artículo 43.3 del texto refundido de la Ley de Aguas dispone respecto a las zonas de protección especial de cuencas o acuíferos establecidas en los Planes Hidrológicos de cuenca que las previsiones respecto a las mismas *“deberán ser respetadas en los diferentes instrumentos de ordenación urbanística del territorio”*.

No obstante, esta coordinación es complicada en la práctica en España debido a la concurrencia de competencias de diferentes Administraciones, estatal, autonómica y local (Sánchez González, 1994; 2000; López-Camacho y Camacho, 1995; Fernández Sánchez, 2001), lo que ha dado lugar a diferentes recursos sobre aspectos legales resueltos finalmente por el Tribunal Constitucional (Tribunal Constitucional, 1988).

Ateniéndose a la doctrina del Tribunal Constitucional, el texto refundido de la Ley de Aguas (BOE, 2001 c) establece en su artículo 128 que *“La Administración General del Estado, las Confederaciones Hidrográficas, las Comunidades Autónomas y las entidades locales tienen los deberes de recíproca coordinación de sus competencias concurrentes sobre el medio hídrico con incidencia en el modelo de ordenación territorial, en la disponibilidad, calidad y protección de las aguas y, en general, del dominio público hidráulico, así como los deberes de información y colaboración mutua en relación con las iniciativas o proyectos que promuevan”*. (artículo 128.1 del texto refundido de la Ley de Aguas) [...] *“Esta coordinación y cooperación se efectuará a través de los procedimientos establecidos en la Ley 12/1983, de 14 de octubre, del Proceso Autonómico, en la ley 7/1985, de 2 de abril, reguladora de las Bases del Régimen Local, y en la Ley 30/1992, de 26 de noviembre de régimen Jurídico de las Administraciones Públicas y del procedimiento administrativo común, así como de las específicas que se hayan previsto en los Convenios celebrados entre las Administraciones afectadas”* (artículo 128.2 del texto refundido de la Ley de Aguas).

Además en la disposición adicional quinta del texto refundido de la Ley de Aguas indica: [...] *“las posibles limitaciones en el uso del suelo y reservas de terreno previstas en los artículos [...], 20, 43 [...] de esta Ley se aplicarán sin menoscabo de las competencias que las Comunidades Autónomas puedan ejercer en materia de ordenación del territorio”*.

Para garantizar la implantación real en el terreno de los perímetros de protección propuestos es necesario por tanto implicar a las Comunidades Autónomas y a los Ayuntamientos en la protección de sus captaciones de abastecimiento, trasladando así las restricciones indicadas para las diferentes zonas que componen el perímetro de protección al planeamiento urbanístico del término municipal. En este sentido cabe indicar que la Ley sobre régimen del suelo y valoraciones (BOE, 1998 a) clasifica el suelo en urbano, urbanizable y no urbanizable, siendo necesario para su catalogación como no urbanizable que esté sometido a algún régimen especial de protección incompatible con su transformación de acuerdo con los planes de ordenación territorial. La consideración de especial protección para las áreas incluidas en los perímetros de protección queda plenamente justificado ante la necesidad de proteger el dominio público hidráulico.

En otros trabajos (MIMAM, 2002 a y 2002 b) se efectúa un análisis detallado de carácter jurídico – administrativo como aportación para la necesaria revisión del vigente artículo 173 del R.D.P.H., *“en lo relativo al procedimiento administrativo de establecimiento de perímetros de protección y a su ulterior transposición al ordenamiento urbanístico”*, contemplando específicamente las repercusiones económicas de la implantación de los perímetros de protección, que serían aplicables a los perímetros de protección delimitados en cuencas hidrográficas intercomunitarias.

Las propuestas allí contenidas están no obstante realizadas en el marco de la actual Ley de Aguas así como la legislación española sobre uso del suelo. *“La transposición de la Directiva Marco puede alterar sustancialmente las relaciones entre ambos tipos de legislaciones en lo referente a la protección del agua, en cuyo caso las propuestas efectuadas tendrían que ser reconsideradas”* (MIMAM, 2002 b).

En dicho trabajo se indica que hasta tanto no se produzca la transposición al ordenamiento jurídico de los países de la Unión Europea de la D.M.A. y *“sea posteriormente desarrollada en normas de rango inferior, los perímetros que vayan implantándose deberán serlo según lo preceptuado en el artículo 173 del R.D.P.H., que probablemente no será modificado antes de su adaptación a la Directiva Marco”* (MIMAM, 2002 b).

Hay que indicar finalmente que en dicho estudio no se analiza la incertidumbre sobre el marco legal aplicable a los perímetros de protección que tienen como objetivo salvaguardar la cantidad (que ha sido ya analizada someramente en el apartado 3.1. y se desarrollará con mayor detalle en el apartado 3.3.).

3.3. Análisis crítico del encuadre legal de los perímetros de protección “de la cantidad” en las captaciones de abastecimiento urbano

Como se indicó en el apartado precedente la Directiva Marco del Agua, D.M.A. (Unión Europea, 2000), indica en sus artículos 6 y 7 la necesidad de establecer en el plazo de 4 años, desde su entrada en vigor, un registro de todas las zonas incluidas en cada demarcación hidrográfica que hayan sido declaradas objeto de una protección especial relativa a sus aguas superficiales o subterráneas o a la conservación de los hábitats. Entre esas zonas se incluyen específicamente todas las masas de agua, superficiales o subterráneas, utilizadas para la captación de agua destinada al consumo humano, que proporcionen un promedio de más de 10 m³ diarios o que abastezcan a más de 50 personas, y todas las masas de agua destinadas al consumo humano en el futuro.

Se establecerán además programas de seguimiento del estado de las aguas que, en el caso de las aguas subterráneas, incluye su estado químico y su estado cuantitativo, alcanzando mayor precisión en el caso de las zonas protegidas. Los programas serán operativos dentro del plazo de seis años contados a partir de la entrada en vigor de la Directiva.

En la legislación española de aguas el artículo 56.3 del Texto Refundido de la Ley de Aguas (BOE, 2001 c) contempla únicamente la determinación de perímetros de protección “a fin de proteger las aguas subterráneas frente a los riesgos de contaminación” en lugar de la imposición de “condicionamientos en el ámbito del perímetro a ciertas actividades o instalaciones que puedan afectar a la cantidad o la calidad de las aguas subterráneas” que contempla el R.D.P.H. en su artículo 173 (BOE, 1986).

La modificación establecida en la ley sin que se modificasen ni derogasen los artículos referentes a los perímetros de protección en los Reglamentos (R.D.P.H., 1986 y R.A.P.A.P.H., 1988), que desarrollaban la Ley de Aguas de 1985 (BOE, 1985), plantea alguna incertidumbre sobre el marco legal aplicable a los perímetros de protección que tienen como

objetivo salvaguardar la cantidad que, junto al diferente tratamiento otorgado a los perímetros de protección en los Planes Hidrológicos, debía ser analizada en el Plan Hidrológico Nacional.

Pero lamentablemente los criterios de coordinación de los Planes Hidrológicos de cuenca solo han sido reflejados en el artículo 6 del Plan Hidrológico Nacional (BOE, 2001 b) y dicho artículo no ha aclarado los criterios de coordinación para la delimitación de perímetros de protección, indicando únicamente que se regularán mediante Real Decreto en el plazo máximo de 2 años.

La cuestión que se plantea ahora, de cara a la futura modificación del R.D.P.H. de 1986, en lo que respecta a los artículos referentes a perímetros de protección es si conviene reservar la denominación de “perímetro de protección” exclusivamente para los delimitados con objeto de proteger las aguas subterráneas frente a la contaminación, tal como hace, deliberada o inadvertidamente, la modificación de la Ley de Aguas (BOE, 2001 c), o si, por el contrario, sería mejor mantener en el Reglamento la posibilidad de que tales perímetros contemplen también la protección cuantitativa del recurso.

A favor de la primera opción puede argumentarse, además de su propia presencia en el texto legal vigente, y la dificultad de ampliar el concepto reglamentariamente, lo siguiente:

- Por lo general, no son coincidentes los ámbitos territoriales de los perímetros de protección de la calidad y de la cantidad para una misma captación, como también son diferentes los criterios y metodologías para la determinación de ambos tipos de perímetros. En consecuencia, induce a confusión emplear la misma denominación (perímetro de protección) para dos ámbitos territoriales distintos.
- Existe una marcada diferencia en cuanto a Administraciones competentes para aplicar las limitaciones estipuladas en ambos tipos de perímetros. Mientras que en los de protección de la calidad las Administraciones con más amplia competencia son la Municipal y la Autonómica, en los de protección de la cantidad la competencia es casi exclusivamente de la Confederación Hidrográfica, en cuanto que la mayor parte de las limitaciones a imponer se refieren al otorgamiento de concesiones o autorizaciones de extracción de agua.

En consecuencia, parece interesante explorar la posibilidad de un nuevo tratamiento que incremente la eficacia de la protección cuantitativa de las captaciones de abastecimiento y subsane los actuales problemas respecto al marco legal aplicable. Según este,

en toda captación a proteger se delimitaría, por una parte, un perímetro de protección frente a la contaminación con limitaciones a determinadas actividades. Por otra parte, se establecería otro mecanismo que permita contemplar regulaciones en un área en torno de la captación, delimitada con una metodología adecuada, en la que se definiría el volumen

global máximo de extracción en el entorno delimitado, la cuantía máxima de extracción para captaciones distintas de la que es objeto de protección, los usos del agua admisibles, profundidades de sondeos y de instalación de bombas, distancias mínimas a la captación protegida entre otras, a precisar por un análisis metodológico específico.

4. CRITERIOS PARA ESTABLECER UN ORDEN DE PRIORIDAD ENTRE DIFERENTES MUNICIPIOS EN LA ELABORACIÓN DE PERÍMETROS DE PROTECCIÓN. EJEMPLO DE APLICACIÓN EN LA PROVINCIA DE ALICANTE

En este capítulo se proponen diversos criterios que pueden emplearse para establecer un orden de prioridad en la elaboración de perímetros de protección en una región, ilustrándose con una síntesis de los resultados obtenidos tras su aplicación a la provincia de Alicante (Martínez Navarrete *et al.*, 1997).

Hay que indicar que se propone una valoración global de todos los municipios por lo que cuando se elaboren los perímetros de protección de captaciones de abastecimiento será preciso efectuar estudios de mayor detalle de los factores considerados que no es posible abordar a escala regional.

4.1. Criterios para establecer un orden de prioridad en la elaboración de perímetros de protección

Los criterios que se propone emplear son los siguientes:

4.1.1. Vulnerabilidad intrínseca

La aplicación de este criterio conlleva que los puntos de abastecimiento que capten acuíferos cuyas características los hagan más vulnerables deben disponer de un perímetro de protección antes que otros que capten acuíferos con una protección natural superior.

Para determinar cual es la protección natural de los acuíferos captados por los puntos de abastecimiento es necesario en primer lugar realizar un análisis de sus características hidrogeológicas. Es fundamental identificar el tipo de acuífero detallando su naturaleza (libre, semiconfinado y confinado, al ser los primeros los más vulnerables y los acuíferos confinados

los que poseen menor vulnerabilidad). El tipo de material que constituye el acuífero (carbonatado, detrítico...) tiene una gran influencia en el poder autodepurador del terreno y en el tiempo de tránsito condicionando además la metodología a aplicar en la elaboración del perímetro de protección. Para analizar la vulnerabilidad de los acuíferos captados frente a actividades potencialmente contaminantes debe conocerse además la geometría del acuífero, el funcionamiento hidrogeológico (balances, piezometría, hidroquímica) y cuales son las características hidrodinámicas del mismo.

La aplicación de este criterio a la escala de trabajo provincial se ha efectuado básicamente empleando la información bibliográfica referente a las unidades hidrogeológicas donde se ubican los núcleos urbanos. De cada Unidad Hidrogeológica se ha sintetizado la información disponible respecto a tipos de acuíferos, conductividad hidráulica y materiales que lo constituyen ordenando los términos municipales, según la aplicación de este criterio, en tres categorías del grado de urgencia (bajo, medio, alto).

4.1.2. Focos potenciales de contaminación

La utilización del inventario de focos potenciales de contaminación como criterio se basa en considerar que es necesario garantizar la calidad de las aguas prioritariamente en aquellas poblaciones en las que dichos focos puedan suponer un riesgo potencialmente elevado de degradación de la calidad de las aguas, frente a aquellos otros municipios que al carecer casi completamente de focos contaminantes no presenten ningún riesgo a corto plazo (aunque en el futuro podrían producirse nuevos focos que sería necesario considerar).

Al aplicar este criterio a los municipios de la provincia de Alicante se ha empleado la información referente a actividades agrícolas (cultivos herbáceos y cultivos leñosos), actividad ganadera, actividad industrial, residuos sólidos urbanos y vertidos líquidos urbanos. Se ha clasificado de modo independiente para cada uno de ellos todos los términos municipales según el grado de urgencia de elaboración de perímetros de protección considerando tres categorías (bajo, medio y alto).

Para analizar los cultivos herbáceos y leñosos se ha considerado como parámetro más significativo el nitrógeno aplicado (kg/año) por término municipal. Para obtenerlo se han utilizado las hectáreas de cada cultivo existente por término municipal, empleándose como base la información contenida en el censo agrícola, y la información sobre fertilizantes disponible en Agencias y Cámaras Agrarias.

El análisis de la actividad ganadera evalúa el tipo de ganado por término municipal, estimando el valor de DBO-5 que le corresponde (Tabulado), considerando como parámetro más significativo la población equivalente. Esta se calcula según la fórmula:

Población equivalente (hab)= DBO-5 (T/año)/0,0274

Al analizar la actividad industrial se emplea una relación de industrias potencialmente contaminantes, considerando la potencia eléctrica instalada y el personal como indicativos iniciales de la importancia de la actividad, complementándolo con la evaluación posterior de los productos químicos de riesgo característicos de cada actividad industrial.

Los datos sobre residuos sólidos urbanos y vertidos líquidos urbanos se han obtenido de diversos organismos (Diputación, Confederaciones, Agencia de Medio Ambiente, entre otros y en aquellos términos municipales en los que no se dispone de información directa se han estimado la cantidad de residuos producida.

4.1.3. Población fija y estacional

La aplicación de este criterio, frecuentemente empleado en la Planificación Hidrológica conlleva considerar como prioritario salvaguardar la calidad del agua de aquellas poblaciones con cierto número de habitantes, dejando para etapas posteriores el aplicar los perímetros de protección a las poblaciones más pequeñas del resto del territorio considerado.

A modo de ejemplo puede citarse que en diversos Planes Hidrológicos (los correspondientes a las cuencas de los ríos Tajo, Guadiana, Sur, Júcar y Ebro) se propone elaborar en una primera fase (hasta el año 2008) los perímetros de protección en aquellos municipios con población abastecida superior a los 15.000 habitantes, y en una segunda fase los de aquellas poblaciones de entre 2.000 y 15.000 habitantes en el período 2009 a 2018, como se detalló en el capítulo 3 .

Su elaboración es sencilla empleando como base la información del censo por municipio existente en el Instituto Nacional de Estadística, debiéndose analizar la población de hecho, de derecho y la estacional, así

como su evolución en los últimos años, realizando previsiones del número de habitantes que tendrán los municipios en el futuro. Además se analiza si existen núcleos de población dispersos y/o urbanizaciones, cuantificando su ocupación.

Los términos municipales se ordenan según este parámetro en tres categorías del grado de urgencia (bajo, medio, alto).

4.1.4. Situación actual del abastecimiento

El emplear la información relativa a la situación actual del abastecimiento es un criterio de selección que se basa en considerar que aquellas poblaciones en las que su suministro depende de una única captación carecerán de alternativas para suministrar agua con la calidad necesaria ante una posible contaminación que sí tienen aquellas otras que puedan, aunque sea temporalmente o con restricciones al consumo, emplear otra captación u otras fuentes de suministro. En este criterio también se considera si hay algún parámetro que exceda los valores que sobre la composición química de las aguas establece la legislación.

Para poder valorar correctamente este criterio es imprescindible poseer una información detallada de los siguientes aspectos:

- Puntos de abastecimiento
 - Número y naturaleza: sondeos, pozos, manantiales, extracciones directas de cauces fluviales, tomas de un embalse.
 - Características técnicas de la obra de captación: profundidad y diámetro, entubación y situación de rejillas, tramos cementados.
 - Medidas de protección de la captación: perímetros de protección aprobados o propuestos y método empleado en su elaboración, existencia de casetas, vallas u otros elementos de protección.
 - Análisis químicos: evolución de la calidad de las aguas, problemas de contaminación en el pasado.
- Conducciones de agua potable y depósitos de regulación
 - Volúmenes consumidos y su distribución temporal, redes de alta y de baja, capacidad de los depósitos.

Se han considerado como parámetros más significativos a esta escala de trabajo provincial el número de

manantiales, sondeos y el total de ambos, así como el origen del agua (subterránea, superficial o de ambos tipos).

En el total de captaciones empleado no se realiza distinción sobre donde está localizada ya que lo que se necesita conocer es el número de captaciones existentes en el municipio al ser cada una de ellas una posible alternativa para el suministro de agua ante una posible contaminación.

Respecto a la calidad del agua del abastecimiento se emplea la situación indicada en estudios precedentes y disponible en diversos organismos y bases de datos.

Los términos municipales se ordenan según estos parámetros en tres categorías del grado de urgencia (bajo, medio, alto).

4.1.5. Situación socioeconómica del municipio

Al emplearse este criterio pretende tenerse en consideración cuales son las características socioeconómicas de cada municipio, ya que estos pueden tener poca población pero un potencial económico muy elevado, o al contrario.

Se considera que los municipios con un nivel socioeconómico elevado tienen una actividad intensa que hace prioritaria la elaboración de los perímetros de protección en sus captaciones de abastecimiento urbano frente a las poblaciones que poseen un nivel socioeconómico menor.

Se ha empleado como parámetro indicador de la situación socioeconómica el presupuesto municipal considerando además del total el desglose de los ingresos.

Los términos municipales se han ordenado según el total de ingresos en tres categorías del grado de urgencia (bajo, medio, alto).

4.1.6. Coste del estudio e implantación de cada perímetro de protección

Es este un criterio básico para realizar una planificación realista que contemple prioridades al desarrollar un programa de implantación de perímetros de protección en una región. Su conocimiento es fundamental para repartir racionalmente los recursos disponibles, evaluando si es conveniente emplear tiempo y dinero en aquellos que por tener una repercusión socioeconómica de gran importancia su implantación real en el terreno, cuando no tenga carácter técnico de urgencia que lo haga prioritario ineludiblemente, se verá dilatada, cuando no definitivamente pospuesta.

Para calcular el coste de un perímetro de protección es necesario distinguir entre el coste del estudio y el de su implantación real en el terreno.

La implantación en el terreno tiene un coste técnico objetivo (consistente en las obras e instalaciones a efectuar en la propia captación y sus inmediaciones) y un coste variable. Este último es producto de las posibles restricciones impuestas a la actividad socioeconómica existente en el área del perímetro, especialmente si es necesario pagar indemnizaciones, ya que pueden tener una elevada repercusión en el coste final de implantación del perímetro de protección.

Para su análisis es imprescindible recabar la información sobre los planes de ordenación del territorio de cada municipio ya que su impacto puede ser prácticamente nulo (si por ejemplo los terrenos afectados carecen de actividad y pertenecen al municipio) o suponer un coste muy elevado que lo haga difícilmente aceptable, como es el caso de las captaciones existentes en el núcleo de ciudades, entre industrias de gran magnitud y relevancia o que afecten a actividades agrícolas notables.

Estos aspectos no siempre son abordables a la escala de trabajo provincial, siendo en todo caso necesario profundizar en los mismos en una segunda fase al elaborar el perímetro de protección de cada captación.

El coste del estudio de determinación de los perímetros de protección de cada municipio es difícil de cuantificar ya que este depende de diversos factores:

- Número de captaciones de abastecimiento urbano.
- Importancia de la actividad potencialmente contaminante en el municipio y especialmente en el entorno de las captaciones.
- Grado de conocimiento de los parámetros hidrogeológicos requeridos y de las características de las actividades potencialmente contaminantes.
- Método aplicado en la determinación del perímetro de protección.

En diferentes casos de delimitación de perímetros de protección de captaciones de abastecimiento urbano existentes en un término municipal, realizados por el IGME en diferentes lugares de la geografía nacional, la aplicación del método en gabinete, una vez que se disponía de los datos previos necesarios, supuso tan solo un 20% del importe total. Es decir la mayor parte del gasto corresponde a la obtención de información sobre las característi-

cas hidrogeológicas del acuífero, el análisis de la vulnerabilidad y de la actividad potencialmente contaminante así como respecto a la determinación de los parámetros hidrogeológicos. El coste que esto supone está fuertemente relacionado con el número de captaciones a proteger y la importancia de la actividad potencialmente contaminante al tener una relación directa con el tiempo necesario de trabajo en campo a realizar.

Además de los criterios anteriormente expuestos cabe señalar que en diversos Planes Hidrológicos (cuena del Tajo, Guadalquivir y Júcar) ya se incluye que todas las captaciones que se realicen desde la aprobación del Plan que estén destinadas a abastecimiento público deberán disponer de su correspondiente perímetro de protección. Esta medida es sumamente acertada ya que para ubicarse un sondeo se realiza un estudio hidrogeológico detallado y se obtiene una gran parte de la información necesaria para elaborar un perímetro de protección con lo que este puede realizarse con un bajo sobre coste.

La cuantificación del coste del estudio de los perímetros de protección se ha realizado en el caso de los municipios de la provincia de Alicante en base a las consideraciones antes indicadas, empleando la información analizada anteriormente sobre el total de puntos de abastecimiento, la importancia de la actividad potencialmente contaminante y la población.

Se han considerado tres importes asignándose a cada término municipal según los criterios de la tabla 5.

La población de hecho del término municipal se ha empleado básicamente en aquellos municipios en los que no se dispone de información sobre los puntos de abastecimiento como dato alternativo para asignar el coste.

En otras ocasiones al realizar una planificación regional se opta por establecer un coste unitario basado únicamente en la población abastecida.

4.2. Orden de prioridad en la elaboración de los perímetros de protección de los municipios de la provincia de Alicante y coste estimativo

El orden de prioridad que se propuso para la elaboración de los perímetros de protección de los municipios de la provincia de Alicante se ha obtenido partiendo del análisis de los tres factores siguientes:

- Importancia de la actividad potencialmente contaminante.
- Grado de urgencia respecto a la situación actual del abastecimiento.
- Vulnerabilidad intrínseca.

La importancia de la actividad potencialmente contaminante se ha obtenido en base a los resultados que proporcionó el análisis detallado efectuado en cada municipio de las diversas actividades consideradas. Estas son la actividad agrícola (cultivos herbáceos y cultivos leñosos), actividad ganadera, actividad industrial, residuos sólidos urbanos y vertidos líquidos urbanos, junto con el análisis de la población del término municipal, así como la situación socioeconómica de cada municipio. Estos resultados se muestran en la tabla 6. A esos resultados parciales (que indican una urgencia alta, media o baja en cada uno de los criterios antes mencionados) se les ha asignado un valor (2 en caso de urgencia alta, 1 si la urgencia es media y 0 cuando esta sea baja). En aquellos casos en que no se dispone de información (sin datos) sobre un criterio se le ha valorado como 1. Así si los 8 factores considerados tienen urgencia alta se obtendrá un valor de 16, de 8 si todos son medios y de 0 en el supuesto de ser todos de urgencia baja.

En la tabla 6 se han clasificado los valores de Importancia de la actividad potencialmente contaminante en:

Tabla 5: Criterios para evaluar el coste del estudio de perímetros de protección.

Importancia de la actividad potencialmente contaminante	Número de puntos de abastecimiento		
	1 a 2	3 a 5	Más de 6
Baja	6.000€	6.000€	9.000€
Media	6.000€	9.000€	12.000€
Alta	6.000€	12.000€	12.000€

Fuente: Modificado de Martínez Navarrete *et al.*, 1997

- BAJA: Valores de 0-4.
- MEDIA: Valores de 5-11.
- ALTA: Valores de 12-16.

En segundo lugar se analiza el grado de urgencia respecto a la situación actual del abastecimiento sobre la base de las características de las captaciones, el tipo y distribución de las conducciones de agua potable y los depósitos de regulación, clasificándose su prioridad según dicho análisis en alta, media o baja.

Por último se efectúa una evaluación cualitativa o mediante el cálculo de índices de vulnerabilidad de la naturaleza del acuífero, la recarga, el desarrollo del suelo, los estratos ubicados sobre el acuífero, la litología y la fracturación entre otros factores, clasificándose también en grado de urgencia alto, medio o bajo.

El orden de prioridad en la elaboración de los perímetros de protección se obtiene aplicando los criterios reseñados en la tabla 7, mostrándose en la tabla

8 una síntesis de los resultados de su aplicación a los 140 municipios de la provincia de Alicante, considerándose tres categorías de prioridad (1, 2, 3).

La prioridad 1 se asigna a aquellos perímetros con urgencia alta en su elaboración, la 2 a los que tienen urgencia media y por último la prioridad 3 a aquellos con urgencia baja.

Esa clasificación de complementa con la estimación del coste de los estudios de delimitación de los perímetros de protección.

El coste total estimado en el estudio efectuado (Martínez Navarrete *et al.*, 1997) para la elaboración de todos los estudios de perímetros de protección de los términos municipales de la provincia de Alicante es de 1.044.000 € que se distribuyen en 324.000 € a los municipios de urgencia alta (prioridad 1), 507.000 € a los municipios de urgencia media (prioridad 2) y 213.000 € a los municipios de urgencia baja (prioridad 3).

Tabla 6: Importancia de la actividad potencialmente contaminante en los municipios de la provincia de Alicante. Síntesis de los resultados obtenidos en los 140 municipios que la componen.

MUNICIPIO	FOCOS POTENCIALES DE CONTAMINACIÓN						POBL.	SITUA- CIÓN SOCIOEC	IMPORTANCIA ACTIVIDADES CONTAMINANTES	
	C. HERBAC	C.LEÑOSO	GANAD	INDTRIA	R.S.U	V.L.U				
Beniardá	BAJO	MEDIO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJA	BAJO	1	BAJA
Tormos	BAJO	MEDIO	MEDIO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJA	BAJO	2	BAJA
Beniarbeig	BAJO	ALTO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJA	BAJO	2	BAJA
Guadalest	BAJO	MEDIO	BAJO	BAJO	BAJO	ALTO	BAJA	BAJO	3	BAJA
Sanet y Negrals	BAJO	MEDIO	BAJO	BAJO	BAJO	ALTO	BAJA	BAJO	3	BAJA
Sella	BAJO	ALTO	BAJO	BAJO	BAJO	ALTO	BAJA	BAJO	4	BAJA
Jacarilla	BAJO	ALTO	BAJO	BAJO	Sin-Dat	BAJO	BAJA	MEDIO	4	BAJA
Benidoleig	BAJO	ALTO	BAJO	BAJO	BAJO	ALTO	BAJA	BAJO	4	BAJA
Torremanzanas	BAJO	ALTO	MEDIO	BAJO	BAJO	ALTO	BAJA	BAJO	5	MEDIA
Relleu	BAJO	ALTO	MEDIO	BAJO	BAJO	ALTO	BAJA	BAJO	5	MEDIA
Adsubia	BAJO	ALTO	MEDIO	BAJO	BAJO	ALTO	BAJA	BAJO	5	MEDIA
Cañada	BAJO	ALTO	MEDIO	BAJO	BAJO	ALTO	BAJA	BAJO	5	MEDIA
Agres	BAJO	ALTO	MEDIO	BAJO	BAJO	ALTO	BAJA	BAJO	5	MEDIA
Polop	BAJO	ALTO	MEDIO	BAJO	BAJO	ALTO	BAJA	MEDIO	6	MEDIA
Campello, El	MEDIO	MEDIO	MEDIO	MEDIO	MEDIO	BAJO	MEDIA	ALTO	8	MEDIA
Pedreguer	BAJO	ALTO	MEDIO	MEDIO	MEDIO	ALTO	MEDIA	MEDIO	9	MEDIA
Sax	BAJO	ALTO	MEDIO	MEDIO	MEDIO	ALTO	MEDIA	MEDIO	9	MEDIA
Gata de Gorgos	BAJO	ALTO	MEDIO	MEDIO	MEDIO	ALTO	MEDIA	MEDIO	9	MEDIA
San Miguel de Salinas	ALTO	ALTO	MEDIO	BAJO	Sin-Dat	ALTO	MEDIA	MEDIO	10	MEDIA
Monforte del Cid	BAJO	ALTO	ALTO	MEDIO	MEDIO	ALTO	MEDIA	MEDIO	10	MEDIA
Pego	BAJO	ALTO	ALTO	MEDIO	MEDIO	ALTO	MEDIA	MEDIO	10	MEDIA
Santa Pola	MEDIO	MEDIO	MEDIO	ALTO	BAJO	ALTO	ALTA	ALTO	11	MEDIA
Denia	BAJO	ALTO	MEDIO	MEDIO	ALTO	ALTO	ALTA	ALTO	12	ALTA
Jávea	MEDIO	ALTO	MEDIO	MEDIO	ALTO	ALTO	ALTA	ALTO	13	ALTA
Villena	ALTO	ALTO	ALTO	MEDIO	ALTO	ALTO	ALTA	ALTO	15	ALTA

Fuente: Modificado de Martínez Navarrete *et al.*, 1997

Tabla 7: Criterios para asignar un orden de prioridad en la delimitación de perímetros de protección.

Importancia de la actividad potencialmente contaminante	Grado de urgencia respecto a la situación actual del abastecimiento	Vulnerabilidad intrínseca		
		Alta	Media	Baja
Baja	Baja	P-3 (*)	P-3 (***)	P-3 (***)
	Media	P-2 (**)	P-3 (***)	P-3 (***)
	Alta	P-2 (**)	P-3 (***)	P-3 (***)
Media	—	P-1	P-2	P-3
Alta	—	P-1	P-1	P-2

- (***) En estos municipios no hay actividad contaminante importante y además si se produjera algún tipo de contaminación el acuífero tiene vulnerabilidad media o baja.
- (**) En estos municipios no hay actividad contaminante importante pero si se produce el acuífero es vulnerable y el sistema de abastecimiento no dispone de captaciones alternativas.
- (*) En estos municipios no hay actividad contaminante importante pero si se produce, aunque el acuífero es vulnerable, el sistema de abastecimiento dispone de captaciones alternativas.

Tabla 8: Orden de prioridad en la elaboraci3n de per3metros de protecci3n de captaciones. S3ntesis de los resultados obtenidos al aplicar los criterios propuestos a los 140 municipios de la provincia de Alicante.

MUNICIPIO	IMPORTANCIA DE LA ACTIVIDAD POTENCIALMENTE CONTAMINANTE		VULNERAB. INTR3NSECA	URGENCIA RESPECTO A S. ABASTEC	ORDEN PRIORIDAD	COSTE ESTUDIO PER3METRO
Adsubia	5	MEDIA	ALTO	ALTO	1	6.000 €
Agres	5	MEDIA	ALTO	ALTO	1	6.000 €
Polop	6	MEDIA	ALTO	BAJO	1	12.000 €
Sax	9	MEDIA	ALTO	BAJO	1	9.000 €
Pego	10	MEDIA	ALTO	ALTO	1	6.000 €
Denia	12	ALTA	MEDIO	MEDIO	1	12.000 €
J3vea	13	ALTA	MEDIO	MEDIO	1	12.000 €
Villena	15	ALTA	MEDIO	BAJO	1	12.000 €
Beniard3	1	BAJA	ALTO	MEDIO	2	6.000 €
Tormos	2	BAJA	ALTO	ALTO	2	6.000 €
Guadalest	3	BAJA	ALTO	ALTO	2	6.000 €
Sanet y Negrals	3	BAJA	ALTO	MEDIO	2	6.000 €
Cañada	5	MEDIA	MEDIO	MEDIO	2	9.000 €
Relleu	5	MEDIA	MEDIO	ALTO	2	6.000 €
Torremanzanas	5	MEDIA	MEDIO	BAJO	2	9.000 €
Campello, El	8	MEDIA	MEDIO	ALTO	2	6.000 €
Pedreguer	9	MEDIA	MEDIO	MEDIO	2	9.000 €
Gata de Gorgos	9	MEDIA	MEDIO	BAJO	2	12.000 €
Beniarbeig	2	BAJA	MEDIO	MEDIO	3	6.000 €
Jacarilla	4	BAJA	BAJO	MEDIO	3	6.000 €
Sella	4	BAJA	MEDIO	ALTO	3	6.000 €
Benidoleig	4	BAJA	MEDIO	MEDIO	3	6.000 €
San Miguel de Salinas	10	MEDIA	BAJO	MEDIO	3	6.000 €
Monforte del Cid	10	MEDIA	BAJO	ALTO	3	6.000 €
Santa Pola	11	MEDIA	BAJO	MEDIO	3	12.000 €

URGENCIA EN LA ELABORACI3N DE PER3METROS DE PROTECCI3N EN MUNICIPIOS:

	COSTE
PRIORIDAD 1: Urgencia alta en su elaboraci3n	324.000 €
PRIORIDAD 2: Urgencia media en su elaboraci3n	507.000 €
PRIORIDAD 3: Urgencia baja en su elaboraci3n	213.000 €

COSTE TOTAL: 1.044.000 €

Fuente: Modificado de Mart3nez Navarrete *et al.*, 1997

5. APROXIMACIONES MATEMÁTICAS PARA DEFINIR EL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y EL TRANSPORTE DE SOLUTOS EMPLEADAS PARA DELIMITAR PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO URBANO

Los modelos matemáticos de sistemas de aguas subterráneas son representaciones matemáticas de los mismos que incluyen asunciones y simplificaciones, por lo que la validez de sus resultados está directamente relacionada con la efectividad con la que el modelo representa dichos sistemas (California Environmental Protection Agency, 2002). En la figura 2 se esquematizan los aspectos a considerar en la aplicación de un modelo, tanto en el proceso de diseño del *software* como en su aplicación para un propósito específico.

El desarrollo del modelo requiere (California Environmental Protection Agency, 2002), en primer lugar, analizar los procesos hidrogeológicos que afectan al flujo de agua subterránea y al transporte de contaminantes en la misma (Figura 3). En segundo lugar, hay que determinar qué leyes y formulaciones pueden representar matemáticamente un fenómeno hidrogeológico. Así expresiones generales como la Ley de Darcy para flujo laminar de agua subterránea o las leyes de Fick para transporte dispersivo y las funciones de Monod para transformación de contaminantes por biodegradación, permiten representar un área infinitesimal de un sistema dado bajo condiciones ideales.

La aplicación de esas leyes a escala real requiere su conversión a ecuaciones diferenciales para poder considerar variaciones espaciales y temporales, que deben ser resueltas o aproximadas matemáticamente para convertirlas en fórmulas que puedan ser empleadas para cálculos hidrogeológicos. En la mayoría de los casos la solución exacta de una ecuación diferencial representando un fenómeno hidrogeológico no es factible y es mejor obtener una solución aproximada efectuando nuevas asunciones y simplificaciones.

El grado de simplificación depende de la complejidad con que se quiera que el modelo represente el sistema lo que da lugar a tres tipos de modelos (numéricos, analíticos y de parámetros agregados), cuyas principales características son:

– Modelos numéricos:

Permiten aproximaciones complejas a las ecuaciones diferenciales. Estas hacen posible, por ejemplo, modelar variaciones espaciales del sistema (heterogeneidades y anisotropía) así como variaciones temporales (régimen transitorio).

Los modelos numéricos dividen el sistema de agua subterránea en unidades más pequeñas, hidrogeológicamente representables, efectuando una discretización espacial en bloques u otras unidades geométricas, asignando un nodo a cada una de ellas. Cada uno de esos nodos se considera como un subsistema separado, lo que permite incorporar variabilidad espacial de los parámetros contemplados en el modelo. También dividen el periodo de tiempo simulado en segmentos más pequeños, lo que permite simular régimen permanente y régimen transitorio en diferentes pasos de tiempo.

Estos modelos requieren asignar valores de los parámetros específicos para cada unidad geométrica (celda) requiriéndose una elevada cantidad de datos.

– Modelos analíticos:

Son apropiados para aproximaciones simplificadas a las ecuaciones diferenciales, para efectuar simulaciones de sistemas simples, sin complejidad espacial ni temporal.

Estos modelos resuelven analíticamente las ecuaciones diferenciales para obtener ecuaciones simples para el flujo y el transporte de contaminantes, proporcionando soluciones exactas a las mismas para lo que requieren que se asuman diversas simplificaciones. Entre estas cabe citar por ejemplo que los límites del sistema de agua subterránea estén localizados en zonas infinitamente lejanas y que el sistema sea homogéneo e isótropo.

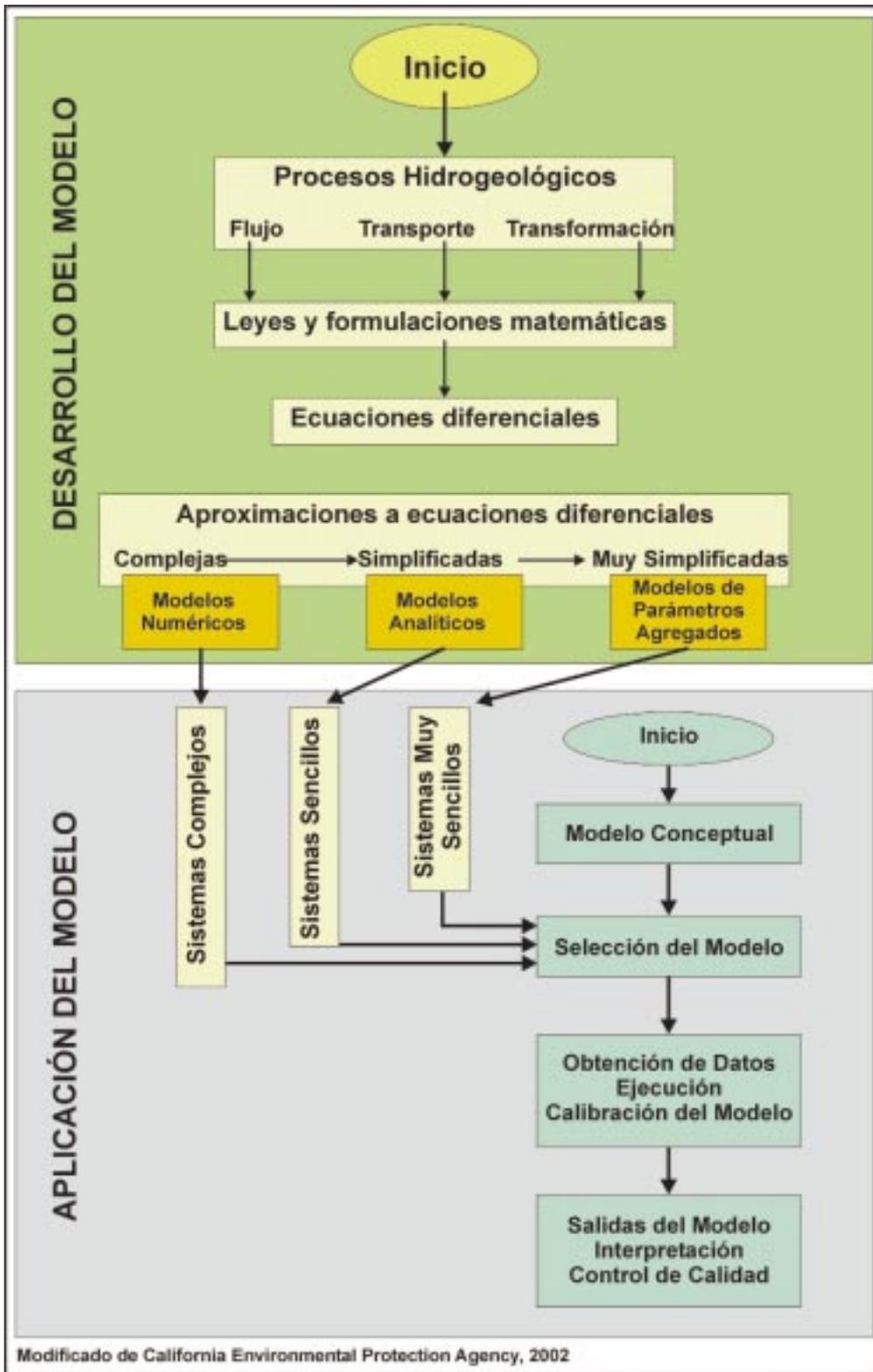
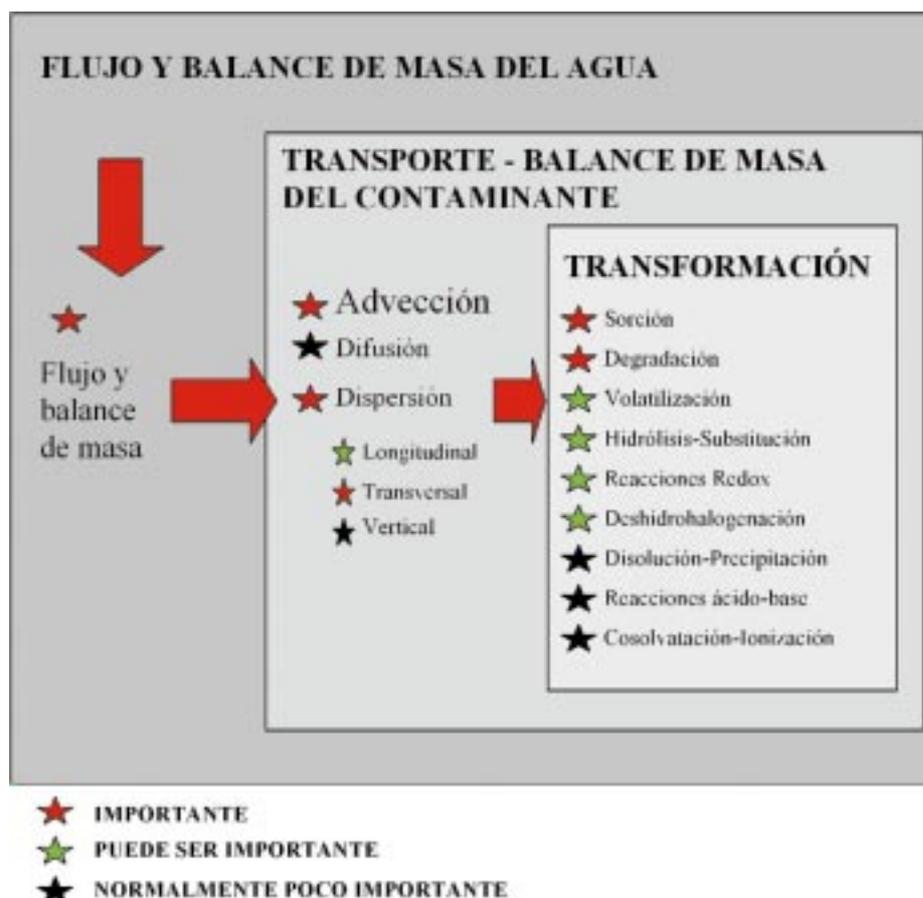


Figura 2: Aspectos a considerar en la aplicación de un modelo matemático a sistemas de aguas subterráneas.



Modificada de California Environmental Protection Agency, 2002.

Figura 3: Procesos hidrogeológicos que afectan al flujo de agua subterránea y al transporte de contaminantes.

Los modelos analíticos simples consideran todo el sistema como una única unidad y todo el periodo de tiempo simulado como un único paso de tiempo. Los modelos de elementos analíticos y modelos semianalíticos dividen el sistema en unidades hidrogeológicas y permiten considerar diferentes pasos de tiempo.

Aunque estos modelos requieren una cantidad de datos variable, dependiendo del modelo elegido, son mucho más simplistas que los modelos numéricos.

– Modelos de parámetros agregados:

Consideran que el sistema a simular está compuesto por diversos elementos. Cada uno, incluyendo el agua subterránea existente en el mismo, se considera que es homogéneo e isótropo y puede simularse mediante una ecuación simple. Las variaciones temporales pueden simularse solamente entre compartimentos, no dentro de ellos.

Permiten simular por ejemplo las condiciones transitorias que ocurren en el límite entre la zona vado-

sa y la zona saturada pero no pueden simularse las condiciones transitorias dentro de cada una de esas zonas. Requieren pocos datos reales usando datos genéricos proporcionados por el modelo.

Una vez adoptada la aproximación seleccionada se convierten las fórmulas resultantes en los códigos informáticos que constituyen el "software".

La aplicación del modelo a un sistema de agua subterránea específico (Figura 2) requiere, en primer lugar, desarrollar un modelo conceptual. La formulación de un modelo conceptual aceptable y realista es la etapa más importante en la aplicación de un modelo. Debe incluir, además de las simplificaciones del medio físico y condiciones de contorno, el objetivo del modelo y como alcanzarlo.

La siguiente etapa consiste en seleccionar de los diferentes modelos existentes, públicos y comerciales (numéricos, analíticos o de parámetros agregados), cuyas principales características han sido descritas previamente, el que se ajuste mejor al modelo conceptual y complejidad del sistema en lugar de seleccionarlo en base a la disponibilidad de datos

(Konikow, 1986). Así por ejemplo si un sistema es un acuífero homogéneo e isótropo de flujo predominantemente horizontal y se prevé que funcione en régimen estacionario para el periodo de tiempo simulado puede emplearse un modelo analítico simple para simular una pluma de contaminante que afecte a la zona superior del acuífero. Si por el contrario cabe esperar régimen transitorio con cambio en la dirección de flujo se requiere emplear modelos semianalíticos, modelos analíticos o modelos numéricos. En el caso de sistemas complejos en los que deba considerarse heterogeneidad, anisotropía, flujos tridimensionales y régimen transitorio solamente pueden emplearse modelos numéricos.

Después de seleccionar el modelo se debe proceder a la obtención de los datos requeridos por éste, ejecutar el modelo y proceder a calibrarlo e interpretar los resultados, elaborando posteriormente auditorías o controles de calidad del mismo que deberían incluir, entre otros, análisis de sensibilidad y de incertidumbre.

En los modelos analíticos se efectúa, como ha sido previamente detallado, una simplificación de las características hidrogeológicas del acuífero y de las condiciones de explotación siendo necesario introducir condiciones muy estrictas (pozos totalmente penetrantes, acuífero de extensión infinita...) que pueden alejarse sensiblemente de la realidad, por lo que para la delimitación de las zonas de restricciones que afectan a zonas más alejadas de la captación, resulta más conveniente la utilización de modelos numéricos (empleándose también habitualmente para estos la denominación de modelos matemáticos), cuando se dispone de información adecuada

para su ejecución y calibrado, ya que estos permiten tener en cuenta variaciones en los principales parámetros hidráulicos, heterogeneidades del acuífero, influencia de bombeos y otros factores, por lo que ofrecen resultados más similares al funcionamiento real del acuífero, lo cual facilita su traslado a la regulación urbanística, al eliminar problemas de sobreprotección que podrían causar pleitos con actividades restringidas indebidamente en el ámbito del perímetro.

Estas ventajas han llevado a que sean empleados cada vez con mayor frecuencia. Así el 80 % de los aproximadamente 800 perímetros de protección definidos en Inglaterra hasta 1994 se delimitaron empleando modelos numéricos bidimensionales en régimen estacionario (Foster, 1994).

En Dinamarca, cuyo abastecimiento se basa en un 99 % en aguas subterráneas (Madsen, 1994), se ha desarrollado y aplicado un modelo matemático que abarca toda la extensión del país, empleando el programa *Mike She*, que es un modelo de agua subterránea tridimensional, utilizando una malla de 1 km² y una discretización vertical en 7 a 9 capas (Madsen *et al.*, 1998), empleándose desde entonces como herramienta básica para la delimitación de los perímetros de protección.

En Estados Unidos los organismos *United States Geological Survey* (USGS) y *United States Environmental Protection Agency* (USEPA) emplean como modelos estándar para delimitar perímetros de protección los programas MODFLOW y MODPATH. Estos programas son también ampliamente utilizados por diferentes organismos en otros países.

2ª PARTE

6. PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO URBANO EN MEDIOS CON POROSIDAD INTERGRANULAR O ASIMILABLES EN SU FUNCIONAMIENTO A LOS MISMOS. EJEMPLO DE SU APLICACIÓN EN UN ACUÍFERO DETRÍTICO EN LA LOCALIDAD DE VILLACASTÍN (SEGOVIA)

El análisis de los diferentes aspectos a considerar en la protección de las captaciones de abastecimiento urbano efectuado en este capítulo se efectuará desarrollando su aplicación a un caso real, correspondiente a la protección de las captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín (Segovia) que captan un acuífero detrítico de la cuenca del río Duero, lo que proporciona un hilo conductor y un tratamiento integrado que facilitará su aplicación a otros trabajos.

La elección de la localidad de Villacastín, en la provincia de Segovia, para delimitar los perímetros de protección en sus captaciones de abastecimiento, se ha considerado idónea tras el análisis de sus características y problemática, que la hacen extrapolable a otras localidades, entre las que cabe destacar las siguientes:

- Capta un acuífero detrítico de la cuenca del río Duero, con la amplia extensión que tienen dichos materiales en España, con características, que los hacen especialmente indicados para la delimitación de perímetros de protección.
- Tiene una población, en torno a 1500 habitantes en el año 2001, y una actividad socioeconómica, agrícola, ganadera e industrial, de carácter medio.
- La infraestructura del abastecimiento a la población y las necesidades de agua para el mismo permiten analizar suficientemente los aspectos a considerar de un modo genérico en la problemática del abastecimiento a poblaciones.

- Los focos potenciales de contaminación en el término municipal son de diverso tipo: agrícola (básicamente cultivos de secano de cereales), ganadero (explotaciones extensivas e intensivas), urbanos e industriales.
- Los estudios precedentes efectuados en las zona (Martínez Navarrete y Fernández Sánchez, 1999 y 2000; Martínez Navarrete y García García, 2001 a y 2001 b; Martínez Navarrete, 2002), han puesto de relieve el interés del Ayuntamiento de Villacastín en garantizar la protección de sus captaciones de abastecimiento, y ha permitido disponer de una información de partida referente a los aspectos a considerar en la delimitación de perímetros de protección de captaciones de abastecimiento urbano.

6.1. Análisis de la información requerida para definir la protección a establecer en las captaciones de abastecimiento urbano

En el anexo 1 se desarrollan los análisis a efectuar, ilustrándose en el mismo en las tablas 9 a 17, figuras 4 a 17 y mapas 1 a 3 su aplicación a la localidad de Villacastín tomada como ejemplo. Los factores a considerar comprenderán:

- Situación geográfica.
- Marco geológico.
 - *Litoestratigrafía.*
 - *Tectónica.*
- Socioeconomía.
 - *Población.*
 - *Actividad socioeconómica del municipio.*
- Marco hidrogeológico.
- Hidrogeología del entorno de la localidad: naturaleza del acuífero; características de las captaciones; recarga-descarga; parámetros hidráulicos; hidroquímica y calidad.
- Problemática del abastecimiento a la población.

- *Infraestructura del abastecimiento.*
 - Captaciones de abastecimiento urbano.
 - Depósitos de almacenamiento y redes de distribución.
 - Red de alcantarillado y estaciones depuradoras.
- *Necesidades de agua para abastecimiento.*
- **Vulnerabilidad del acuífero frente a la contaminación.**
 - *Inventario de focos potenciales de contaminación.*
 - Focos potenciales de contaminación agrícolas.
 - Focos potenciales de contaminación ganaderos.
 - Focos potenciales de contaminación industriales.
 - Focos potenciales de contaminación urbanos.
 - *Vulnerabilidad de las diferentes zonas.*
- **Planeamiento urbanístico.**

6.2. Zonación de los perímetros de protección

La división de los perímetros de protección de captaciones de abastecimiento urbano en diversas zonas, con diferentes regulaciones a las actividades o instalaciones contempladas en las mismas, es una práctica generalizada en diversos países del mundo como ha sido analizado en el capítulo 2.

Este sistema de zonación permite encontrar un compromiso entre una protección adecuada y suficiente del recurso y el respeto, en la medida de lo posible, de la actividad socioeconómica de la región circundante.

La zonación y restricciones que se establecen son diferentes no obstante en cada país, definiéndose habitualmente en función de la naturaleza de los materiales captados (medios con porosidad intergranular o asimilables en su funcionamiento a los mis-

mos, kársticos y fisurados), los parámetros hidráulicos de los acuíferos y las características socioeconómicas, empleándose diferentes criterios para delimitar las zonas.

En la tabla 18 se relacionan los criterios existentes con el proceso físico que controlan. Se analizará detalladamente cada uno de ellos:

- Distancia

Consiste en delimitar un área definida por un círculo con centro en la captación.

Sus dimensiones se definen frecuentemente como una media de las obtenidas al aplicar en diferentes casos otros criterios más complejos.

Es el más elemental de los existentes, pudiendo valorarse como poco eficaz, puesto que no incorpora ninguna consideración sobre las condiciones de flujo del agua subterránea, ni respecto a los procesos implicados en el transporte de los contaminantes en cada caso particular.

- Descenso

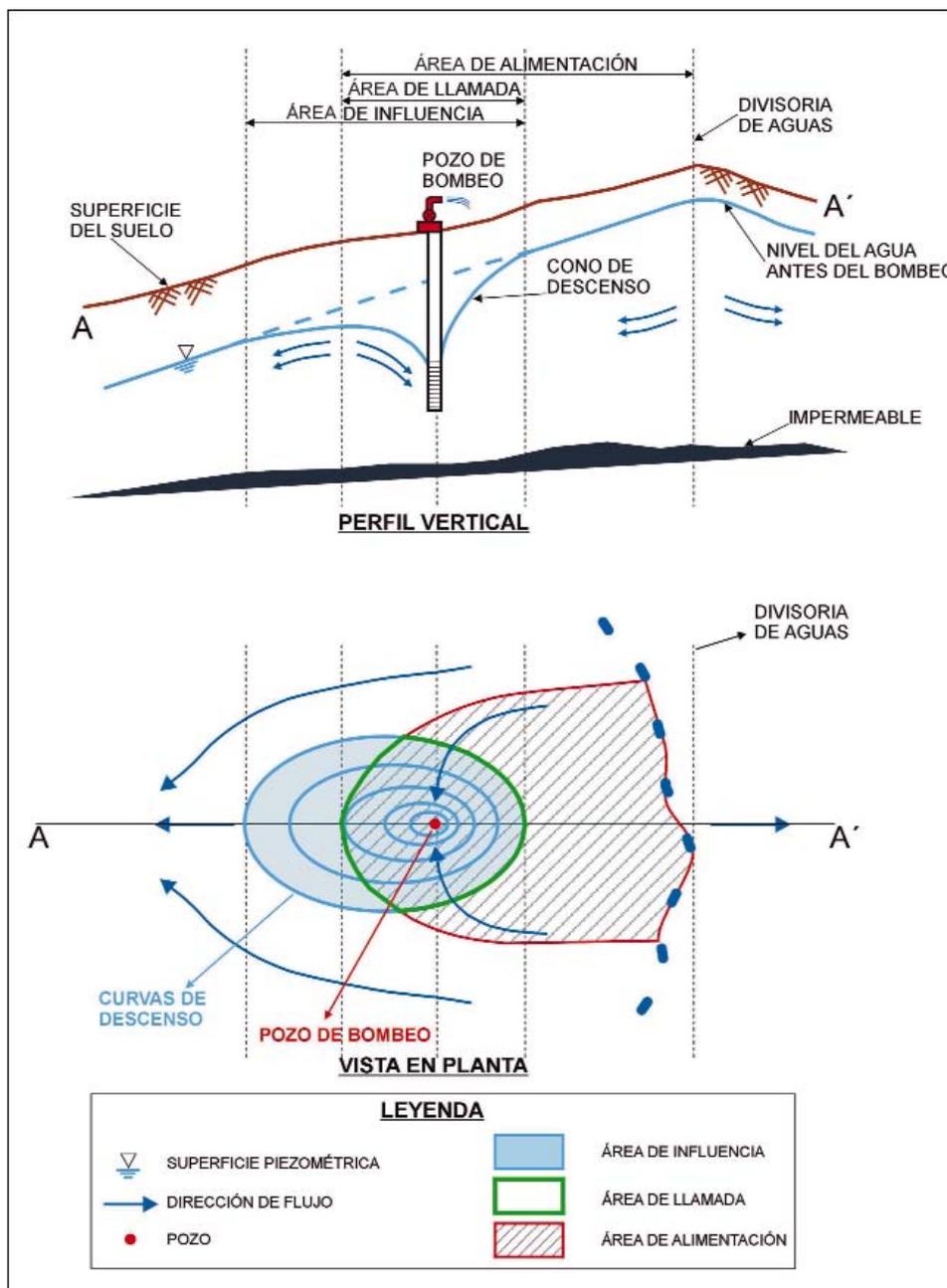
Se basa en considerar que el área en la cual desciende el nivel del agua subterránea, debido al efecto del bombeo, se producen cambios en la dirección del flujo subterráneo y un aumento de la velocidad con la que el agua llega a la captación, debido al incremento del gradiente hidráulico, produciendo o acelerando la migración del contaminante hacia ella.

Ha sido mal aplicado en numerosas ocasiones debido a la idea errónea de que el área de alimentación y el área de influencia coinciden. Esto sólo es cierto en aquellas zonas en las cuales antes de comenzar a bombear no haya gradiente hidráulico o éste sea despreciable. En la figura 18 puede observarse cómo difieren ambas cuando se considera la existencia de gradiente hidráulico. En este caso, que es el más habitual, no toda el área de

Tabla 18: Relación entre los criterios que pueden emplearse en la delimitación de perímetros de protección y los procesos físicos que controlan.

Criterio	Proceso físico	Distancia	Descenso	Tiempo de tránsito	Criterios hidrogeológicos	Poder autodepurador del terreno
Advección			●	●	●	
Dispersión hidrodinámica (dispersión mecánica y difusión molecular)				●		●
Interacción sólido-soluto (reacciones químicas de adsorción)				●		●

Fuente : USEPA, 1987



Fuente: Modificado de USEPA, 1987 en Moreno Merino *et al.*, 1991

Figura 18: Área de influencia y área de alimentación en un acuífero con gradiente hidráulico en régimen estacionario.

influencia queda englobada en el área de llamada y en el área de alimentación. Por otra parte la contaminación producida fuera del área de influencia, pero dentro del área de alimentación, podrá alcanzar la captación en un periodo de tiempo variable, que es función de la distancia a la misma.

– Tiempo de tránsito

Mediante este criterio se evalúa el tiempo que un contaminante tardaría en llegar a la captación que se pretende proteger.

Los cálculos para la determinación del tiempo de tránsito se realizan considerando principalmente el proceso de advección, que es el más conocido y el que tiene mayor importancia en acuíferos con alta velocidad de flujo, si bien también tiene en cuenta la dispersión hidrodinámica y la interacción sólido-soluto que adquieren mayor relevancia en aquellos acuíferos en que la velocidad de flujo es menor.

Es uno de los criterios más exactos que existen puesto que considera diversos factores que afectan a la evaluación del proceso.

En definitiva, el objetivo que se pretende con su aplicación es definir zonas alrededor de las captaciones con la suficiente amplitud para que el resultado de una actividad contaminante tarde en llegar a la misma un tiempo determinado que permita su degradación, o proporcione una capacidad de reacción que haga posible un cambio temporal en la fuente de suministro a la población, hasta que la degradación de la calidad de las aguas extraídas disminuya a límites aceptables.

– Criterios hidrogeológicos

Su elección se fundamenta en la asunción de que una contaminación que se produjese en el área de alimentación de una captación podría alcanzarla transcurrido un cierto periodo de tiempo, por lo que debe delimitarse ésta y protegerla en su totalidad.

Se trata por tanto de identificar los límites hidrogeológicos que delimitan el área en la cual el agua procedente de la precipitación después de infiltrarse llegar a alcanzar la captación. Éstos son de diversos tipos, pudiendo actuar como tales ríos, canales, lagos divisorias piezométricas y materiales impermeables entre otros.

La aplicación de este criterio va a implicar en muchas ocasiones la protección de un área mayor de la necesaria. Su empleo es también muy usual en acuíferos pequeños, en los que el tiempo de tránsito hasta los límites es muy reducido, por lo que disminuye notablemente al área sobreprotegida que su aplicación implicará.

En cualquier caso es sumamente recomendable su utilización en conjunción con otros criterios tanto para valorar si los límites hidrogeológicos existentes van a restringir su utilización como para modificar cuando sea preciso los resultados que éstos puedan proporcionar.

– Poder autodepurador del terreno.

Consiste en utilizar la capacidad que poseen los diferentes terrenos para atenuar la concentración de los contaminantes que los atraviesan como criterio para definir la extensión de éstos que deben recorrer un agua contaminada hasta alcanzar una calidad admisible para el consumo humano.

En esta capacidad depuradora del terreno intervienen procesos físicos, químicos y biológicos que actúan de modo diferente para cada contaminante, por lo cual deben realizarse experiencias previas que permitan evaluarlos convenientemente.

El estudio requerirá el análisis detallado del perfil edafológico, textura, estructura, composición mineralógica, porosidad, así como las características propias de cada contaminante que sea preciso considerar.

Las zonaciones aplicadas a los perímetros de protección han sido habitualmente modificadas a lo largo del tiempo, para adecuarlas al grado de desarrollo metodológico alcanzado en su delimitación, la realidad socioeconómica y las experiencias resultantes de su aplicación al territorio, que han permitido evaluar su eficacia.

En la legislación de Estados Unidos, Canadá y numerosos países europeos (Alemania, Suiza, Bélgica, Holanda, Reino Unido, Portugal e Italia entre otros), se especifica en cuantas zonas deben subdividirse los perímetros de protección y, con mayor o menor precisión en cada país, con qué criterios delimitarlos y las restricciones a imponer a diversas actividades en las mismas (Lallemant-Barrès, Roux, 1989 y 1999).

A pesar de las diferentes regulaciones existe no obstante una serie de similitudes en muchas de ellas. Así, es mayoritaria la división de los perímetros de protección en tres zonas, para proteger frente a la contaminación, si bien con denominaciones distintas en cada país.

La primera de ellas, la más cercana a la captación a proteger, suele definirse en función de una distancia fija, que varía normalmente entre 10 a 60 metros, o un tiempo de tránsito de 1 día e incluiría consideraciones sobre las características de la perforación y sus sistemas de protección para evitar contaminaciones desde la superficie, espacio anular y defectos en el entubado entre otros (Frank *et al.*, 1998).

La segunda zona, destinada a proteger contra la contaminación bacteriológica, se delimita mayoritariamente con un tiempo de tránsito de 50 ó 60 días (si bien en la legislación canadiense específica de la provincia de Quebec ésta se incrementa hasta los 200 días para la protección bacteriológica y 550 días para la protección virológica), o una distancia, que depende, entre otros factores, del tipo de material acuífero captado.

La tercera zona se define considerando el tipo de material acuífero y, en algún país, como es el caso de Alemania, considerando además la velocidad de flujo y la existencia o no de materiales de baja permeabilidad recubriéndolos. Se delimita en función del área de alimentación de la captación, distancias fijas, definidas según las diferentes características del acuífero, o un tiempo de tránsito. En los países en que se utiliza un tiempo de tránsito, éste varía de 1

a 25 años. Así por ejemplo el empleado en Portugal es de 10 años, de 10 a 25 años en Holanda y de 15 a 20 años en Estados Unidos.

Además de estas zonas se consideran en algún país zonas especiales, como las definidas en Portugal en zonas kársticas o fisuradas y frente a la intrusión marina.

En la legislación española, como ha sido analizado detalladamente en el capítulo 3, se ha definido un perímetro de protección único, en cuyo ámbito pueden imponerse limitaciones al otorgamiento de nuevas concesiones de agua y autorizaciones de vertido, así como condicionamientos a diversas actividades que puedan afectar a la cantidad o calidad de las aguas. Éstas deben detallarse en el documento de delimitación del perímetro, correspondiendo a la Junta de Gobierno del Organismo de cuenca su aprobación, como se indica en el Reglamento del Dominio Público Hidráulico de 1986 (BOE, 1986) y en el texto refundido de la Ley de Aguas (BOE, 2001 c).

La regulación no tiene por qué ser similar en toda su extensión, por lo que sí se puede admitir en la práctica el dividir el perímetro en diversas zonas alrededor de la captación, graduadas de mayor a menor importancia en cuanto a las restricciones de actividad impuestas sobre ellas, si bien debe definirse en cada estudio las zonas a delimitar, sobre la base de qué criterios efectuarlo, y las restricciones a imponer a las mismas.

La zonificación empleada con mayor frecuencia para la protección de la calidad en las propuestas de perímetros de protección en medios con porosidad intergranular o asimilables, como se esquematiza en la figura 19, es la siguiente:

- **Zona inmediata o de restricciones absolutas:** el criterio de delimitación suele ser un tiempo de tránsito de 1 día o un área fijada de forma arbitraria de pequeña extensión (100 a 400 m²). Estará vallada para impedir el acceso de personal no autorizado a las captaciones.

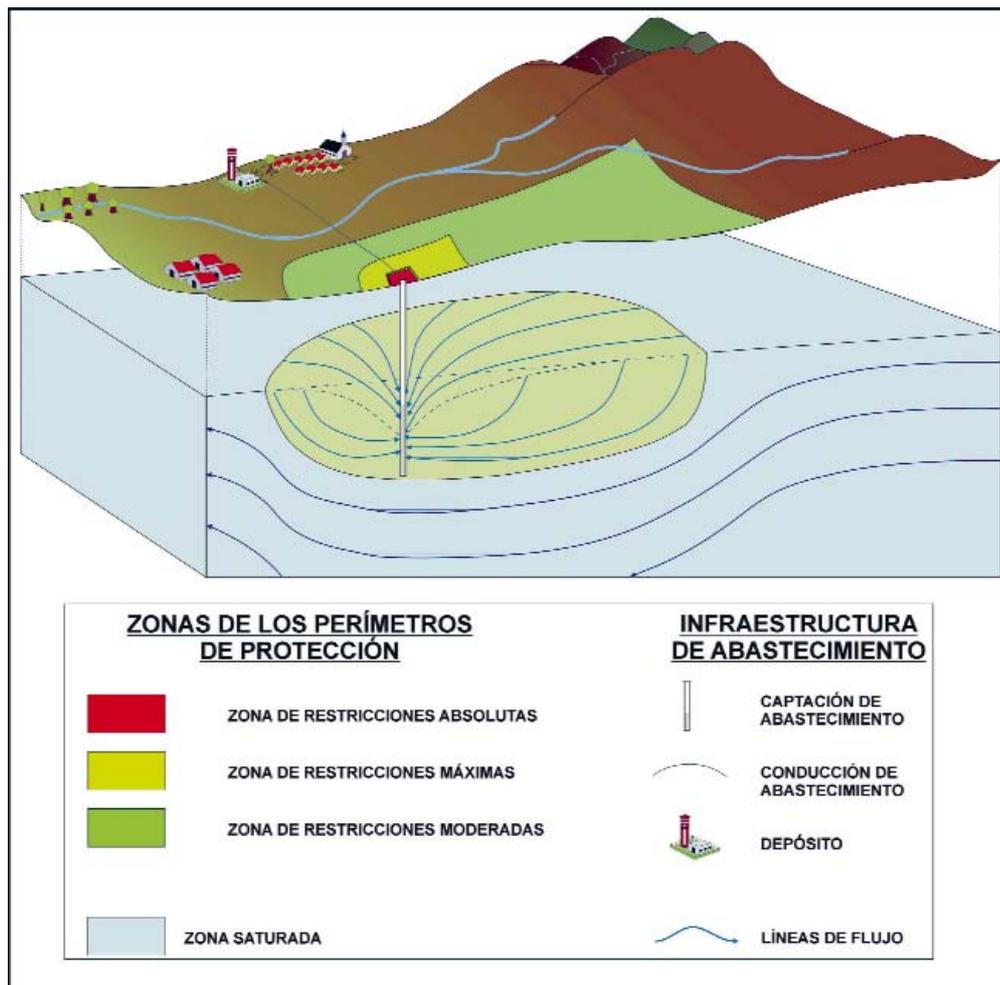


Figura 19: Zonas a establecer en los perímetros de protección de la calidad para captaciones de abastecimiento urbano.

- **Zona próxima o de restricciones máximas:** se dimensiona generalmente en función de un tiempo de tránsito de 50 días, que permite proteger contra la contaminación microbiológica, utilizando también criterios hidrogeológicos. En algunos estudios no obstante se ha delimitado también empleando un criterio de descenso o de poder autodepurador del terreno.
- **Zona alejada o de restricciones moderadas:** el criterio más utilizado para su dimensionado es un tiempo de tránsito de varios años, criterios de tipo hidrogeológico o una combinación de ambos. Su objetivo es proteger la captación frente a contaminantes de larga persistencia. El tiempo de tránsito empleado en esta zona de restricciones moderadas se ha definido frecuentemente en función de los focos potenciales de contaminación existentes en el entorno de la captación, y de las características hidrogeológicas del acuífero captado, empleándose valores muy dispares en el estudio.

Una propuesta de modificación de esta zonación (MIMAM, 2002 a y 2002 b) contemplaría:

- “Zona 0 o de protección sanitaria” que representaría el ámbito de protección inmediata a la captación y estaría vallada.
- “Zona I de protección microbiológica” que abarcaría desde la anterior hasta la isocrona de 50 días para garantizar una protección contra la contaminación microbiológica.
- “Zona II de dilución y control”. Protegería frente a contaminantes químicos de larga persistencia, principalmente no degradables limitándose mediante la isocrona de 5 años.
- “Zona III de captación”. Abarca toda el área de alimentación de la captación.

Las zonas a establecer en los acuíferos en medios kársticos y fisurados, así como en los acuíferos confinados serán objeto de análisis en los capítulos 7, 8 y 9.

La protección de la cantidad ha sido abordada en gran parte de los estudios de perímetros de protección efectuados en España que la contemplan (Martínez Navarrete y López Geta, 2001) definiéndose una “zona de protección de la cantidad”, con el fin de preservar los caudales que realmente son empleados para abastecer a la población.

En esas zonas, delimitadas con una metodología diferente a la empleada para la calidad, se indicaban las limitaciones que se proponían a otras captaciones en el acuífero para garantizar esos caudales, empleándose normalmente como fundamentos el descen-

so del nivel piezométrico, criterios hidrogeológicos y frecuentemente una combinación de ambos.

Respecto a la protección de la cantidad en España hay que reseñar además que la modificación establecida en la Ley de Aguas, recogida en el artículo 56.3 de su texto refundido (BOE, 2001 c), contemplando únicamente la determinación de perímetros de protección para proteger las aguas subterráneas frente a los riesgos de la contaminación, sin modificar ni derogar los reglamentos existentes, R.D.P.H. de 1986 (BOE, 1986) y R.A.P.A.P.H. de 1988 (BOE, 1988), que desarrollaban la Ley de Aguas de 1985 (BOE, 1985), plantea además alguna incertidumbre sobre los perímetros de protección que tienen como objetivo salvaguardar la cantidad (como se analizó en el capítulo 3).

En este sentido, cabe considerar la reflexión indicada en dicho capítulo de establecer otro mecanismo que permitiera contemplar regulaciones en un área alrededor de la captación, definiendo integradamente el volumen global máximo de extracción en el entorno delimitado para los diferentes usos. La metodología aplicable con este fin será analizada en el apartado 6.6. incluyéndose en el apartado 6.8. una propuesta de modificaciones legales a establecer para su aplicación.

6.3. Métodos para la delimitación de los perímetros de protección de la calidad

Métodos aplicados en captaciones en acuíferos con porosidad intergranular. Aplicación al abastecimiento urbano de Villacastín.

El análisis efectuado de los diversos métodos empleados, a nivel mundial, para delimitar perímetros de protección de la calidad de captaciones en diferentes materiales, y de las experiencias resultantes de su aplicación, ha permitido seleccionar los métodos más apropiados para su utilización en acuíferos con porosidad intergranular o asimilables en su funcionamiento a los mismos.

Los métodos finalmente elegidos se utilizarán para delimitar las zonas de restricciones obtenidas para diferentes tiempos de tránsito, o mediante otros criterios, de los perímetros de protección de la calidad en las captaciones de abastecimiento urbano. Son los siguientes:

- Métodos hidrogeológicos.
- Análisis del sistema de flujo combinado con el cálculo del tiempo de tránsito.

- Radio fijo calculado: ecuación volumétrica, método de la recarga y función del descenso.
- Método de Wyssling.
- Análisis del sistema de flujo combinado con la ecuación de flujo uniforme.
- Método de Jacobs y Bear.
- Solución analítica simple para la aproximación a isocronas que definen zonas de transporte.
- Método de Krijgsman y Lobo Ferreira.
- Método de Rehse para el cálculo del poder depurador de los materiales.
- Modelo matemático: Visual Modflow y Visual Modpath.

En los siguientes apartados se incluye, para cada uno de esos métodos, una síntesis de sus requisitos, limitaciones, datos necesarios, formulaciones matemáticas que emplean, incluyéndose éstas en hojas de cálculo para facilitar su utilización, los datos empleados en cada captación (procedentes del análisis efectuado en el capítulo 6) y los resultados obtenidos para diferentes tiempos de tránsito (excepto en los métodos que no emplean éste como criterio de delimitación).

6.3.1. Métodos hidrogeológicos

La delimitación de perímetros de protección empleando métodos hidrogeológicos exclusivamente se basa en el análisis de los límites del acuífero captado, cartografía hidrogeológica en el entorno de las captaciones, análisis de las isopiezas y direcciones de flujo, relación entre el acuífero y los ríos y arroyos que lo surcan, zonas de emergencia del agua subterránea, entre otros factores.

Los perímetros de protección de los sondeos de abastecimiento urbano de Villacastín que captan el acuífero detrítico del terciario y cuaternario, cuyos resultados se muestran en la figura 20, se han delimitado considerando los siguientes factores:

- El límite sur del acuífero, constituido por el contacto con las rocas graníticas hercínicas se ha considerado como límite impermeable y por tanto límite sur de los perímetros de protección, aunque podría existir localmente un flujo y aportación lateral de escasa entidad desde el granito hacia el acuífero captado.
- El análisis de las isopiezas, elaboradas en base a los valores de piezometría en los puntos de agua inventariados, permite definir las direcciones de flujo en el acuífero y por tanto el área de alimentación de las captaciones. Al este del arroyo de los Prados se ha considerado que existe una divisoria piezométrica que limita los perímetros por el este.
- El arroyo Cardeña drena hacia el oeste los mate-

riales de su entorno, por lo que estos no han sido incluidos en el ámbito de los perímetros de protección.

Hay que destacar que se ha incluido en los perímetros de protección la zona ubicada entre el arroyo de los Prados y la divisoria piezométrica existente al este de dicho arroyo antes indicada.

Se ha aplicado este criterio conservativo, que probablemente sobreprotege dicha zona, pese a que el arroyo de los Prados es ganador, como indica el análisis de las isopiezas y las observaciones de campo efectuadas en diferentes fechas en el mismo, por lo que es poco probable que una contaminación en esta zona alcanzara las captaciones ubicadas al otro lado de este eje de descarga del acuífero.

La contaminación sí se produciría en el caso de que los bombeos en esa zona provoquen descensos del nivel piezométrico tales que el río pasase a ser perdedor, o también si los bombeos alterasen el régimen de flujo en profundidad, permitiendo flujo profundo desde la zona este del arroyo de los Prados hacia las captaciones de abastecimiento.

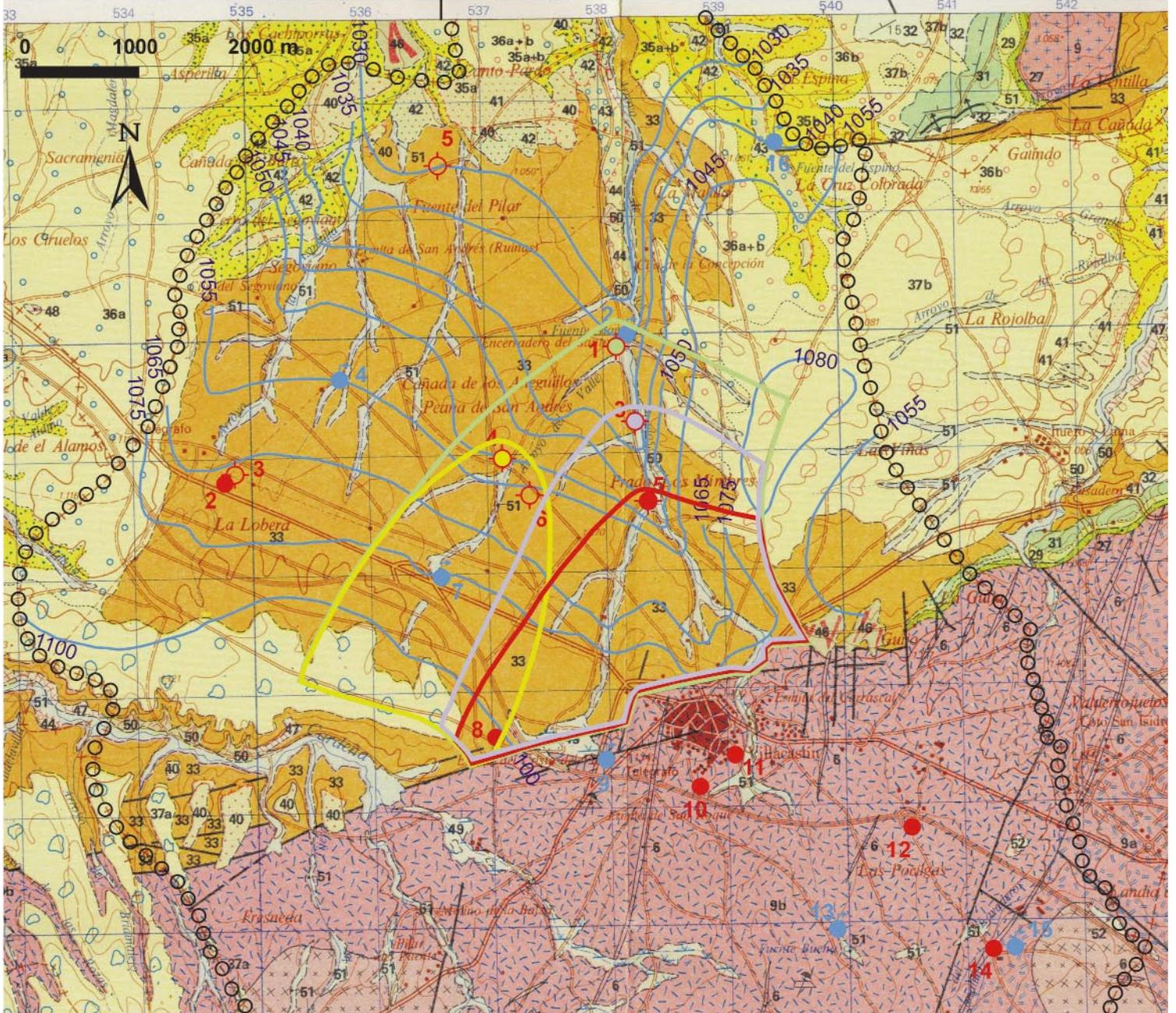
La aplicación de métodos hidrogeológicos, exclusivamente, delimita el área de alimentación de cada captación, pero no permite su subdivisión en diferentes zonas, como si posibilita el empleo de métodos que consideran el tiempo de tránsito.

Hay que reseñar finalmente que el análisis hidrogeológico de detalle del acuífero captado es, en todo caso, imprescindible para la obtención de diversos parámetros requeridos para los demás métodos, y como complemento a los mismos para definir los perímetros de protección.

6.3.2. Método de análisis del sistema de flujo combinado con el cálculo del tiempo de tránsito

En este método se asume un acuífero con flujo bidimensional en medio con porosidad intergranular o asimilable, sin discontinuidades, en el que los contaminantes se mueven en el agua subterránea con su misma dirección y velocidad (United States Environmental Protection Agency, USEPA, 1991 a). Al aplicarlo se delimita en primer lugar el área de alimentación a la captación (área desde ésta hasta la divisoria hidrogeológica en la cual toda partícula en ella ubicada alcanzará el pozo de bombeo con independencia del tiempo de tránsito requerido para ello). Ésta se calcula en base al análisis del mapa de isopiezas, las correspondientes líneas de flujo trazadas hasta la captación y la ley de Darcy.

Hoja 17-20, Octante 1 | Hoja 17-20, Octante 2



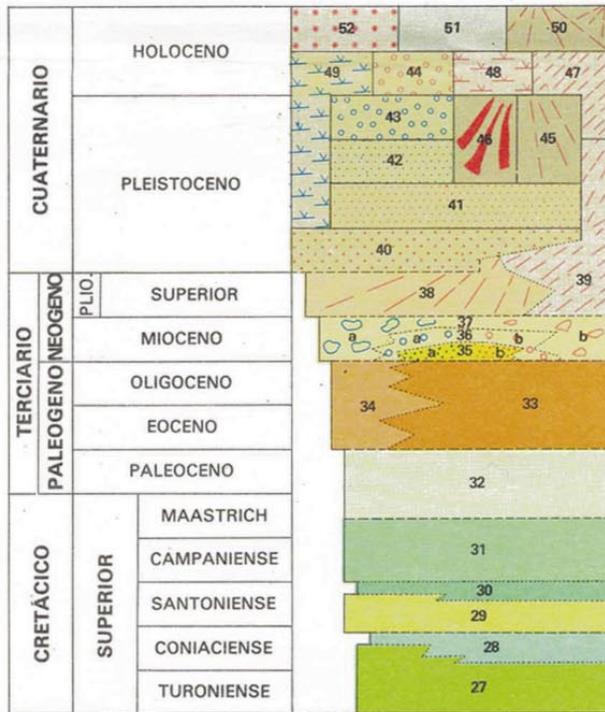
SIMBOLOGÍA

- | | | | | | |
|---|------|---|---|---|---|
|  | 5 | Sondeo y número de identificación. |  | 1 | Perímetro de protección del sondeo Puente Alzado. |
|  | 12 | Pozo y número de identificación. |  | 3 | Perímetro de protección del sondeo Cañada del Abad. |
|  | 15 | Manantial y número de identificación. |  | 5 | Perímetro de protección del sondeo Camino del Valle |
|  | 1055 | Isopiezas acuífero detrítico del Terciario y Cuaternario m s.n.m. (Octubre 2001). |  | 4 | Perímetro de protección del sondeo San Bartolomé. |
|  | | Límite del término municipal de Villacastín. | | | |

Base cartográfica tomada de Pérez González *et al.*, 1990.
Fuente: Martínez Navarrete, 2002.

Figura 20: Delimitación de perímetros de protección de las captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín en el acuífero del Terciario detrítico empleando métodos hidrogeológicos.

LEYENDA GEOLÓGICA DE LA FIGURA 20



- 52 Materiales antrópicos.
- 51 Arenas, limos, gravas y cantos (Aluviales. Fondos de valle).
- 50 Cantos, bloques y arenas (Conos de deyección).
- 49 Limos, arenas y turberas (Fondos de navas).
- 48 Limos orgánicos (Fondos de charcas).
- 47 Cantos, bloques y arenas (Coluviones y pedrizas).
- 46 Arenas limosas con cantos dispersos (Glacis).
- 45 Bloques y cantos (Conos de deyección).
- 44
- 44a Cantos y arenas (Terrazas).
- 40
- 39 Bloques, cantos y limos amarillentos (Coluviones con matriz).
- 38 Cantos y bloques con limos arenosos amarillentos.
- 37 Bloques y cantos.
- 36 Cantos y arenas.
- 35 Arenas a) Litoareníticas (área fuente de metasedimentos de bajo grado) b) Arcóscicas (área fuente de materiales ígneos y metamórficos).
- 34 Bloques y cantos "Serie Arcóscica".
- 33 Gravas y arenas "Serie Arcóscica".
- 32 Arenas, gravas silíceas y arcillas.
- 31 Dolomías y margas. Formación "Dolomías y margas VALLE DE TABLADILLO".
- 30 Margas, dolomías y areniscas. Miembro "Dolomías de MONTEJO". Formación Calizas y dolomías de CASTROJIMENO.
- 29 Areniscas dolomíticas. Miembro "Areniscas dolomíticas de HONTORIA". Formación Calizas y dolomías de CASTROJIMENO.
- 28 Margas y dolomías. Formación "Dolomías tableadas de CABALLAR".
- 27 Arenas, arcillas y conglomerados. Formación "Arenas y arcillas de SEGOVIA".
- 26 Cuarzitas masivas. CUARCITA ARMORICANA.
- 25 Cuarzitas, metaconglomerados, filitas y pizarras. CAPAS DEL VOLTOYA.
- 24 Filitas y pizarras con laminaciones arenosas. CAPAS DEL MEDIANA.
- 23 Calizas
- 17 Ortoneises glandulares.

AFLORAMIENTO DE OJOS ALBOS



ROCAS IGNEAS PREHERCÍNICAS



ROCAS GRANÍTICAS HERCÍNICAS



- 11 Adamellitas - granitos de grano fino medio. Tipo NAVALDRINAL.
- 9 Adamellitas con abundantes enclaves microgranulares. Tipo EL ESPINAR.
 - a) Porfídica. b) Con anfíbol.
- 6 Cuarzo.
- 5 Lamprófidos camptoníticos.

Al delimitar el área de alimentación en diversos estudios de perímetros de protección en USA (USEPA, 1991 a) se propuso iniciar el trazado de las líneas de flujo arbitrariamente a 150 o 300 metros a cada lado de la captación y, para evitar definir un área excesivamente estrecha y como medida de seguridad, se planteó incluir a sus lados una "zona de seguridad" (con anchura cero a la altura de la captación y que iría abriéndose con un ancho de 75 metros cada 300 metros de distancia a la captación), trazándose las líneas de flujo hasta la divisoria hidrogeológica. En el caso de existir varios acuíferos superpuestos se efectúa independientemente para cada uno hasta alcanzar la divisoria hidrogeológica que les corresponda, que puede ser diferente. El área de alimentación final se obtendrá superponiendo las correspondientes a los distintos acuíferos así como aquellas zonas en que el flujo obtenido de las isopiezas indique que una partícula sobre ellas alcanzará lateralmente el área de alimentación de los acuíferos profundos, ya que de esta iría hasta la captación.

Una vez definida el área de alimentación se determinará la distancia aguas arriba de la captación correspondiente a diferentes tiempos de tránsito mediante el empleo de las siguientes ecuaciones:

$$d = V_e \cdot t$$

$$V_e = \frac{K \cdot i}{m_e}$$

Donde:

- V_e : Velocidad lineal media
- K : Conductividad hidráulica
- i : Gradiente hidráulico
- m_e : Porosidad eficaz
- t : Tiempo de tránsito
- d : Distancia aguas arriba de la captación hasta la línea de tiempo de tránsito

Esta distancia se traza como el radio de un círculo definiéndose el perímetro de protección para cada tiempo de tránsito como la parte de ese círculo incluido en el área de alimentación definida por el análisis de isopiezas y líneas de flujo.

Los tiempos de tránsito se definen hasta llegar a la divisoria hidrogeológica y dependen de las circunstancias de cada estudio. A modo de ejemplo en algunos casos se consideró tiempos de tránsito de 1, 4 y 13 años llegando en algunos casos hasta los 100 años (USEPA, 1991 a).

Los resultados obtenidos al aplicar este método se indican en las tablas 19 y 20.

Tabla 19: Resultados obtenidos aplicando el método de análisis del sistema de flujo combinado con el cálculo del tiempo de tránsito a las captaciones de abastecimiento a Villacastín en el acuífero del Terciario detrítico.

	Parámetros	Captaciones de abastecimiento en el acuífero del Terciario detrítico			
		Sondeo San Bartolomé (172020004)	Sondeo Puente Alzado (172020001)	Sondeo Cañada del Abad (172020003)	Sondeo Camino del Valle (172020005)
Datos de Partida	$K = T/b$ (m/día)	0,32	0,33	0,36	0,34
	i	0,025	0,011	0,02	0,04
	m_e	0,002	0,002	0,002	0,002
	V_e (m/día)	4	1,815	3,6	6,8
Resultados de las Fórmulas	$t_{1 \text{ día}}$	1	1	1	1
	$d_{1 \text{ día}}$ (m)	4	2	4	7
	$t_{50 \text{ días}}$	50	50	50	50
	$d_{50 \text{ días}}$ (m)	200	91	180	340
	$t_{4 \text{ años}}$	1.460	1.460	1.460	1.460
	$d_{4 \text{ años}}$ (m)	5.840	2.650	5.256	9.928
	$t_{25 \text{ años}}$	9.125	9.125	9.125	9.125
	$d_{25 \text{ años}}$ (m)	36.500	16.562	32.850	62.050

Tabla 20: Desarrollo del cálculo, por el método de análisis del sistema de flujo combinado con el cálculo del tiempo de tránsito, de las zonas de restricciones de los perímetros de protección de las captaciones de abastecimiento a Villacastín, en el acuífero del Terciario detrítico, empleando el programa Microsoft Excel.

<u>APLICACIÓN DEL MÉTODO AL SONDEO "SAN BARTOLOMÉ"</u>				
<u>Datos de partida:</u>		<u>Resultados:</u>		
		Días	Días	Días
		Días	Días	Días
		Tiempo:	1	50 1460 9125
Conductividad hidráulica:	K= 0,32 m/día			
Porosidad eficaz:	m_e = 0,002	d=	4	200 5840 36500
Gradiente hidráulico:	i = 0,025			
Velocidad:	V = 4 m/día			
<u>APLICACIÓN DEL MÉTODO AL SONDEO "PUENTE ALZADO"</u>				
<u>Datos de partida:</u>		<u>Resultados:</u>		
		Días	Días	Días
		Días	Días	Días
		Tiempo:	1	50 1460 9125
Conductividad hidráulica:	K= 0,33 m/día			
Porosidad eficaz:	m_e = 0,002	d=	2	91 2650 16562
Gradiente hidráulico:	i = 0,011			
Velocidad:	V = 1,815 m/día			
<u>APLICACIÓN DEL MÉTODO AL SONDEO "CAÑADA DEL ABAD"</u>				
<u>Datos de partida:</u>		<u>Resultados:</u>		
		Días	Días	Días
		Días	Días	Días
		Tiempo:	1	50 1460 9125
Conductividad hidráulica:	K= 0,36 m/día			
Porosidad eficaz:	m_e = 0,002	d=	4	180 5256 32850
Gradiente hidráulico:	i = 0,020			
Velocidad:	V = 3,6 m/día			
<u>APLICACIÓN DEL MÉTODO AL SONDEO "CAMINO DEL VALLE"</u>				
<u>Datos de partida:</u>		<u>Resultados:</u>		
		Días	Días	Días
		Días	Días	Días
		Tiempo:	1	50 1460 9125
Conductividad hidráulica:	K= 0,34 m/día			
Porosidad eficaz:	m_e = 0,002	d=	7	340 9928 62050
Gradiente hidráulico:	i = 0,040			
Velocidad:	V = 6,8 m/día			

6.3.3. Método del radio fijo calculado: Ecuación volumétrica y Método de la recarga

El método se basa en un análisis bidimensional del balance de agua asumiendo un flujo ambiental (flujo direccional en el acuífero) despreciable (Figura 21). Si se asume un flujo radial hacia el pozo en un acuífero con espesor saturado (b) constante, el cilindro que corresponde a una isocrona de tiempo de tránsito (t) tiene un radio fijo (R) tal que cualquier partícula que entre en ese cilindro, o ya este dentro, tardará un máximo de t días antes de ser bombeada en el pozo.

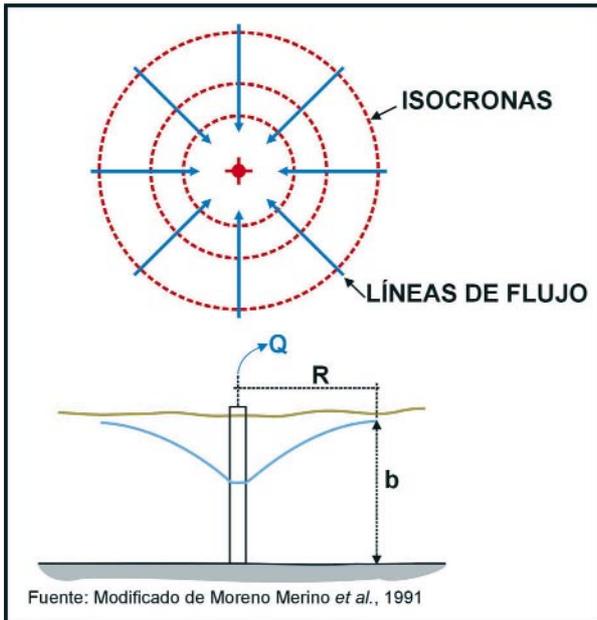


Figura 21: Radio fijo calculado. Líneas de flujo e isocronas.

El balance de agua para el periodo t es (USEPA, 2000):

$$N \cdot \pi \cdot R^2 \cdot t + m_e \cdot \pi \cdot R^2 \cdot b = Q \cdot t$$

Donde:

- N : Recarga procedente de infiltración de la precipitación (m/día)
- R : Radio del perímetro de protección a calcular (m)
- t : Tiempo de tránsito hasta la captación (días)
- m_e : Porosidad eficaz del acuífero
- b : Espesor saturado (m)
- Q : Caudal bombeado en la captación (m³/día)

El primer término de esa ecuación representa la entrada al acuífero debido a la recarga.

El segundo término representa el agua contenida dentro del cilindro.

El término de la derecha de la igualdad representa la cantidad total de agua extraída del pozo durante el periodo de bombeo.

El radio puede expresarse como:

$$R = \sqrt{\frac{Q \cdot t}{(N \cdot \pi \cdot t) + (m_e \cdot \pi \cdot b)}}$$

Se pueden tener dos casos simplificados:

Método del radio fijo calculado. Ecuación volumétrica

En el método volumétrico (USEPA, 1993 a) se considera que el término $(N \cdot \pi \cdot t)$ es muy pequeño debido a pequeños valores de tiempo o de recarga o de ambos.

Por lo tanto:

$$R = \sqrt{\frac{Q \cdot t}{m_e \cdot \pi \cdot b}}$$

Método del radio fijo calculado. Método de la recarga

En el método de la recarga (USEPA, 1993 a) cuando el tiempo alcanza valores muy grandes se considera exclusivamente el primer término de la ecuación, correspondiente a la recarga y despejando se obtiene la zona de captura que viene dada por la ecuación:

$$R = \sqrt{\frac{Q}{N \cdot \pi}}$$

Todas estas ecuaciones sólo se aplican si se cumple la suposición de Dupuit, es decir flujo horizontal somero. Si la zona de captura o el radio de la isocrona es menor que dos veces el espesor saturado del acuífero y el pozo no es totalmente penetrante, los efectos tridimensionales pueden llegar a ser importantes y la aproximación podría conducir a subestimar el radio de la isocrona de la zona de captura (R). Esto se puede evitar sustituyendo el espesor saturado del acuífero por la longitud de rejilla en el pozo.

La isocrona radial simétrica sólo será válida si no hay flujo ambiental o el pozo domina el flujo dentro del área correspondiente a esa isocrona.

Para una isocrona de 1 ó 2 años y un pozo con alta capacidad de bombeo la ecuación de flujo radial es frecuentemente asumible. Sin embargo un pozo con poca capacidad de bombeo en un área con fuerte flujo ambiental tendrá una isocrona alargada que se extenderá aguas arriba en la dirección del flujo que no se ajustará a las isocronas circulares.

El asumir un espesor saturado constante es cierto en acuíferos confinados cuyo espesor no varíe, pero en acuíferos libres, incluso asumiendo flujo horizontal, el espesor saturado no es constante debido a los descensos por bombeos del nivel piezométrico. Usando el espesor saturado más pequeño en la ecuación del método volumétrico se obtendrá una zona de captura conservativa (protectora).

Una modificación del método de la recarga se emplea también para determinar el área de alimentación de una captación delineándose esta, en lugar de mediante un radio fijo, con una forma obtenida del análisis piezométrico y otros criterios hidrogeológicos (Morris, 1994; Environment Agency, 1998).

Así Morris (1994) emplea el balance del agua:

$$R^2 \cdot \pi = \frac{Q}{N}$$

$$A = \frac{Q}{N}$$

Donde:

A: Área de alimentación (m²)

Q: Caudal anual medio de explotación (m³/año)

N: Recarga anual media a largo plazo (m/año)

Los resultados obtenidos al aplicar estos métodos se indican en las tablas 21,22 y 23.

Tabla 21: Resultados obtenidos aplicando el método del radio fijo calculado. Ecuación volumétrica a las captaciones de abastecimiento a Villacastín en el acuífero del Terciario detrítico.

	Parámetros	Captaciones de abastecimiento en el acuífero del Terciario detrítico			
		Sondeo San Bartolomé (172020004)	Sondeo Puente Alzado (172020001)	Sondeo Cañada del Abad (172020003)	Sondeo Camino del Valle (172020005)
Datos de Partida	Q (m ³ /día)	151,2	151,2	151,2	151,2
	b (m)	93	90	82	86
	m _e	0,002	0,002	0,002	0,002
Resultados de las Fórmulas	t _{1 día}	1	1	1	1
	R _{1 día} (m)	16	16	17	17
	t _{50 días}	50	50	50	50
	R _{50 días} (m)	114	116	121	118
	t _{4 años}	1.460	1.460	1.460	1.460
	R _{4 años} (m)	615	625	655	639
	t _{2,5 años}	9.125	9.125	9.125	9.125
	R _{2,5 años} (m)	1.537	1.562	1.636	1.598

Tabla 22: Desarrollo del cálculo por el método del radio filo calculado, ecuación volumétrica, de las zonas de restricciones de los perímetros de protección de las captaciones de abastecimiento a Villacastín, en el acuífero del Terciario detrítico, empleando el programa Microsoft Excel.

<u>APLICACIÓN DEL MÉTODO EN EL SONDEO "SAN BARTOLOMÉ"</u>									
<u>Datos de partida:</u>				<u>Resultados:</u>					
				Días	Días	Días	Días	Días	Días
			Tiempo:	1	50	1460	9125		
Caudal:	Q =	151,2 m ³ /día		258,75513	12937,75666	377782,495	2E+06		
Porosidad eficaz:	m_e =	0,002	R=	16	114	615	1537		
π:	π=	3,141 5927							
Espesor saturado:	b =	93 m							
<u>APLICACIÓN DEL MÉTODO EN EL SONDEO "PUENTE ALZADO"</u>									
<u>Datos de partida:</u>				<u>Resultados:</u>					
				Días	Días	Días	Días	Días	Días
			Tiempo:	1	50	1460	9125		
Caudal:	Q =	151,2 m ³ /día		267,3803	13369,01522	390375,244	2E+06		
Porosidad eficaz:	m_e =	0,002	R=	16	116	625	1562		
π:	π=	3,141 5927							
Espesor saturado:	b =	90 m							
<u>APLICACIÓN DEL MÉTODO EN EL SONDEO "CAÑADA DEL ABAD"</u>									
<u>Datos de partida:</u>				<u>Resultados:</u>					
				Días	Días	Días	Días	Días	Días
			Tiempo:	1	50	1460	9125		
Caudal:	Q =	151,2 m ³ /día		293,46619	14673,30939	428460,634	3E+06		
Porosidad eficaz:	m_e =	0,002	R=	17	121	655	1636		
π:	π=	3,141 5927							
Espesor saturado:	b =	82 m							
<u>APLICACIÓN DEL MÉTODO EN EL SONDEO "CAMINO DEL VALLE"</u>									
<u>Datos de partida:</u>				<u>Resultados:</u>					
				Días	Días	Días	Días	Días	Días
			Tiempo:	1	50	1460	9125		
Caudal:	Q =	151,2 m ³ /día		279,8166	13990,82988	408532,233	3E+06		
Porosidad eficaz:	m_e =	0,002	R=	17	118	639	1598		
π:	π=	3,141 5927							
Espesor saturado:	b =	86 m							

Tabla 23: Resultados obtenidos aplicando el método del radio fijo calculado. Método de la recarga a las captaciones de abastecimiento a Villacastín en el acuífero del Terciario detrítico.

	Parámetros	Captaciones de abastecimiento en el acuífero del Terciario detrítico			
		Sondeo San Bartolomé (172020004)	Sondeo Puente Alzado (172020001)	Sondeo Cañada del Abad (172020003)	Sondeo Camino del Valle (172020005)
Datos de Partida	Q (m ³ /día)	118,8	118,8	118,8	118,8
	N (m/día)	1,02·10 ⁻⁴	1,02·10 ⁻⁴	1,02·10 ⁻⁴	1,02·10 ⁻⁴
Resultados de las Fórmulas	t _{1 día}	NO ES ADECUADO EMPLEAR EL MÉTODO PARA VALORES PEQUEÑOS DE TIEMPO (1 DÍA Y 50 DÍAS) YA QUE PROPORCIONA UN ÚNICO VALOR PARA TIEMPOS MUY GRANDES (4 AÑOS O 25 AÑOS EN ESTE CASO)			
	R _{1 día} (m)				
	t _{50 días}				
	R _{50 días} (m)				
	t _{4 años}	1.460	1.460	1.460	1.460
	R _{4 años} (m)	609	609	609	609
	t _{25 años}	9.125	9.125	9.125	9.125
	R _{25 años} (m)	609	609	609	609

La recarga (N) se obtiene considerando que la infiltración supone un 5% de la precipitación:

$$N = \frac{750 \text{ mm / año}}{1000 \cdot 365} \cdot 0,05 = 1,02 \cdot 10^{-4} \text{ m / día}$$

Se emplea el caudal anual medio de explotación en cada captación.

6.3.4. Método del radio fijo calculado. Función del descenso

Este método define la zona a proteger como el área en la cual se produce un descenso determinado del nivel piezométrico. Este se calcula empleando la ecuación de Theis (Theis, 1935) para el régimen transitorio, por lo que la precisión será mayor cuanto más se asemeje la realidad del acuífero a las condiciones matemáticas o condiciones de contorno impuestas para su resolución. Estas (Villanueva Martínez e Iglesias López, 1984) son:

- Acuífero de extensión infinita homogéneo e isotropo en cuanto a su conductividad hidráulica.
- La captación atraviesa completamente la formación permeable.
- El flujo de agua hacia la captación es radial y sin componente vertical.
- El caudal de bombeo es constante.

- El pozo de bombeo es de diámetro cero
- No existe recarga al acuífero

La ecuación de Theis es:

$$d = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} \cdot \partial u$$

En la cual u es una función auxiliar cuyo valor es:

$$u = \frac{R^2 \cdot S}{4 \cdot T \cdot t}$$

Donde:

- d : Descenso en un punto situado a la distancia R del pozo de bombeo
- Q : Caudal de bombeo constante
- T : Transmisividad del acuífero
- R : Distancia a la captación
- S : Coeficiente de almacenamiento
- t : Tiempo transcurrido desde el comienzo del bombeo, consideradas inicialmente condiciones de reposo

Se define una función de pozo $W(u)$ que corresponde a la integral de la citada fórmula.

$$W(u) = \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} \cdot du$$

Esta integral no tiene solución analítica y se ha resuelto por métodos aproximados. Se muestran de un modo resumido en la tabla 24 los valores de $W(u)$ y u .

Al aplicar este método se calcula en primer lugar $W(u)$:

$$d = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot W(u)$$

$$W(u) = \frac{d \cdot 4 \cdot \pi \cdot T}{Q}$$

Se obtiene el valor de u de la tabla de la función de pozo (Tabla 24). Para obtener la distancia a la capta-

ción (R) en la que se produce un descenso (d) fijado como criterio para delimitar el perímetro de protección se emplean las ecuaciones siguientes:

$$u = \frac{R^2 \cdot S}{4 \cdot T \cdot t}$$

$$R = \sqrt{\frac{u \cdot 4 \cdot T \cdot t}{S}}$$

Los resultados obtenidos al aplicar este método a las captaciones de abastecimiento a Villacastín se indican en la tabla 25.

Tabla 24: Función de pozo $W(u)$ (resumida).

	$k \times 10^{-14}$	$k \times 10^{-12}$	$k \times 10^{-10}$	$k \times 10^{-8}$	$k \times 10^{-6}$	$k \times 10^{-4}$	$k \times 10^{-2}$	$\frac{k}{k \times 10^0}$
1,0	31,6590	27,0538	22,4486	17,8435	13,2383	8,6332	<u>4,0379</u>	<u>0,2194</u>
1,5	31,2535	26,6483	22,0432	17,4380	12,8328	8,2278	3,6374	,1000
2,0	30,9658	26,3607	21,7555	17,1503	12,5451	<u>7,9402</u>	3,3547	<u>,04890</u>
2,5	30,7427	26,1375	21,5323	16,9272	12,3220	7,7172	3,1365	,02491
3,0	30,5604	25,9552	21,3500	16,7449	12,1397	7,5348	2,9591	,01305
3,5	30,4062	25,8010	21,1959	16,5907	11,9855	7,3807	2,8099	,006970
4,0	30,2727	25,6675	21,0623	16,4572	11,8520	7,2472	2,6813	,003779
4,5	30,1549	25,5497	20,9446	16,3394	11,7342	7,1295	2,5684	,002073
5,0	30,0495	25,4444	20,8392	16,2340	11,6289	7,0242	2,4679	,001148
5,5	29,9542	25,3491	20,7439	16,1387	11,5336	6,9289	2,3775	,0006409
6,0	29,8672	25,2620	20,6569	16,0517	11,4465	6,8420	2,2953	0,0003601
6,5	29,7872	25,1820	20,5768	15,9717	11,3665	6,7620	2,2201	,0002034
7,0	29,7131	25,1079	20,5027	15,8976	11,2924	6,6879	2,1508	,0001155
7,5	29,6441	25,0389	20,4337	15,8286	11,2234	6,6190	2,0867	,00006583
8,0	29,5795	24,9744	20,3692	15,7640	11,1589	6,5545	2,0269	,00003767
8,5	29,5189	24,9137	20,3086	15,7034	11,0982	6,4939	1,9711	,00002162
9,0	29,4618	24,8566	20,2514	15,6462	11,0411	6,4368	1,9187	,00001245
9,5	29,4077	24,8025	20,1973	15,5922	10,9870	6,3828	1,8695	0,000007185

Ejemplos de utilización de la tabla:
 $W(u)=0,04 \quad u=2,0 \cdot 10^0 = 2,0$
 $W(u)=0,21 \quad u=1,0 \cdot 10^0 = 1,0$
 $W(u)=7,94 \quad u=2,0 \cdot 10^{-4}$
 $W(u)=4,03 \quad u=1,0 \cdot 10^{-2}$

Modificada de Villanueva e Iglesias, 1984

Tabla 25: Resultados obtenidos aplicando el método del radio fijo calculado. Función del descenso a las captaciones de abastecimiento a Villacastín en el acuífero del Terciario detrítico.

		Captaciones de abastecimiento en el acuífero del Terciario detrítico			
		Parámetros	Sondeo San Bartolomé (172020004)	Sondeo Puente Alzado (172020001)	Sondeo Cañada del Abad (172020003)
Datos de Partida	Q (m ³ /día)	151,2	151,2	151,2	151,2
	T(m ² /día)	30	30	30	30
	S	0,002	0,002	0,002	0,002
Resultados de las Fórmulas	W(u)	0,037	0,037	0,037	0,037
	Formula				
	u Tabla	2,25	2,25	2,25	2,25
	t _{1 día}	1	1	1	1
	R _{1 día} (m)	367	367	367	367
	t _{50 días}	50	50	50	50
	R _{50 días} (m)	2.598	2.598	2.598	2.598
	t _{1 años}	1.460	1.460	1.460	1.460
	R _{1 años} (m)	14.039	14.039	14.039	14.039
	t _{2 años}	9.125	9.125	9.125	9.125
R _{2 años} (m)	35.098	35.098	35.098	35.098	

Se ha considerado como límite de descenso máximo 15 mm (0,015 m) al emplearse éste en diversos estudios de delimitación de perímetros de protección realizados en Estados Unidos (USEPA, 1987).

6.3.5. Método de Wyssling

El método de Wyssling (Wyssling, 1979 en Lallemand- Barrès, Roux, 1989) consiste en el cálculo de la zona de llamada de una captación (Figura 22), es decir, de la parte del área de alimentación en la cual puede apreciarse un descenso piezométrico consecuencia del bombeo y las líneas de corriente se dirigen a la captación, y la búsqueda posterior del tiempo de tránsito deseado.

Fue diseñado para el dimensionamiento de perímetros de protección en acuíferos con porosidad intergranular y homogéneos pero presenta el inconveniente de no tener en cuenta las heterogeneidades del acuífero por lo que es menos preciso para las zonas más alejadas de la captación.

La resolución del método (Wyssling, 1979, en Moreno Merino *et al.*, 1991) precisa conocer el valor de los siguientes parámetros hidráulicos:

- i*: Gradiente hidráulico. Obtenido a partir de las isopiezas trazadas
- Q*: Caudal real bombeado
- K*: Conductividad hidráulica
- m_e*: Porosidad eficaz
- b*: Espesor saturado del acuífero

El procedimiento de cálculo es el siguiente:

- a) Se calcula en primer lugar la zona de llamada.

En un acuífero libre, si *B* (Figura 22) es la anchura del frente de llamada:

$$Q = K \cdot B \cdot b \cdot i \qquad B = \frac{Q}{K \cdot b \cdot i}$$

- b) El radio de llamada puede obtenerse de la ecuación:

$$X_o = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i}$$

y el ancho del frente de llamada a la altura de la captación:

$$B' = \frac{B}{2} = \frac{Q}{2 \cdot K \cdot b \cdot i}$$

- c) La velocidad eficaz *V_e* se calcula como:

$$V_e = \frac{K \cdot i}{m_e}$$

- d) Una vez determinada la zona de llamada ha de buscarse en la dirección del flujo la distancia correspondiente al tiempo de tránsito deseado (isocronas).

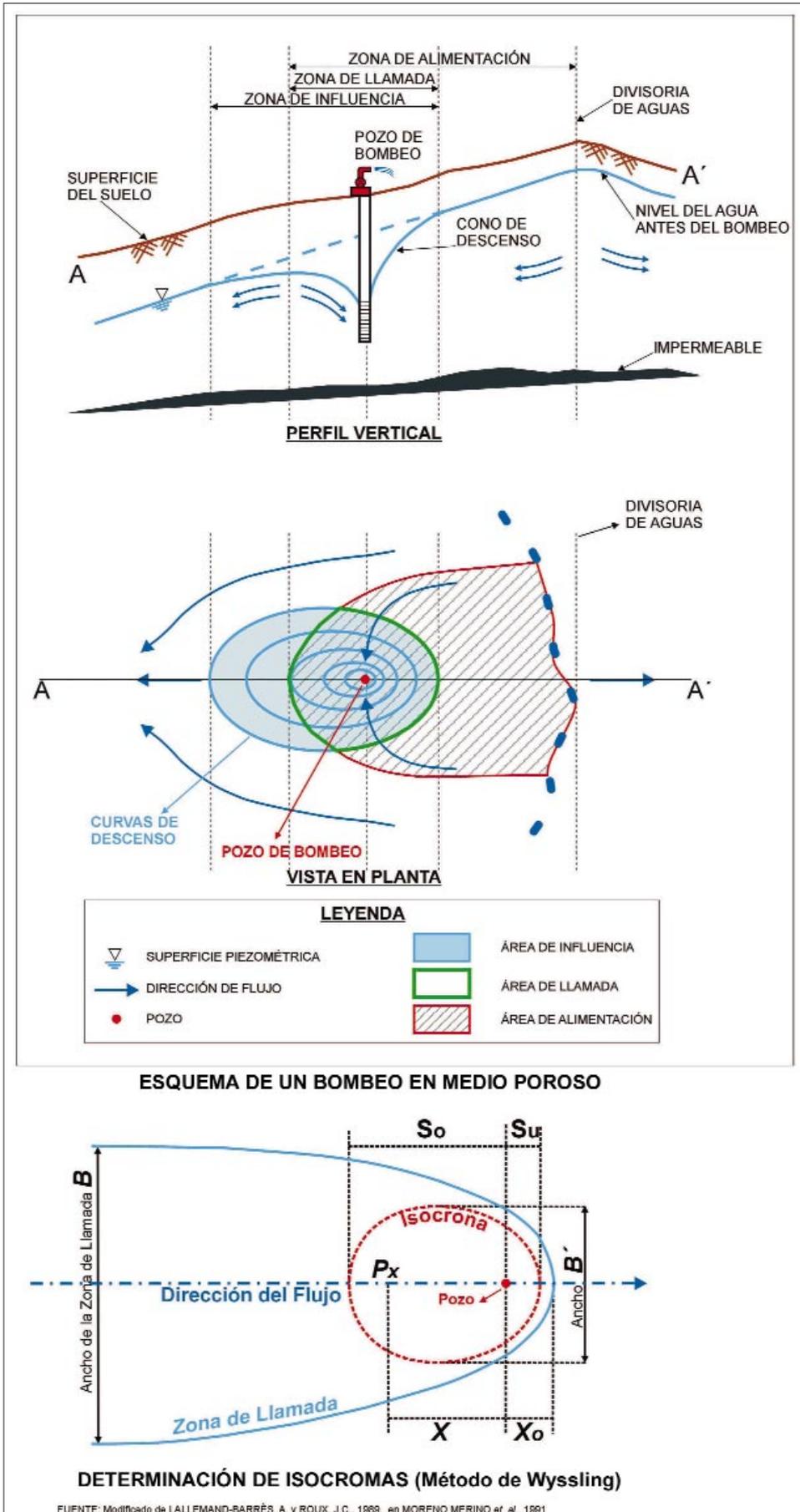


Figura 22: Cálculo de perímetros de protección mediante la aplicación del método de Wyssling.

Se emplean las ecuaciones:

$$S_o = \frac{l + \sqrt{l \cdot (l + 8 \cdot X_o)}}{2}$$

$$S_u = \frac{-l + \sqrt{l \cdot (l + 8 \cdot X_o)}}{2}$$

Donde:

$$l = V_e \cdot t$$

t : Tiempo de tránsito

V_e : Velocidad eficaz

S_o : Distancia aguas arriba en la dirección del flujo correspondiente a un tiempo de tránsito t

S_u : Distancia aguas abajo en la dirección del flujo correspondiente a un tiempo de tránsito t

Los resultados obtenidos al aplicar este método se indican en las tablas 26, 27, 28, 29 y 30.

Tabla 26: Resultados obtenidos aplicando el método de Wyssling a las captaciones de abastecimiento a Villacastín en el acuífero del Terciario detrítico.

	Parámetros	Captaciones de abastecimiento en el acuífero del Terciario Detrítico			
		Sondeo San Bartolomé (172020004)	Sondeo Puente Alzado (172020001)	Sondeo Cañada del Abad (172020003)	Sondeo Camino del Valle (172020005)
Datos de Partida	Q (m ³ /s)	3·10 ⁻³	3·10 ⁻³	3·10 ⁻³	3·10 ⁻³
	i	0,025	0,011	0,02	0,04
	T= 30 m ² /día = 3,4 10 ⁻⁴ m ² /s	3,4·10 ⁻⁴	3,4·10 ⁻⁴	3,4·10 ⁻⁴	3,4·10 ⁻⁴
	K=T/b (m/s)	3,7·10 ⁻⁶	3,8·10 ⁻⁶	4,2·10 ⁻⁶	4,0·10 ⁻⁶
	b (m)	93	90	82	86
Resultados de las Fórmulas	m_w	0,002	0,002	0,002	0,002
	B (m)	349	797	436	218
	B' (m)	174	399	218	109
	X ₀ (m)	55	127	69	35
	V _w (m/s)	4,63·10 ⁻⁵	2,09·10 ⁻⁵	4,2·10 ⁻⁵	8·10 ⁻⁵
	l _{1 día} (m)	4	2	4	7
	S _{0-1 día} (m)	23	22	24	26
	S _{1-1 día} (m)	19	21	21	19
	l _{50 días} (m)	200	90	181	346
	S _{0-50 días} (m)	279	203	273	405
	S _{1-50 días} (m)	79	113	92	59
	l _{4 años} (m)	5.834	2.636	5.298	10.091
	S _{0-4 años} (m)	5.943	2.870	5.433	10.160
	S _{1-4 años} (m)	109	233	135	69
	l _{25 años} (m)	36.463	16.478	33.113	63.072
	S _{0-25 años} (m)	36.574	16.728	33.251	63.141
	S _{1-25 años} (m)	111	250	138	69

Tabla 27: Desarrollo del cálculo, por el método de Wyssling, de las zonas de restricciones del perímetro de protección del sondeo de abastecimiento a Villacastín “San Bartolomé”, en el acuífero del Terciario detrítico, empleando el programa Microsoft Excel.

Datos de partida:																	
Caudal:	Q =	3 L/s =	0.003 m ³ /s														
Gradiente hidráulico:	i =	0.025															
Conductividad hidráulica	K=	0.0000037 m/s															
Espesor saturado:	b =	93 m															
Porosidad eficaz:	m_e =	0.2 %=	0.002														
Radio de llamada:																	
	$X_0 = Q / (2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i) =$		55.5 m														
Velocidad eficaz:																	
	$V_e = K \cdot i / m_e =$		4.625E-05 m/s														
Ancho del frente de llamada:																	
	$B = Q / K \cdot b \cdot i =$		349 m														
Ancho del frente de llamada a la altura de la captación:																	
	$B' = B / 2 =$		174 m														
Parámetro I:																	
	$I_{1 \text{ día}} =$		4.0 m														
	$I_{50 \text{ días}} =$		199.8 m														
	$I_{4 \text{ años}} =$		5834.2 m														
	$I_{25 \text{ años}} =$		36463.5 m														
Distancias So y Su:																	
	$S_o = \frac{+I + (I + (8 \cdot X_0))^{1/2}}{2}$																
	$S_u = \frac{-I + (I + (8 \cdot X_0))^{1/2}}{2}$																
	So		Su														
	So 1 día =	23	Su 1 día =														
	So 50 días =	279	Su 50 días =														
	So 4 años =	5943	Su 4 años =														
	So 25 años =	36574	Su 25 años =														
			111														
ZONAS DE RESTRICCIONES DEL PERÍMETRO DE PROTECCIÓN																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th>TIEMPO DE TRÁNSITO</th> <th>AGUAS ARRIBA (So)</th> <th>AGUAS ABAJO (Su)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 Día</td> <td>23</td> <td>19</td> </tr> <tr> <td>50 Días</td> <td>279</td> <td>79</td> </tr> <tr> <td>4 Años</td> <td>5943</td> <td>109</td> </tr> <tr> <td>25 Años</td> <td>36574</td> <td>111</td> </tr> </tbody> </table>			TIEMPO DE TRÁNSITO	AGUAS ARRIBA (So)	AGUAS ABAJO (Su)	1 Día	23	19	50 Días	279	79	4 Años	5943	109	25 Años	36574	111
TIEMPO DE TRÁNSITO	AGUAS ARRIBA (So)	AGUAS ABAJO (Su)															
1 Día	23	19															
50 Días	279	79															
4 Años	5943	109															
25 Años	36574	111															

Tabla 28: Desarrollo del cálculo, por el método de Wyssling, de las zonas de restricciones del perímetro de protección del sondeo de abastecimiento a Villacastín “Puente Alzado”, en el acuífero del Terciario detrítico, empleando el programa Microsoft Excel.

<u>Datos de partida:</u>				
Caudal:	Q =	3 L/s =	0,003 m ³ /s	
Gradiente hidráulico:	i =	0,011		
Conductividad hidráulica	K =	0,0000038 m/s		
Espesor saturado:	b =	90 m		
Porosidad eficaz:	m_e =	0,2 % =	0,002	
<u>Radio de llamada:</u>				
	$X_0 = Q / (2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i) =$	126,9 m		
<u>Velocidad eficaz:</u>				
	$V_e = K \cdot i / m_e =$	0,0000209 m/s		
<u>Ancho del frente de llamada:</u>				
	$B = Q / K \cdot b \cdot i =$	797 m		
<u>Ancho del frente de llamada a la altura de la captación:</u>				
	$B' = B / 2 =$	399 m		
<u>Parámetro l:</u>				
	$l_{1 \text{ día}} =$	1,8 m		
	$l_{50 \text{ días}} =$	90,3 m		
	$l_{4 \text{ años}} =$	2636,4 m		
	$l_{25 \text{ años}} =$	16477,6 m		
<u>Distancias So y Su:</u>				
	$S_o = +l + \frac{(l \cdot (1 + 8 \cdot X_0))^{1/2}}{2}$			
	$S_u = -l + \frac{(l \cdot (1 + 8 \cdot X_0))^{1/2}}{2}$			
	So 1 día =	22		Su 1 día = 21
	So 50 días =	203		Su 50 días = 113
	So 4 años =	2870		Su 4 años = 233
	So 25 años =	16728		Su 25 años = 250
ZONAS DE RESTRICCIONES DEL PERÍMETRO DE PROTECCIÓN				

Tabla 29: Desarrollo del cálculo, por el método de Wyssling, de las zonas de restricciones del perímetro de protección del sondeo de abastecimiento a Villacastín "Cañada del Abad", en el acuífero del Terciario detrítico, empleando el programa Microsoft Excel.

Datos de partida:			
Caudal:	Q =	3 L/s =	0,003 m ³ /s
Gradiente hidráulico:	i =	0,02	
Conductividad hidráulica:	K =	0,0000042 m/s	
Espesor saturado:	b =	82 m	
Porosidad eficaz:	m _e =	0,2 % =	0,002
Radio de llamada:			
$X_0 = Q / (2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i) =$		69,3 m	
Velocidad eficaz:			
$V_e = K \cdot i / m_e =$		0,000042 m/s	
Ancho del frente de llamada:			
$B = Q / K \cdot b \cdot i =$		436 m	
Ancho del frente de llamada a la altura de la captación:			
$B' = B / 2 =$		218 m	
Parámetro I:			
$I_{1 \text{ día}} =$			3,6 m
$I_{50 \text{ días}} =$			181,4 m
$I_{4 \text{ años}} =$			5298,0 m
$I_{25 \text{ años}} =$			33112,8 m
Distancias So y Su:			
$S_o = \frac{-l + (l + 8 \cdot X_0)}{2}^{1/2}$			
$S_u = \frac{-l + (l + 8 \cdot X_0)}{2}^{1/2}$			
	S_o		S_u
	$S_o_{1 \text{ día}} =$	24	$S_u_{1 \text{ día}} =$ 21
	$S_o_{50 \text{ días}} =$	273	$S_u_{50 \text{ días}} =$ 92
	$S_o_{4 \text{ años}} =$	5433	$S_u_{4 \text{ años}} =$ 135
	$S_o_{25 \text{ años}} =$	33251	$S_u_{25 \text{ años}} =$ 138
ZONAS DE RESTRICCIONES DEL PERÍMETRO DE PROTECCIÓN			
	TIEMPO DE TRÁNSITO	AGUAS ARRIBA (So)	AGUAS ABAJO (Su)
	1 Día	24	21
	50 Días	273	92
	4 Años	5433	135
	25 Años	33251	138

Tabla 30: Desarrollo del cálculo, por el método de Wyssling, de las zonas de restricciones del perímetro de protección del sondeo de abastecimiento a Villacastín "Camino del Valle", en el acuífero del Terciario detrítico, empleando el programa Microsoft Excel.

Datos de partida:																		
Caudal:	Q =	3 L/s =	0,003 m ³ /s															
Gradiente hidráulico:	i =	0,04																
Conductividad hidráulica:	K =	4E-06 m/s																
Espesor saturado:	b =	86 m																
Porosidad eficaz:	m _e =	0,2 % =	0,002															
Radio de llamada:																		
$X_0 = Q / (2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i) =$		34,7 m																
Velocidad eficaz:																		
$V_e = K \cdot i / m_e =$		0,00008 m/s																
Ancho del frente de llamada:																		
$B = Q / K \cdot b \cdot i =$		218 m																
Ancho del frente de llamada a la altura de la captación:																		
$B' = B / 2 =$		109 m																
Parámetro l:																		
$l_{1 \text{ día}} =$	6,9 m																	
$l_{50 \text{ días}} =$	345,6 m																	
$l_{4 \text{ años}} =$	10091,5 m																	
$l_{25 \text{ años}} =$	63072,0 m																	
Distancias So y Su:																		
$S_o = \frac{+l + (l + 8 \cdot X_0)}{2}^{1/2}$																		
$S_u = \frac{-l + (l + 8 \cdot X_0)}{2}^{1/2}$																		
$S_o_{1 \text{ día}} =$	26	$S_u_{1 \text{ día}} =$	19															
$S_o_{50 \text{ días}} =$	405	$S_u_{50 \text{ días}} =$	59															
$S_o_{4 \text{ años}} =$	10160	$S_u_{4 \text{ años}} =$	68,9															
$S_o_{25 \text{ años}} =$	63141	$S_u_{25 \text{ años}} =$	69,3															
ZONAS DE RESTRICCIONES DEL PERÍMETRO DE PROTECCIÓN																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>TIEMPO DE TRÁNSITO</th> <th>AGUAS ARRIBA (So)</th> <th>AGUAS ABAJO (Su)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 Día</td> <td>26</td> <td>19</td> </tr> <tr> <td>50 Días</td> <td>405</td> <td>59</td> </tr> <tr> <td>4 Años</td> <td>10160</td> <td>69</td> </tr> <tr> <td>25 Años</td> <td>63141</td> <td>69</td> </tr> </tbody> </table>				TIEMPO DE TRÁNSITO	AGUAS ARRIBA (So)	AGUAS ABAJO (Su)	1 Día	26	19	50 Días	405	59	4 Años	10160	69	25 Años	63141	69
TIEMPO DE TRÁNSITO	AGUAS ARRIBA (So)	AGUAS ABAJO (Su)																
1 Día	26	19																
50 Días	405	59																
4 Años	10160	69																
25 Años	63141	69																

6.3.6. Análisis del sistema de flujo combinado con la ecuación de flujo uniforme

El método asume un acuífero con flujo bidimensional uniforme, en un medio con porosidad intergranular o asimilable. Al aplicarlo se efectúa previamente un análisis de las isopiezas y líneas de flujo para determinar la divisoria hidrogeológica y el trazado de las líneas de flujo hacia la captación, empleándose la ecuación de flujo uniforme (Todd, 1980) para completar la definición del área de contribución a la captación, concretamente su ancho en la divisoria hidrogeológica y su distancia aguas abajo en el sentido del flujo (Figura 23).

La expresión de la ecuación de flujo uniforme (USEPA, 1991 a) es:

$$-\frac{Y}{X} = \tan\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i}{Q} Y\right)$$

Desde esta ecuación se obtienen dos ecuaciones (USEPA, 1991 a) para delimitar el área de contribución a la captación:

$$X_L = -\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i}$$

$$Y_L = \pm \frac{Q}{2 \cdot K \cdot b \cdot i}$$

Donde:

- Y: Anchura del perímetro de protección a la altura de la divisoria hidrogeológica paralela a las isopiezas existentes antes de bombear
- X: Distancia al punto de gradiente nulo o de estancamiento (*"downgradient null point"*) aguas abajo de la captación, en el sentido del flujo perpendicular a las isopiezas previas al bombeo
- K: Conductividad hidráulica
- b: Espesor saturado del acuífero
- i: Gradiente hidráulico sin bombeo
- Q: Caudal de bombeo
- X_L: Distancia desde la captación al punto de gradiente nulo o estancamiento previo al bombeo aguas abajo de la captación
- Y_L: Distancia al límite lateral de la zona a proteger a la altura de la divisoria hidrogeológica desde su eje de simetría

En este método no se considera el efecto de los límites hidrogeológicos (excepto la divisoria piezométrica), heterogeneidades del acuífero ni recarga no uniforme. Da lugar a perímetros de protección muy grandes si el pozo está muy lejos de la divisoria piezométrica.

Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 31 y 32.

Tabla 31: Resultados obtenidos aplicando el método de análisis del sistema de flujo combinado con la ecuación de flujo uniforme a las captaciones de abastecimiento a Villacastín en el acuífero del Terciario detrítico.

	Parámetros	Captaciones de abastecimiento en el acuífero del Terciario Detrítico			
		Sondeo San Bartolomé (172020004)	Sondeo Puente Alzado (172020001)	Sondeo Cañada del Abad (172020003)	Sondeo Camino del Valle (172020005)
Datos de Partida	Q (m ³ /s)	3·10 ⁻³	3·10 ⁻³	3·10 ⁻³	3·10 ⁻³
	i	0,025	0,011	0,02	0,04
	K (m/s)	3,7·10 ⁻⁶	3,8·10 ⁻⁶	4,2·10 ⁻⁶	4,0·10 ⁻⁶
	b (m)	93	90	82	86
Resultados de las Fórmulas	NO DEPENDE DEL TIEMPO DE TRÁNSITO. ES LA MISMA PARA 1 DÍA, 50 DÍAS, 4 AÑOS Y 25 AÑOS				
	X _l (m)	-56	-127	-69	-35
	Y _l (m)	+ 174 - 174	+ 399 - 399	+ 218 - 218	+ 109 - 109

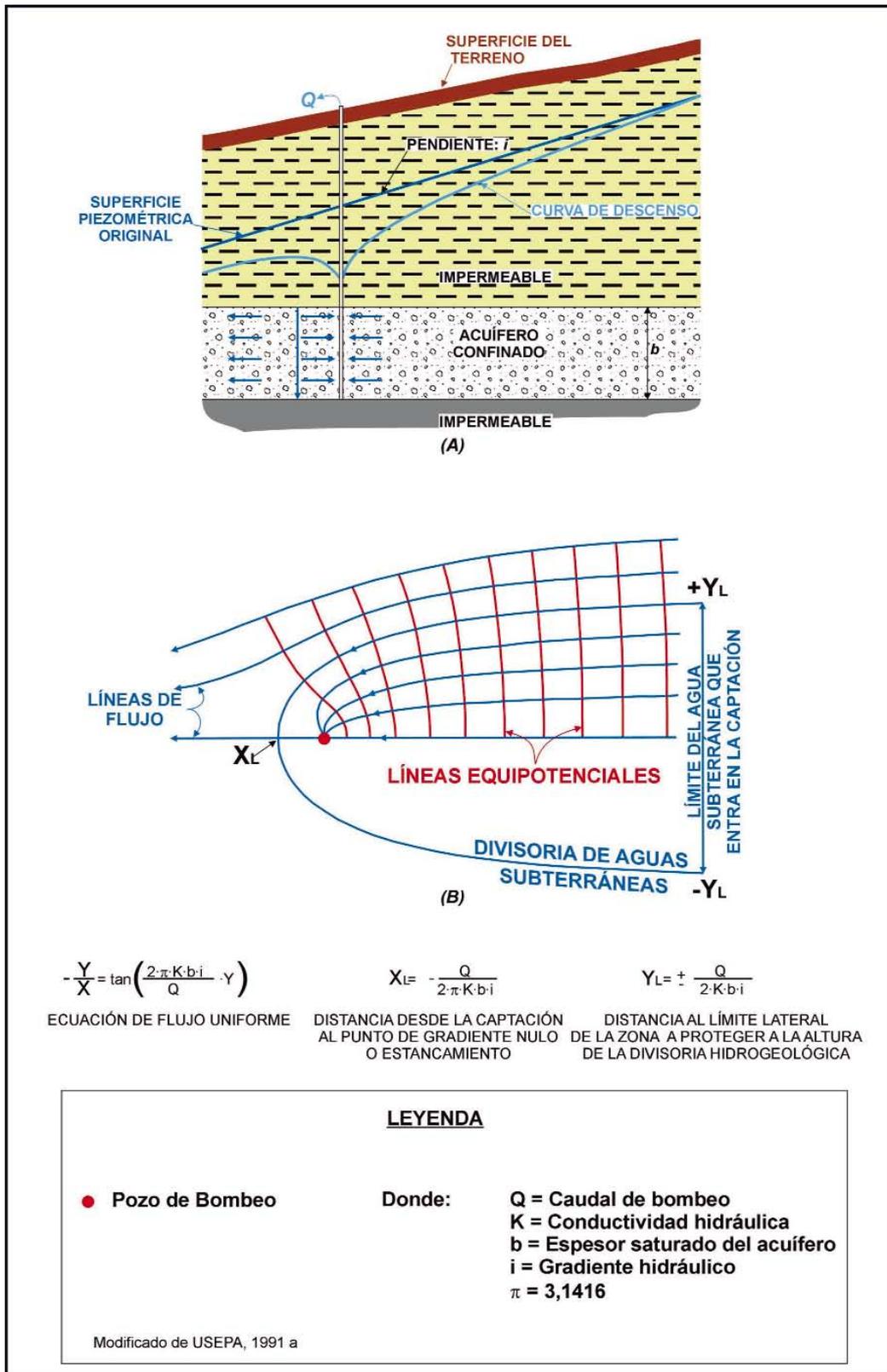


Figura 23: Aplicación de la ecuación de flujo uniforme.

Tabla 32: Desarrollo del cálculo, por el método de flujo uniforme, de las zonas de restricciones de los perímetros de protección de las captaciones de abastecimiento a Villacastín, en el acuífero del Terciario detrítico, empleando el programa Microsoft Excel.

<u>APLICACIÓN DEL MÉTODO EN EL SONDEO "SAN BARTOLOMÉ"</u>			
<u>Datos de partida:</u>			
Caudal:	Q = 3	L/s = 0,003	m ³ /s
Gradiente hidráulico:	i = 0,025		
Conductividad hidráulica:	K= 0,0000037	m/s	
Espesor saturado:	b = 93	m	
<u>Resultados:</u>			
$X_L = Q/(2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i) =$	X_L = 56	m	
$Y_L = Q/(2 \cdot K \cdot b \cdot i) =$	Y_L = 174	m	
<u>APLICACIÓN DEL MÉTODO EN EL SONDEO "PUENTE ALZADO"</u>			
<u>Datos de partida:</u>			
Caudal:	Q = 3	L/s = 0,003	m ³ /s
Gradiente hidráulico:	i = 0,011		
Conductividad hidráulica:	K= 0,0000038	m/s	
Espesor saturado:	b = 90	m	
<u>Resultados:</u>			
$X_L = Q/(2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i) =$	X_L = 127	m	
$Y_L = Q/(2 \cdot K \cdot b \cdot i) =$	Y_L = 399	m	
<u>APLICACIÓN DEL MÉTODO EN EL SONDEO "CAÑADA DEL ABAD"</u>			
<u>Datos de partida:</u>			
Caudal:	Q = 3	L/s = 0,003	m ³ /s
Gradiente hidráulico:	i = 0,02		
Conductividad hidráulica:	K= 0,0000042	m/s	
Espesor saturado:	b = 82	m	
<u>Resultados:</u>			
$X_L = Q/(2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i) =$	X_L = 69	m	
$Y_L = Q/(2 \cdot K \cdot b \cdot i) =$	Y_L = 218	m	
<u>APLICACIÓN DEL MÉTODO EN EL SONDEO "CAMINO DEL VALLE"</u>			
<u>Datos de partida:</u>			
Caudal:	Q = 3	L/s = 0,003	m ³ /s
Gradiente hidráulico:	i = 0,04		
Conductividad hidráulica:	K= 0,000004	m/s	
Espesor saturado:	b = 86	m	
<u>Resultados:</u>			
$X_L = Q/(2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i) =$	X_L = 35	m	
$Y_L = Q/(2 \cdot K \cdot b \cdot i) =$	Y_L = 109	m	

6.3.7. Método de Jacobs y Bear

El método de Jacobs y Bear (Bear, 1979, en Lallemand-Barrès y Roux, 1989) requiere acuíferos homogéneos, isotrópicos y de extensión infinita, sometidos a un gradiente regional uniforme y un único pozo. Las líneas de corriente y las equipotenciales características se reflejan en la figura 24.

Las isocronas tienen por expresión, en función de variables *reducidas*:

$$t_R = \frac{X_R}{10} - \frac{l}{\pi} L_N \left(\cos \pi \frac{Y_R}{10} + \frac{X_R}{Y_R} \operatorname{sen} \pi \frac{Y_R}{10} \right)$$

$$X_R = \frac{20 \cdot V \cdot b}{Q} x$$

$$Y_R = \frac{20 \cdot V \cdot b}{Q} y$$

$$t_R = \frac{2 \cdot T^2 \cdot i^2 \cdot t}{m_e \cdot Q \cdot b}$$

Donde:

- V: Velocidad de Darcy
- Q: Caudal de bombeo ficticio continuo
- m_e : Porosidad eficaz
- b: Espesor saturado del acuífero
- T: Transmisividad

- i : Gradiente hidráulico
- Y_R, X_R, t_R : Variables *reducidas*
- t : Tiempo. Isocrona que se quiere calcular

Jacobs y Bear construyeron, a partir de esa fórmula, un ábaco consistente en una colección de curvas, correspondiendo cada una al tiempo de tránsito para el cual se han resuelto las ecuaciones, cuyo eje de simetría coincide con el del flujo de agua subterránea.

La resolución del método precisa conocer el valor de los siguientes parámetros hidráulicos:

- i : Gradiente hidráulico (adimensional). Obtenido a partir de las isopiezas conocidas
- Q: Caudal de bombeo ficticio continuo, las 24 horas del día (m^3/h)
- m_e : Porosidad eficaz (adimensional)
- T: Transmisividad (m^2/h)
- b: Espesor saturado del acuífero (m)
- t: Isocrona que se quiere calcular (horas)

Se calcula, en primer lugar, el *tiempo reducido* empleando la ecuación:

$$t_R = \frac{2 \cdot T^2 \cdot i^2 \cdot t}{m_e \cdot Q \cdot b}$$

Sobre el ábaco se busca la curva correspondiente al tiempo t_R y si no coincide con ninguna de las dibujadas se determina por interpolación entre las dos más próximas, obteniéndose los puntos donde se corta a los ejes de coordenadas (Figura 25).

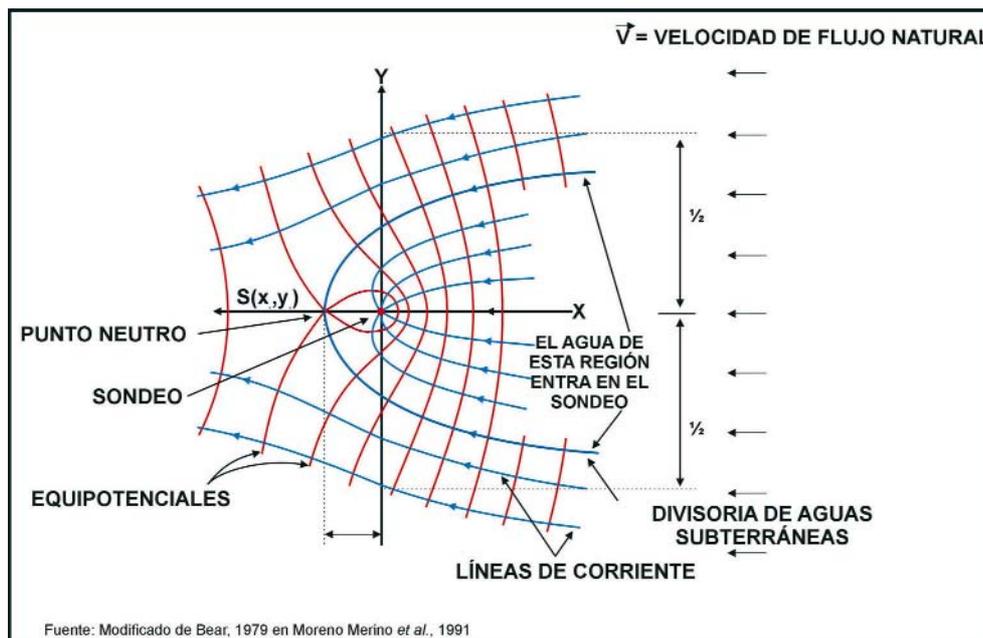


Figura 24: Aplicación del método de Jacobs y Bear. Líneas de corriente en el entorno de la captación.

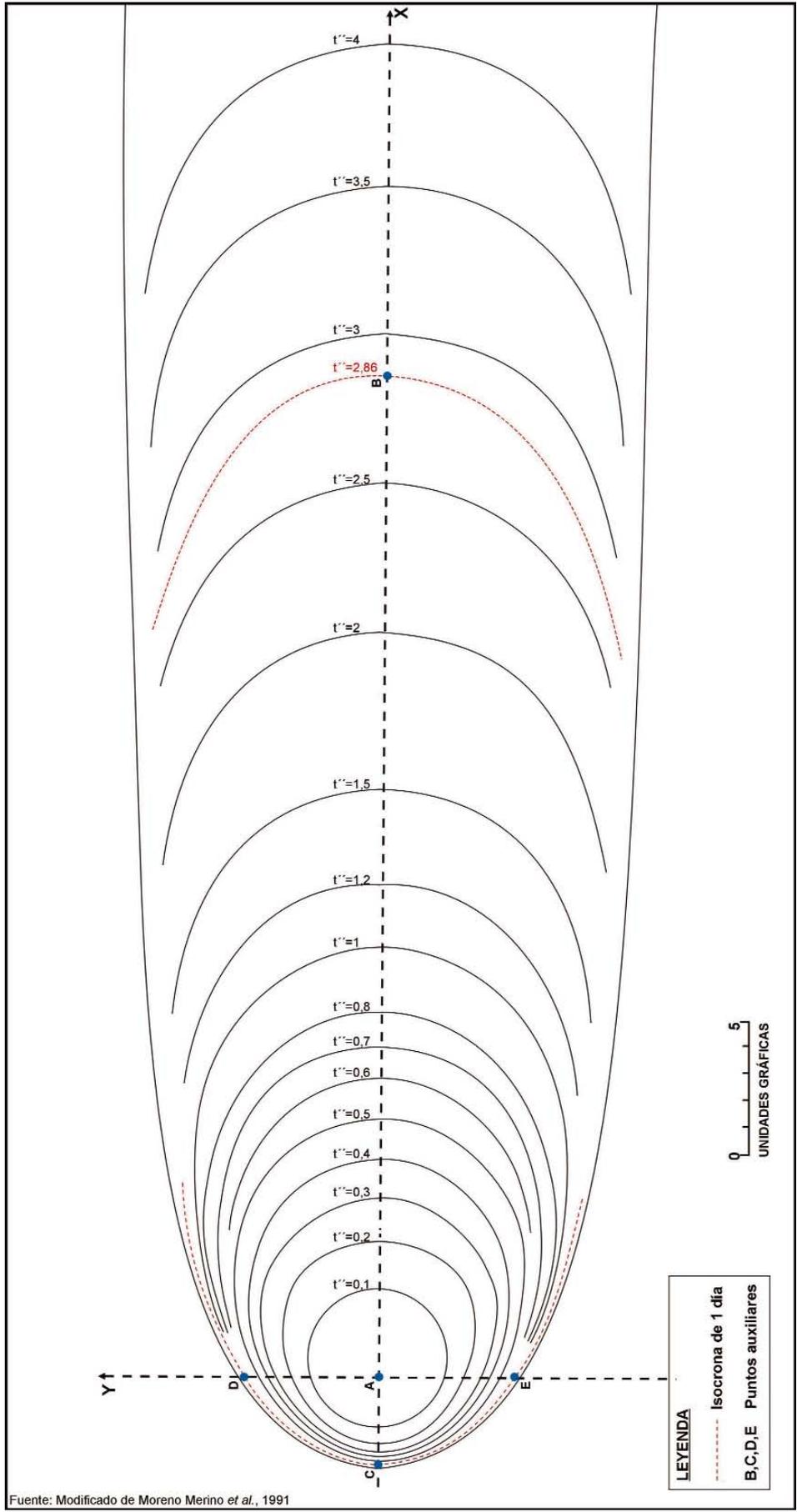


Figura 25: Ejemplo de uso de ábacos del método de Jacobs y Bear.

Se calculan las coordenadas reales de los puntos mediante las fórmulas de transformación:

$$X(m) = \frac{Q}{20 \cdot T \cdot i} \cdot X_R \quad Y(m) = \frac{Q}{20 \cdot T \cdot i} \cdot Y_R$$

Donde:

X, Y : Distancia real en metros

X_R, Y_R : Distancia de las variables reducidas en unidades gráficas en el ábaco

Finalmente, sobre el plano de trabajo, se traza un eje paralelo a la dirección de flujo que pase por la captación, así como un eje perpendicular a este, trasladándose las distancias obtenidas y completándose el trazado de la curva a mano alzada.

En la tabla 33 aparecen los valores utilizados para el método de Jacobs y Bear y los resultados obtenidos para los sondeos de abastecimiento a Villacastín.

Parámetros	Captaciones de abastecimiento en el acuífero Terciario detrítico				
	Sondeo San Bartolomé (172020004)	Sondeo Puente Alzado (172020004)	Sondeo Cañada del Abad (172020004)	Sondeo Camino del Valle (172020004)	
Datos de partida	Q_{FIC} (m ³ /h)	6,3	6,3	6,3	6,3
	i	0,025	0,011	0,02	0,04
	T (m ² /h)	1,25	1,25	1,25	1,25
	m_c	0,002	0,002	0,002	0,002
	b	93	90	82	86
Resultados de las Fórmulas	$t_{R-1 \text{ día-24 horas}}$	0,040	$8,0 \cdot 10^{-3}$	0,029	0,11
	$X_{R-1 \text{ día-AB}}$ (u.g.)	1,08	0,16	0,81	3,26
	$X_{R-1 \text{ día-AC}}$ (u.g.)	0,65	0,09	0,46	1,84
	$Y_{R-1 \text{ día-AD}}$ (u.g.)	0,79	0,12	0,59	2,4
	$Y_{R-1 \text{ día-AE}}$ (u.g.)	0,79	0,12	0,59	2,4
	$X_{1 \text{ día-AB}}$ (m)	11	4	10	21
	$X_{1 \text{ día-AC}}$ (m)	7	2	6	12
	$Y_{1 \text{ día-AD}}$ (m)	8	3	7	15
	$Y_{1 \text{ día-AE}}$ (m)	8	3	7	15
	$t_{R-50 \text{ días}}$	2,0	0,4	1,45	5,53
	$X_{R-50 \text{ días-AB}}$ (u.g.)	27,39	7,82	21	65
	$X_{R-50 \text{ días-AC}}$ (u.g.)	3,2	2,82	3,2	3,2
	$Y_{R-50 \text{ días-AD}}$ (u.g.)	5	4,1	5	5
	$Y_{R-50 \text{ días-AE}}$ (u.g.)	5	4,1	5	5
	$X_{50 \text{ días-AB}}$ (m)	276	179	265	410
	$X_{50 \text{ días-AC}}$ (m)	32	65	40	20
	$Y_{50 \text{ días-AD}}$ (m)	50	94	63	32
	$Y_{50 \text{ días-AE}}$ (m)	50	94	63	32
	$t_{R-4 \text{ años}}$	58,4	11,6	42,3	161,6
	$X_{R-4 \text{ años-AB}}$ (u.g.)	682	140	423	1.778
	$X_{R-4 \text{ años-AC}}$ (u.g.)	3,2	3,2	3,2	3,2
	$Y_{R-4 \text{ años-AD}}$ (u.g.)	5	5	5	5
	$Y_{R-4 \text{ años-AE}}$ (u.g.)	5	5	5	5
	$X_{4 \text{ años-AB}}$ (m)	6.875	3.207	5.330	11.201
	$X_{4 \text{ años-AC}}$ (m)	32	73	40	20
	$Y_{4 \text{ años-AD}}$ (m)	50	115	63	32
	$Y_{4 \text{ años-AE}}$ (m)	50	115	63	32
	$t_{R-25 \text{ años}}$	365,0	73,0	264,9	1.010,5
	$X_{R-25 \text{ años-AB}}$ (u.g.)	4.224	837	3.018	11.488
	$X_{R-25 \text{ años-AC}}$ (u.g.)	3,2	3,2	3,2	3,2
	$Y_{R-25 \text{ años-AD}}$ (u.g.)	5	5	5	5
	$Y_{R-25 \text{ años-AE}}$ (u.g.)	5	5	5	5
	$X_{25 \text{ años-AB}}$ (m)	42.578	19.175	38.027	72.374
	$X_{25 \text{ años-AC}}$ (m)	32	73	40	20
	$Y_{25 \text{ años-AD}}$ (m)	50	115	63	32
	$Y_{25 \text{ años-AE}}$ (m)	50	115	63	32

Tabla 33: Datos empleados y resultados obtenidos aplicando el método de Jacobs y Bear a las captaciones de abastecimiento a Villacastín en el acuífero del Terciario detrítico.

El caudal de bombeo es de 3 L/s 14 horas al día: El caudal ficticio de bombeo continuo la 24 horas es de 6,3 m³/h.

6.3.8. Método de solución analítica simple para la aproximación a isocronas que definen zonas de transporte

En este método (USEPA, 1991 b) el tiempo de tránsito para que una partícula se mueva en la dirección del flujo desde un punto hasta la captación en la que se bombea se puede calcular mediante la siguiente ecuación (modificación de la propuesta por Bear y Jacob, 1965):

$$T_x = \frac{m_e}{K \cdot i} \left[X_L - \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i} \cdot \ln \left(1 + \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i}{Q} \cdot X_L \right) \right]$$

Donde:

- T_x : Tiempo de tránsito desde un punto X al pozo de bombeo
- m_e : Porosidad eficaz
- X_L : Distancia desde el pozo de bombeo hasta un punto X recorrida en un tiempo T_x . Esta distancia es positiva o negativa dependiendo de si el punto X está aguas arriba (valor positivo) o aguas abajo (valor negativo) del pozo de bombeo
- Q : Caudal de bombeo
- K : Conductividad hidráulica
- b : Espesor saturado del acuífero
- i : Gradiente hidráulico

Esta ecuación, que es similar a la empleada por la *Southern Water Authority* (1985), permite el cálculo del tiempo de tránsito desde un punto determinado hasta el pozo de bombeo.

El método resuelve el cálculo de distancias para tiempos de tránsito determinados por el sistema de prueba y error (USEPA, 1991 b) por lo que es conveniente introducir la fórmula en una hoja de cálculo.

El método puede ser aplicado en acuíferos libres y confinados (USEPA, 1991 b), pero no se considera recarga vertical procedente de un acuitardo superior si el acuífero es confinado, por lo que, en el caso de existir esa recarga, el perímetro de protección definido por este método estaría sobredimensionado.

La proporción de la distancia para tiempo de tránsito aguas abajo respecto a la obtenida aguas arriba para el mismo tiempo de tránsito indica el grado de elongación que corresponderá al perímetro de protección. Si se aproximase a un círculo indicaría que la influencia del gradiente hidráulico regional en el tiempo de tránsito sería insignificante.

Al aplicar este método se obtienen los resultados que se indican en las tablas 34 y 35.

Tabla 34: Resultados obtenidos aplicando el método de solución analítica simple para la aproximación a isocronas que definen zonas de transporte a las captaciones de abastecimiento a Villacastín en el acuífero del Terciario detrítico.

	Parámetros	Captaciones de abastecimiento en el acuífero del Terciario detrítico			
		Sondeo San Bartolomé (172020004)	Sondeo Puente Alzado (172020001)	Sondeo Cañada del Abad (172020003)	Sondeo Camino del Valle (172020005)
Datos de Partida	Q (m ³ /día)	151,2	151,2	151,2	151,2
	i	0,025	0,011	0,02	0,04
	K (m/día)	0,32	0,33	0,36	0,34
	m_e	0,002	0,002	0,002	0,002
	b (m)	93	90	82	86
Resultados de las Fórmulas	$T_{x=1 \text{ día}}$	1	1	1	1
	$X_{t=1 \text{ día}} \text{ (m)}$	20	20	20	20
	$T_{x=50 \text{ días}}$	50	50	50	50
	$X_{t=50 \text{ días}} \text{ (m)}$	272	182	260	400
	$T_{x=1 \text{ años}}$	1.460	1.460	1.460	1.460
	$X_{t=1 \text{ años}} \text{ (m)}$	6.010	2.923	5.455	10.055
	$T_{x=5 \text{ años}}$	9.125	9.125	9.125	9.125
	$X_{t=5 \text{ años}} \text{ (m)}$	36.727	16.962	33.122	62.215

El caudal de bombeo es de 3 L/s 14 horas al día: El caudal ficticio de bombeo continuo las 24 horas: $Q_f = 10,8 \cdot \frac{14}{24} = 6,3 \text{ m}^3 / \text{h}$

Tabla 35: Desarrollo del cálculo, por el método de solución analítica simple para la aproximación a isocronas que definen zonas de transporte, de las zonas de restricciones de los perímetros de protección correspondientes a un tiempo de tránsito de 25 años, de las captaciones de abastecimiento a Villacastín, en el acuífero del Terciario detrítico, empleando el programa Microsoft Excel.

APLICACIÓN DEL MÉTODO PARA UN TIEMPO DE TRÁNSITO DE 25 AÑOS EN EL SONDEO "SAN BARTOLOMÉ".				
Caudal:	Q = 151,2	m ³ /día		
Gradiente hidráulico:	i = 0,025			
Conductividad hidráulica:	K = 0,32	m/día		
Porosidad eficaz:	m_e = 0,002			
Espesor saturado:	b = 93	m		
X _L :	X_L = 36727	m		
Resultados:			1136,464757	7,035677633
T _x	T_x = 9125	días		
APLICACIÓN DEL MÉTODO PARA UN TIEMPO DE TRÁNSITO DE 25 AÑOS EN EL SONDEO "PUENTE ALZADO".				
Datos de partida:				
Caudal:	Q = 151,2	m ³ /día		
Gradiente hidráulico:	i = 0,011			
Conductividad hidráulica:	K = 0,33	m/día		
Porosidad eficaz:	m_e = 0,002			
Espesor saturado:	b = 90	m		
X _L :	X_L = 16962	m		
Resultados:			231,27217	5,443595
T _x	T_x = 9125	días		
APLICACIÓN DEL MÉTODO PARA UN TIEMPO DE TRÁNSITO DE 25 AÑOS EN EL SONDEO "CAÑADA DEL ABAD".				
Datos de partida:				
Caudal:	Q = 151,2	m ³ /día		
Gradiente hidráulico:	i = 0,02			
Conductividad hidráulica:	K = 0,36	m/día		
Porosidad eficaz:	m_e = 0,002			
Espesor saturado:	b = 82	m		
X _L :	X_L = 33122	m		
Resultados:			813,60253	6,70147
T _x	T_x = 9125	días		
APLICACIÓN DEL MÉTODO PARA UN TIEMPO DE TRÁNSITO DE 25 AÑOS EN EL SONDEO "CAMINO DEL VALLE".				
Datos de partida:				
Caudal:	Q = 151,2	m ³ /día		
Gradiente hidráulico:	i = 0,04			
Conductividad hidráulica:	K = 0,34	m/día		
Porosidad eficaz:	m_e = 0,002			
Espesor saturado:	b = 86	m		
X _L :	X_L = 62215	m		
Resultados:			3024,76290	8,01459
T _x	T_x = 9125	días		

Para el cálculo correspondiente a los otros tiempos de tránsito, 1 día, 50 días y 1460 días (4 años), sólo es necesario tantear en esta hoja de cálculo Microsoft Excel el valor de X_L hasta obtener el T_x, al ser el resto de datos comunes. Los resultados se muestran en la tabla 34.

6.3.9. Método de Krijgsman y Lobo Ferreira

El método de Krijgsman y Lobo Ferreira (Krijgsman y Lobo Ferreira, 2001), desarrolla un procedimiento analítico para la delimitación de perímetros de protección para un tiempo de tránsito de 50 días, si bien es también aplicable para otros tiempos de tránsito.

Para optimizar los resultados obtenidos emplearon como referencia de máxima precisión los resultados derivados de la utilización del modelo matemático Visual MODFLOW (Waterloo Hydrogeologic, 1995), en supuestos teóricos de gabinete, con diferentes rangos de los valores que se contemplan en dicho modelo, aplicándose el método propuesto a esos mismos valores.

Los rangos de variación usados para estas variables (Krijgsman y Lobo Ferreira, 2001) fueron:

Porosidad eficaz (m_e):	0,1-0,5
Conductividad hidráulica (K):	1-60 m/d
Gradiente hidráulico (i):	0-0,05
Caudal de bombeo (Q):	100-5.000 m ³ /d
Espesor saturado del acuífero (b):	10-80 m

La solución analítica del problema propuesto parte de una modificación de la fórmula de Bear y Jacob (1965). Ésta no se puede resolver más que mediante aproximación por series de Taylor, con un programa informático que invierte la función, el cual conduce a una función:

$$x = \sqrt{2 \cdot (y - \ln(1 + y))}$$

$$x = 2 \cdot K \cdot i \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot b \cdot t}{Q \cdot m_e}} \quad I' = \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i}{Q}$$

Esta al ser invertida da valores aproximados de y mediante una función compleja, y comparando gráficamente los valores se determina el intervalo para el que la aproximación es válida, siendo éste de hasta $x=5,5$ lo que es inaceptable para estimar la zona de tiempo de tránsito de 50 días, ya que utilizando Visual MODFLOW se llegó hasta valores de $x=18$ (Krijgsman y Lobo Ferreira, 2001).

Los autores proponen ajustar una línea a los resultados del modelo obtenidos a partir de los valores de m_e , K, i, Q y b ya que el objetivo es simular los valores ofrecidos por éste. De esta manera se deriva una *solución empírica*.

Esta indica una función entre valores de $-7 < x < 18$ ya que los valores superiores e inferiores dan errores.

Consideran preferible el considerar dos líneas de tendencia debido la complejidad de la ecuación que resultaría de una sola (6º orden). De éstas una será para la zona aguas abajo y la otra aguas arriba.

Distancia de protección aguas arriba:

Se puede obtener una tendencia polinómica que de manera simplificada pero suficientemente precisa (Krijgsman y Lobo Ferreira, 2001) es:

$$r = \frac{(0,00002x^5 - 0,0009x^4 + 0,015x^3 + 0,37x^2 + x)}{I'}$$

Donde:

$$x = 2 \cdot K \cdot i \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot b \cdot t}{Q \cdot m_e}} \quad I' = \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i}{Q}$$

Los errores cometidos se calculan tomando como *valor real* el obtenido mediante la utilización del programa Visual MODFLOW. Se obtienen errores inferiores a un 4% para valores de $x < 18$.

Para evaluar los errores obtenidos, especialmente al utilizar valores elevados o muy bajos de los parámetros considerados, los autores efectuaron diversas pruebas (Krijgsman y Lobo Ferreira, 2001) obteniéndose los siguientes resultados:

- Gradiente hidráulico: Es previsible un descenso de la distancia calculada con una menor pendiente. Se puede llegar a un círculo perfecto cuando se aproxima a cero, que se puede calcular mediante el método del radio fijo.
- Caudal extraído: Se espera una disminución de la distancia con la disminución de caudal extraído, lo que se comprueba tanto con caudales muy altos o bajos.
- Conductividad hidráulica: Se espera un descenso del radio calculado al disminuir la K.
- Espesor saturado: Con la disminución del espesor del acuífero se puede esperar un incremento del radio calculado.
- Porosidad eficaz: Mediante una disminución de la porosidad efectiva se producirá un aumento de la distancia. Se observa para todo el rango de porosidades.

Los autores concluyen que no existen limitaciones en los rangos de utilización de los parámetros, si bien desaconsejan emplear este método para valores de $x > 18$.

Distancia de protección aguas abajo:

Si existe un gradiente la zona de protección de 50 días tiene forma elipsoidal.

Si se usa la ecuación obtenida anteriormente con x negativo se producen grandes errores. Se realiza una aproximación similar a la realizada en el caso anterior con los valores obtenidos empleando el programa Visual MODFLOW en el intervalo $0 > x > -3,5$ dentro del que se sigue una tendencia que se pierde después y se producen mayores errores.

Para alcanzar una función se hace un gráfico $F \cdot r/x$ en el intervalo y del cual se extrae una línea de tendencia que de manera simplificada viene dada (Krijgsman y Lobo Ferreira, 2001) por la ecuación:

$$r = (0,042x^3 + 0,37x^2 + 1,04x) / F$$

El porcentaje de error, al igual que en el caso anterior, resulta ser de menos de un 4%.

Se desaconseja el uso de esta ecuación para valores de $x < -3,5$ en cuyo caso proponen establecer una distancia de protección mínima de 25 m.

Los autores efectúan como en el caso anterior una evaluación de los errores obtenidos en función del rango de valores empleados y concluyen que el valor de la porosidad eficaz debe ser mayor de 0,1, produciéndose anomalías para valores inferiores, y que no existen límites superiores o inferiores para los parámetros i , Q , k y b .

Distancia de protección perpendicular a la dirección de flujo

Esta es la anchura de la elipse de protección, *radio perpendicular*, que se encuentra entre los valores de r_{max} y r_{min} . A menor gradiente la elipse será más circular.

Debido a que ésta es perpendicular al gradiente se puede utilizar la ecuación del *radio fijo calculado* para 50 días:

$$r = 4 \sqrt{\frac{Q}{m_e \cdot b}}$$

Esta calcula el máximo valor de r_p por lo que siempre sobreprotegerá la zona. Los mayores errores se producen debido a la introducción de gradientes hidráulicos elevados.

Si la distancia aguas arriba no es cuatro veces mayor que aguas abajo el error será menor del 15%, lo que es aún aceptable, en el resto de casos se aplicará únicamente una sobreprotección (Krijgsman y Lobo Ferreira, 2001).

Ajuste final del área de protección

La desprotección que se produce aguas arriba viene dada por no ser la zona *real* de protección para 50 días una elipse exacta, su anchura máxima no está en el centro de la elipse. Esto se puede corregir modificándola y haciéndola más redondeada en la zona aguas arriba, dibujando para ello un círculo con el radio conocido en el borde de esta zona, lo que mejora la precisión, especialmente para valores de gradiente hidráulico elevados (Krijgsman y Lobo Ferreira, 2001).

Los resultados obtenidos al aplicar este método se indican en las tablas 36, 37 y 38.

Hay que indicar que debido a los valores de porosidad eficaz del acuífero en esta área no se está dentro del rango de aplicabilidad del método aguas abajo (porosidad eficaz superior a 0,1). Por este motivo sólo se ha empleado la distancia aguas arriba para los tiempos de tránsito de 1 día, 4 años y 25 años, definiéndose únicamente a modo orientativo de una forma completa para un tiempo de tránsito de 50 días.

Tabla 36: Resultados obtenidos aplicando el Método de Krijgsman y Lobo Ferreira a las captaciones de abastecimiento a Villacastín en el acuífero del Terciario detrítico.

	Parámetros	Captaciones de abastecimiento en el acuífero del Terciario Detritico			
		Sondeo San Bartolomé (172020004)	Sondeo Puente Alzado (172020001)	Sondeo Cañada del Abad (172020003)	Sondeo Camino del Valle (172020005)
Datos de Partida	Q (m ³ /día)	151,2	151,2	151,2	151,2
	l	0,025	0,011	0,02	0,04
	K (m/día)	0,32	0,33	0,36	0,34
	m _c	0,002	0,002	0,002	0,002
	b	93	90	82	86
Resultados de las Formulas	X50 días	3,51	1,56	2,971	5,748
	F50 días	0,03	0,01	0,024	0,04
	RAguas arriba-50 días (m)	279	187	268	411
	RAguas abajo-50 días (m)	325	199	304	539
	RPerpendicular al flujo-50 días (m)	114	116	121	119
	RAguas arriba-1 día (m)	19	18	20	22
	RAguas arriba-4 años (m)	6.073	2.982	5.507	11.898
	RAguas arriba-25 años (m)	88.830	17.266	55.236	681.085

Tabla 37: Desarrollo del cálculo, por el método de Krijgsman y Lobo Ferreira, de las zonas de restricciones de los perímetros de protección, para un tiempo de tránsito de 50 días, de los sondeos de abastecimiento a Villacastín "San Bartolomé" y "Puente Alzado" en el acuífero del terciario detrítico, empleando el programa Microsoft Excel.

<u>APLICACIÓN DEL MÉTODO AL SONDEO "SAN BARTOLOMÉ"</u>			
Datos de partida:			
Caudal:	Q = 151,2	m ³ /día	
Gradiente hidráulico:	i = 0,025		
Conductividad hidráulica:	K= 0,32	m/día	
Porosidad eficaz:	m _e = 0,002		
Espesor saturado:	b = 93	m	
Tiempo:	t = 50	días	
Resultados:	$X = 2 \cdot K \cdot i \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot b \cdot t}{Q \cdot m_e}}$	X = 3,51667	
	$F = \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i}{Q}$	F = 0,03092	
Perímetro de protección:	R AGUAS ARRIBA	R_{ARRIBA} = 279	
	R AGUAS ABAJO	R_{ABAJO} = 325	
	R PERPENDICULAR AL FLUJO	R_{PERP} = 114	
<u>APLICACIÓN DEL MÉTODO AL SONDEO PUENTE ALZADO</u>			
Datos de partida:			
Caudal:	Q = 151,2	m ³ /día	
Gradiente hidráulico:	i = 0,011		
Conductividad hidráulica:	K= 0,33	m/día	
Porosidad eficaz:	m _e = 0,002		
Espesor saturado:	b = 90	m	
Tiempo:	t = 50	días	
Resultados:	$X = 2 \cdot K \cdot i \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot b \cdot t}{Q \cdot m_e}}$	X = 1,56974	
	$F = \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i}{Q}$	F = 0,01358	
Perímetro de protección:	R AGUAS ARRIBA	R_{ARRIBA} = 187	
	R AGUAS ABAJO	R_{ABAJO} = 199	
	R PERPENDICULAR AL FLUJO	R_{PERP} = 116	
RANGOS DE VALIDEZ (KRIJGSMAN Y LOBO FERREIRA, 2001):			
R AGUAS ARRIBA:	X < 18		
R AGUAS ABAJO	X > -3,5	m _e > 0.1 (10%)	
R PERPENDICULAR AL FLUJO	R AGUAS ARRIBA < 4 x R AGUAS ABAJO (Error < 15%)		

Tabla 38: Desarrollo del cálculo, por el método de Krijgsman y Lobo Ferreira, de las zonas de restricciones de los perímetros de protección, para un tiempo de tránsito de 50 días, de los sondeos de abastecimiento a Villacastín "Cañada del Abad" y "Camino del Valle" en el acuífero del Terciario detrítico, empleando el programa Microsoft Excel.

<u>APLICACIÓN DEL MÉTODO AL SONDEO CAÑADA DEL ABAD (172020003):</u>			
Datos de partida:	Caudal:	Q = 151,2	m ³ /día
	Gradiente hidráulico:	i = 0,02	
	Conductividad hidráulica:	K= 0,36	m/día
	Porosidad eficaz:	m _e = 0,002	
	Espesor saturado:	b = 82	m
	Tiempo:	t = 50	días
Resultados:	$X = 2 \cdot K \cdot i \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot b \cdot t}{Q \cdot m_e}}$	X = 2,97193	
	$F = \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i}{Q}$	F = 0,02453	
<u>Perímetro de protección:</u>	R AGUAS ARRIBA	R_{ARRIBA} = 268	
	R AGUAS ABAJO	R_{ABAJO} = 304	
	R PERPENDICULAR AL FLUJO	R_{PERP} = 121	
<u>APLICACIÓN DEL MÉTODO AL SONDEO CAMINO DEL VALLE</u>			
Datos de partida:	Caudal:	Q = 151,2	m ³ /día
	Gradiente hidráulico:	i = 0,04	
	Conductividad hidráulica:	K= 0,34	m/día
	Porosidad eficaz:	m _e = 0,002	
	Espesor saturado:	b = 86	m
	Tiempo:	t = 50	días
Resultados:	$X = 2 \cdot K \cdot i \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot b \cdot t}{Q \cdot m_e}}$	X = 5,74894	
	$F = \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i}{Q}$	F = 0,0486	
<u>Perímetro de protección:</u>	R AGUAS ARRIBA	R_{ARRIBA} = 411	
	R AGUAS ABAJO	R_{ABAJO} = 539	
	R PERPENDICULAR AL FLUJO	R_{PERP} = 119	
RANGOS DE VALIDEZ (KRIJGSMAN Y LOBO FERREIRA, 2001)			
R AGUAS ARRIBA:	X < 18		
R AGUAS ABAJO	X > -3,5	m _e > 0.1 (10%)	
R PERPENDICULAR AL FLUJO	R AGUAS ARRIBA < 4 X R AGUAS ABAJO	(Error < 15%)	

6.3.10. Método de Rehse para el cálculo del poder depurador de los materiales

Rehse propone un método empírico para cuantificar el poder depurador de los materiales en la zona no saturada y en la zona saturada, ante los efluentes contaminantes que pudieran atravesarlos.

Para su cálculo (Rehse, 1977 en Lallemand-Barrès y Roux, 1989) se apoya en varias tablas que relacionan el tipo de material y su poder depurador tanto en la zona saturada como en la no saturada.

El poder depurador (Lallemand-Barrès y Roux, 1989) vendrá dado por:

$$M_X = M_A + M_R$$

Donde:

M_X : Poder depurador sobre la totalidad del transporte

M_R : Poder depurador en el trayecto vertical (zona no saturada)

M_A : Poder depurador en el trayecto horizontal (zona saturada)

La depuración es completa cuando: M_X sea mayor o igual a 1.

La depuración en la zona no saturada:

$$M_R = \sum_{i=1}^{i=n} h_i \cdot I_{R_i}$$

Donde:

h_i = Espesor vertical de los materiales en la zona no saturada

I_{R_i} = Índices de depuración para esos materiales en la zona no saturada (Tabla 39)

Cuando $M_R \geq 1$ la depuración en la zona no saturada es completa y según Rehse no sería necesario determinar ningún perímetro de protección.

Cuando $M_R < 1$ la depuración no es completa y el agua contaminada alcanzaría la zona saturada.

La depuración en la zona saturada:

Si $M_X = 1$, es decir existe una depuración completa antes de que el agua llegue a la captación, entonces el poder depurador de la zona saturada será:

$$M_A = 1 - M_R$$

La distancia L que como mínimo es necesario reco-

rrer para alcanzar una depuración total, será:

$$L = \frac{M_A}{I_A}$$

Donde:

I_A : Índice de depuración de la zona saturada correspondiente al material acuífero (Tabla 40)

L = Longitud atravesada de la zona saturada

Al aplicar este método al sondeo San Bartolomé, como ejemplo para ilustrar el desarrollo que se sigue en su utilización, se obtienen los siguientes resultados:

1. Depuración en la zona no saturada (se emplea la tabla 39).

$$M_R = \sum_{i=1}^{i=1} h_i \cdot I_{R_i}$$

$h = 3,2$ m (Espesor vertical de materiales en la zona no saturada en el sondeo).

$I_R =$ Los materiales del acuífero detrítico del Terciario (arenas y gravas en una matriz arcillo-limo-arenosa) corresponderían al material que Rehse define como "M-9: Grava con abundante matriz arenosa y escasamente limosa" al cual le corresponde un valor del índice $I_R = 0,08$ (Tabla 39).

$$M_R = 3,2 \cdot 0,08 = 0,25$$

2. Depuración en la zona saturada (se emplea la tabla 40).

$$M_A = 1 - M_R = 1 - 0,25 = 0,75$$

En este caso, el valor del índice I_A es de 0,007 ya que los materiales que Rehse define como "M-9: Grava con abundante matriz arenosa y escasamente limosa" son los que más se asemejan a los correspondientes al acuífero detrítico del Terciario, que tienen además una velocidad eficaz de: $V_e = 4,0$ m/día (por tanto comprendida entre 3 y 20).

Por tanto la distancia L , que como mínimo es necesario recorrer para alcanzar una depuración total es:

$$L = \frac{M_A}{I_A} = \frac{0,75}{0,007} = 107 \text{ m}$$

El perímetro de protección para esta captación se define por tanto como un círculo con centro en la captación y radio de 107 metros. Los resultados obtenidos al aplicar este método se indican en la tabla 41.

Tabla 39: Poder depurador del suelo en el recubrimiento (Suelo y zona no saturada).

M	Descripción del material	H (m)	$I_R = 1/H$
1	Humus, 5-10 % humus, 5-10% arcilla	1,2	0,8
2	Arcilla sin grietas de desecación, limo-arcilloso. Arena muy arcillosa	2	0,5
3	Limo arcilloso a limo	2,5	0,4
4	Limo, arena poco limosa, arena limosa	3-4,5	0,33-0,22
5	Arena fina a media	6	0,17
6	Arena media a gruesa	10	0,1
7	Arena gruesa	15	0,07
8	Grava con abundante matriz arenosa y limo arcillosa	8	0,13
9	Grava con abundante matriz arenosa y escasamente limosa	12	0,08
10	Grava fina a media, rica en arena	25	0,04
11	Grava media a gruesa con poca arena	35	0,03
12	Gravas, guijarros	50	0,02

M = Número de clasificación granulométrica

H = Espesor de la capa necesario para la depuración

I_R = Índice de depuración en la zona no saturada

Arena: Diámetro de grano 2 – 0,063 mm

Limo: Diámetro de grano 0,063 – 0,005 mm

Arcilla: Diámetro de grano < 0,005 mm

Modificado de Rehse, 1977.

Tabla 40: Poder depurador del suelo en la zona saturada.

M	Descripción del material	L (m)	$I_A = 1/L$
9	Grava con abundante matriz arenosa y escasamente limosa	a) 100	0,01
		b) 150	0,007
		c) 170	0,006
		d) 200	0,005
10	Grava fina a media, rica en arena	a) 150	0,007
		b) 200	0,005
		c) 220	0,0045
		d) 250	0,004
11	Grava media a gruesa con poca arena	a) 200	0,005
		b) 250	0,004
		c) 270	0,0037
		d) 300	0,0033
12	Gravas, guijarros	a) 300	0,0033
		b) 340	0,0029
		c) 360	0,0027
		d) 400	0,0025

L = Distancia horizontal necesaria para la depuración (m)

a) Velocidad eficaz < 3 m/día

b) Velocidad eficaz comprendida entre 3 y 20 m/día

c) Velocidad eficaz comprendida entre 20 y 50 m/día

d) Velocidad eficaz > 50 m/día

I_A = Índice de depuración en el acuífero

Modificado de Rehse, 1977.

Tabla 41: Resultados obtenidos aplicando el método de Rehse para el cálculo del poder depurador de los materiales a las captaciones de abastecimiento a Villacastín en el acuífero del Terciario detrítico.

		Captaciones de abastecimiento en el acuífero del Terciario Detrítico			
		Sondeo San Bartolomé (172020004)	Sondeo Puente Alzado (172020001)	Sondeo Cañada del Abad (172020003)	Sondeo Camino del Valle (172020005)
Datos de Partida	h (m)	3,2	0,1	14,5	10
	K (m/día)	0,32	0,33	0,36	0,34
	i	0,025	0,011	0,02	0,04
	m_c	0,002	0,002	0,002	0,002
	V_c (m/día)	4,0	1,81	3,6	6,8
Resultados de las Formulas	l_p Tablas	0,08	0,08	0,08	0,08
	M_R	0,25	0,008	1,16 Depuración completa	0,8
	M_A	0,75	0,99	---	0,2
	l_p Tablas	0,007	0,01	---	0,007
	L (m)	107	99	0	29

6.3.11. Modelos matemáticos. Aplicación de los programas Visual MODFLOW y Visual MODPATH

El programa MODFLOW es un modelo tridimensional de aguas subterráneas de diferencias finitas desarrollado por Michael McDonald y Arlen Harbaugh (United States Geological Survey, USGS) que apareció por primera vez en 1983, publicándose su documentación final en 1988 (McDonald y Harbaugh, 1988), y ha sido modificado numerosas veces. El programa ha sido diseñado (USGS, 1997) para simular sistemas acuíferos en los cuales se cumple:

- El flujo se produce en la zona saturada.
- Se puede aplicar la Ley de Darcy. Para porosidad intergranular.
- La densidad y temperatura del agua subterránea son constantes.
- Las direcciones principales de conductividad hidráulica horizontal o transmisividad no varían dentro del sistema.

MODFLOW no resuelve flujo dependiente de la densidad (por ejemplo intrusión de agua salada), ni medio fracturado (a menos que se asuma porosidad intergranular equivalente).

En los sistemas acuíferos que cumplen estas condiciones, MODFLOW permite simular flujo en régimen permanente y transitorio en acuíferos libres o confinados, unidades confinantes, contemplando una gran

variedad de rasgos y procesos como embalses, ríos, arroyos estacionales, drenajes, fuentes, pozos, evapotranspiración, recarga procedente de precipitación y de retornos de riego, fallas y otras barreras. Permite al menos cuatro métodos de solución para resolver las ecuaciones de diferencias finitas empleadas.

Utiliza el método de diferencias finitas, que divide la zona a modelar en bloques rectangulares (celdas) mediante un mallado, organizándose estas por filas, columnas y capas.

Para cada celda hay que especificar las propiedades del acuífero. Además se introduce la información sobre pozos, ríos y los demás rasgos de flujo de entrada o de salida al sistema que se considere.

MODFLOW resuelve las ecuaciones que definen el flujo en el acuífero modelado y proporciona como salidas el nivel del agua en cada celda en diferentes pasos de tiempo.

El error cometido se evalúa comparando los niveles simulados con los niveles medidos en campo lo que permite calibrar el modelo.

Su módulo "Zone Budget" proporciona además un balance de entradas y salidas al acuífero, así como el flujo para cada celda.

El programa MODPATH, fue desarrollado por David Pollock (USGS) en 1990, saliendo su última versión (v 3.0) en 1994 (Pollock, 1994). Es un modelo que uti-

- Límite sur: El contacto con los materiales graníticos (límite impermeable), definido mediante la cartografía hidrogeológica (Figura 20).
- Límites este y oeste: Los definen las divisorias hidrogeológicas obtenidas en base al análisis de la piezometría (Figura 20).
- Límite norte: Es el límite de la zona estudiada con el resto del acuífero del Terciario detrítico.

En el modelo se han considerado dos capas en los materiales detríticos del Terciario y Cuaternario. La primera capa corresponde a un acuífero libre cuyo muro está a cota 935 metros y su techo en la superficie del terreno. Su potencia en el área donde se ubican las 4 captaciones de abastecimiento es de 100 metros. La segunda capa, de 300 metros de potencia, corresponde a un acuífero confinado en los mismos materiales.

El establecer dos capas en el modelo permite simular ríos o drenes que afecten solo a la primera capa (en lugar de a los 400 metros de potencia del acuífero) y poder considerar que los bombeos afectan solo a los niveles más someros del acuífero, es decir a cota superior a 935 metros, como ocurre en la realidad en todas las captaciones del área modelada.

Se ha establecido una malla cuadrada con celdas de 500 metros de longitud que ha sido georeferenciada empleándose como base el mapa topográfico a escala 1:50.000 de dicha zona.

El modelo requiere asignar a cada celda valor de diferentes parámetros, obtenidos en base al análisis efectuado en el apartado 6.1.5. Estos son: Conductividad hidráulica en tres direcciones del espacio (K_x , K_y , K_z), porosidad eficaz, porosidad total, coeficiente de almacenamiento en acuífero libre (S_y), coeficiente de almacenamiento en acuífero confinado (S_s), si bien el modelo asigna en cada momento a cada capa el valor que le corresponde (S_s o S_y) dependiendo de la situación del nivel piezométrico (así aplica, por ejemplo, a la capa 2 el valor S_s mientras que el nivel piezométrico esté por encima de la cota del techo de dicha capa).

El modelo requiere además introducir los valores de las condiciones de contorno (Reilly, 2001).

En los materiales detríticos del norte de Villacastín se han considerado la recarga por infiltración de la precipitación (que se efectúa sólo en la capa superior), celdas de nivel constante, en las cuales el nivel piezométrico no varía en la simulación (para lo cual el modelo les asigna un valor de almacenamiento infinito, aunque físicamente el almacenamiento no puede ser mayor que 1), y celdas con drenes (Figura 26).

Las celdas de nivel constante se emplean exclusivamente en el límite norte de la zona estudiada con el resto del acuífero del Terciario detrítico, en las dos capas del modelo, para que no se produzcan cambios en las líneas de flujo de esta zona, simulando que el flujo continúa hacia el resto del acuífero del Terciario detrítico.

Para simular los arroyos que surcan el área modelada se ha considerado más adecuado a su escasa entidad y tipo de funcionamiento considerarlos como drenes. En estos si el nivel piezométrico es superior a la cota del dren el agua se evacua del modelo (desaparece) y si el nivel piezométrico es inferior a la cota del dren no actúa.

Se procede entonces a ejecutar el modelo en régimen permanente sin bombeos.

El modelo genera valores de piezometría que son comparados con los niveles de piezometría reales medidos en campo. Para facilitar esta labor el programa considera la posibilidad de definir puntos de observación lo que permite emplear, además de la valoración cualitativa efectuada directamente por el modelador, las herramientas estadísticas que incorpora el programa para evaluar la calibración obtenida.

Este proceso se ha repetido modificando, donde era necesario y asumible en base a los datos hidrogeológicos disponibles, los valores iniciales de entrada hasta concluir la calibración, es decir hasta obtener una diferencia entre los valores reales medidos y los simulados considerada aceptable.

Una vez concluida la calibración en régimen permanente se ha procedido a simular dos hipótesis. En primer lugar simular en régimen permanente los niveles obtenidos con un bombeo continuo en los 4 sondeos de abastecimiento en el acuífero del terciario detrítico. Una segunda hipótesis que contempla además de esos bombeos el existente en otras dos captaciones del acuífero (sondeos 172020006 y 172010003) también de un modo continuo, en régimen permanente.

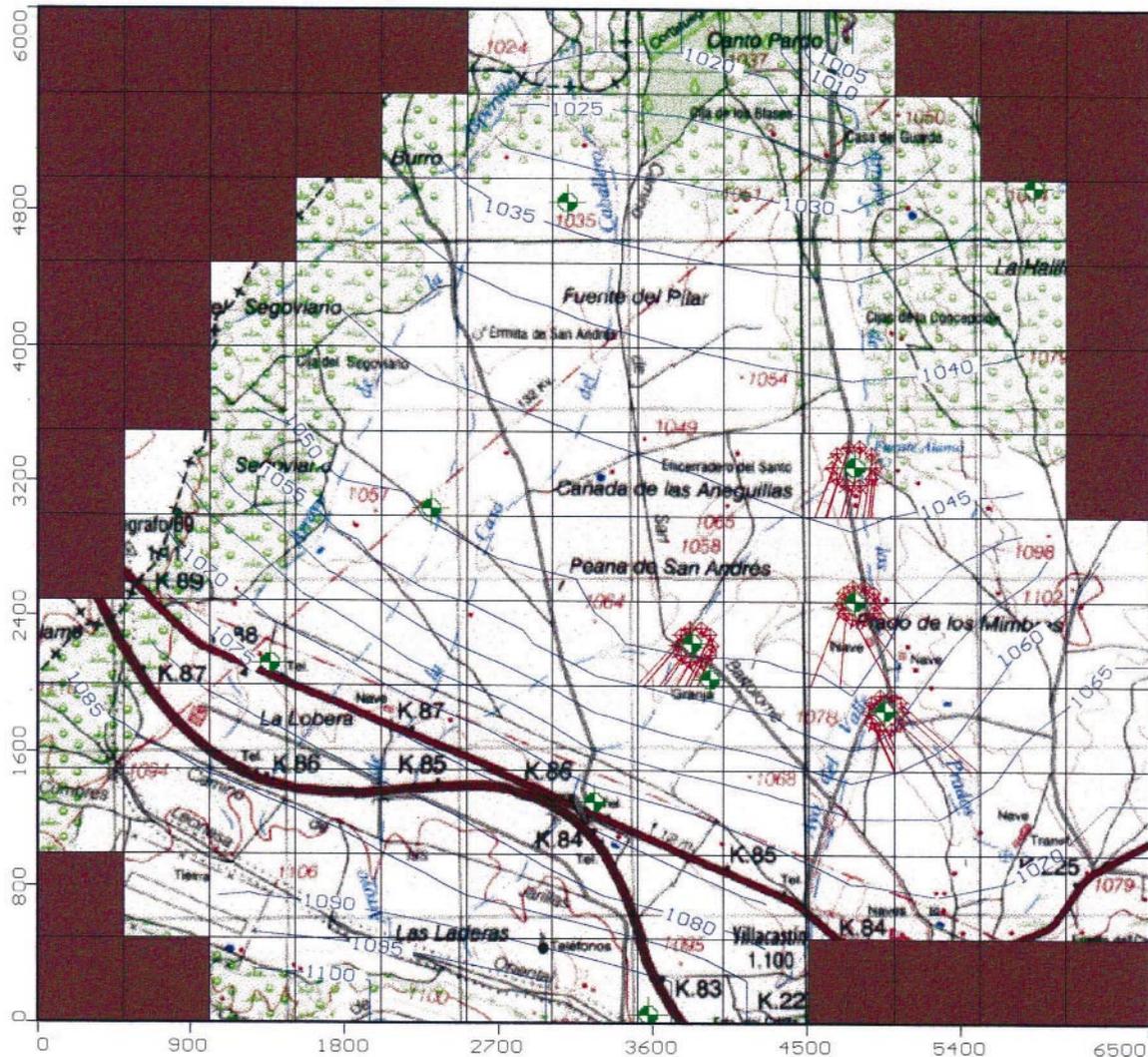
Por último, partiendo de los resultados de la simulación obtenidos con Visual MODFLOW con las dos opciones de bombeos antes indicados en régimen permanente, se ha utilizado el programa Visual MODPATH para simular el área de procedencia de las partículas que alcanzarían las captaciones en diferentes tiempos de tránsito.

Para ello se rodea cada captación de abastecimiento con partículas, empleándose en la simulación efectuada un círculo de 100 metros de radio, y se simu-

la el recorrido de esta agua arriba para los tiempos de tránsito de 50 días, 4 años y 25 años.

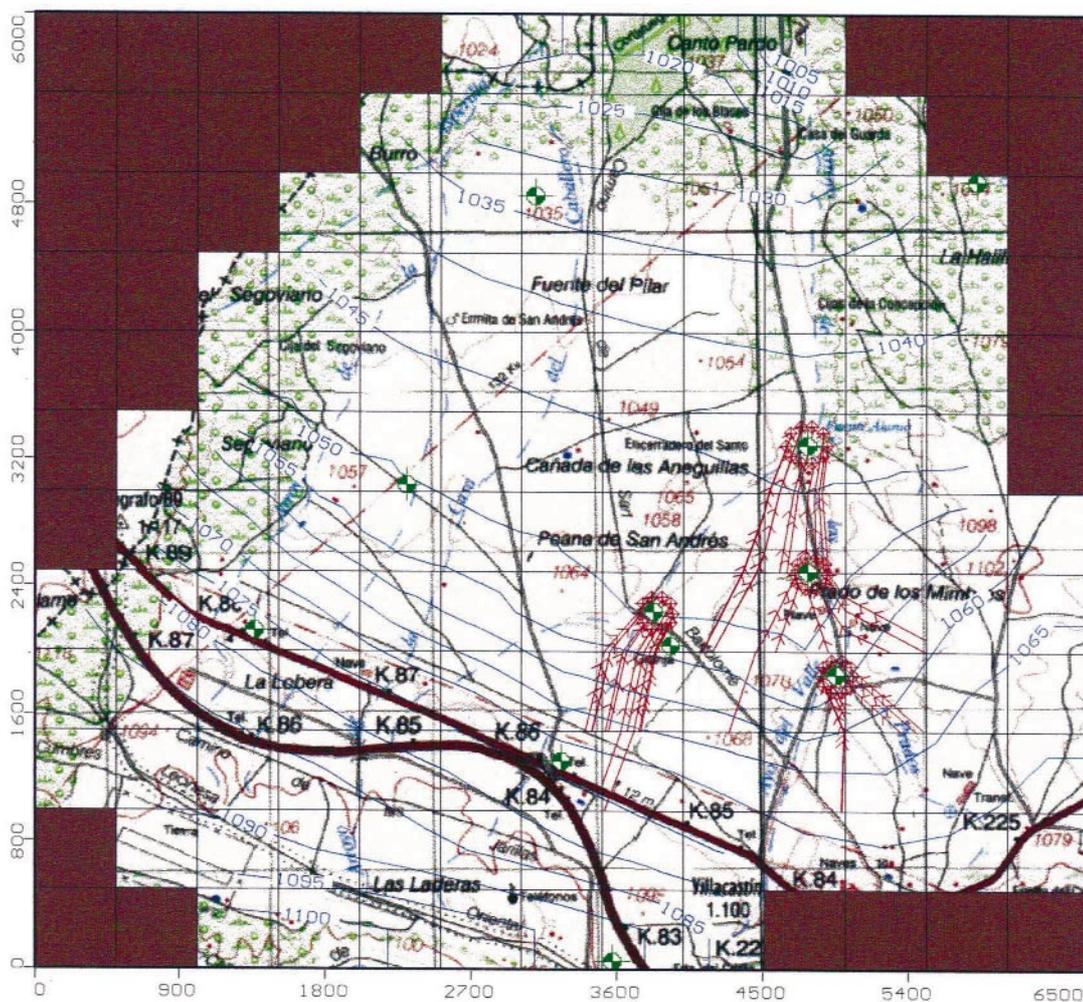
El empleo de las dos hipótesis indicadas permite evaluar la repercusión que tiene, en el tamaño y forma de las zonas de alimentación de las captaciones de abastecimiento urbano a Villacastín, que existan o no bombeos en esos dos sondeos, destinados a abastecer una granja (172020006), así como a un restaurante y dos gasolineras (172010003), proporcionando así una información adicional para delimitar los perímetros de protección.

En las figuras 27, 28 y 29 se muestran los resultados proporcionados por la simulación efectuada empleando el modelo para las zonas de alimentación de las captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín, para diferentes tiempos de tránsito, que permiten definir el perímetro de protección correspondiente a cada captación, considerando la opción seleccionada. Ésta ha sido la más conservadora o protectora, es decir, un bombeo continuo en las cuatro captaciones de abastecimiento urbano y considerar que continuará el bombeo indefinidamente en los otros dos sondeos antes indicados.



Fuente: Martínez Navarrete, 2002

Figura 27: Zonas de alimentación para un tiempo de tránsito de 50 días, con bombeo continuo en los 4 sondeos de abastecimiento y otras dos captaciones en régimen permanente, que definen la zona del perímetro de protección correspondiente a ese tiempo.



Fuente: Martínez Navarrete, 2002

Figura 28: Zonas de alimentación para un tiempo de tránsito de 4 años con bombeo continuo en los 4 sondeos de abastecimiento y otras dos captaciones en régimen permanente, que definen la zona del perímetro de protección correspondiente a ese tiempo.

OTROS MÉTODOS

6.3.12. Modelos analíticos: WhAEM-2000

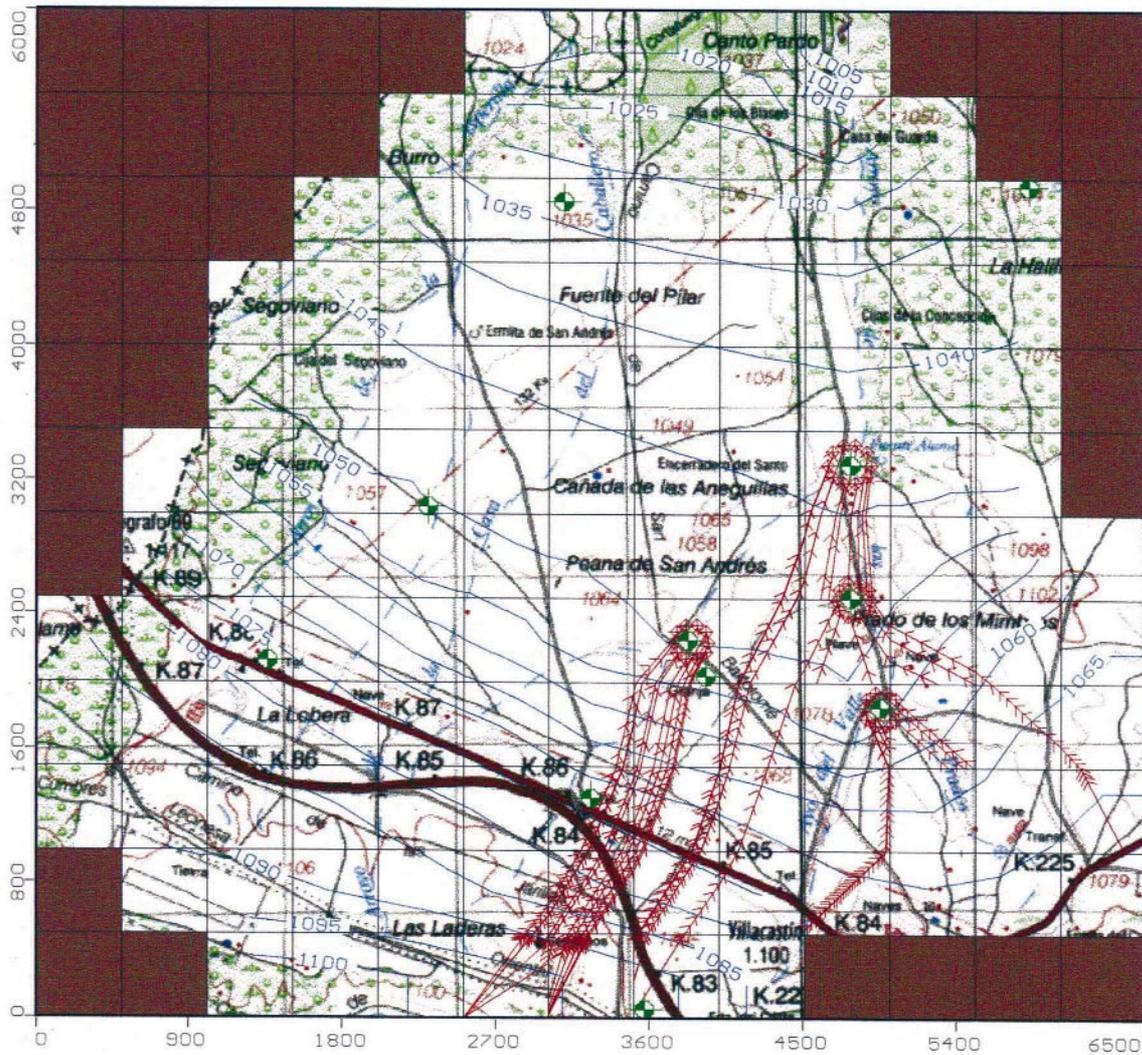
6.3.12.1. Evolución y estado actual

La United States Environmental Protection Agency (USEPA), al principio de los años 90, desarrolló el modelo matemático WHPA que admite diferentes soluciones de flujo (*soluciones de flujo uniforme*) para la delimitación de zonas de captura en un tiempo de tránsito mediante el diseño de líneas de igual tiempo de residencia obtenidas a partir de las líneas de flujo de diferentes partículas.

En 1994 se desarrolló el modelo CZAEM, introduciendo la utilización del método de elementos analíticos (*solución analítica*), basado en el principio de superposición de numerosas funciones analíticas,

cada una de las cuales representa un elemento hidrológico. El modelo bidimensional utiliza la hipótesis de Dupuit, resistencia cero al flujo vertical y gradientes verticales nulos (es asumible cuando la zona de captura es al menos un orden de magnitud superior al espesor saturado del acuífero), con ello se asimila el modelo bidimensional a uno tridimensional. Este modelo incluía sondeos, líneas de flujo superficial, flujo uniforme y elementos circulares de recarga, funcionando bajo el sistema operativo DOS. Como resultados ofrecía la delineación de envolventes para los tiempos de tránsito y subzonas de tiempo y origen.

El desarrollo de la primera versión de **WhAEM** (Well-head Analytical Element Model), modelo de simulación de sondeos mediante elementos analíticos, añadió al anterior un interfaz gráfico y un preprocesador geográfico.



Fuente: Martínez Navarrete, 2002

Figura 29: Zonas de alimentación para un tiempo de tránsito de 25 años con bombeo continuo en los 4 sondeos de abastecimiento y otras dos captaciones en régimen permanente, que definen la zona del perímetro de protección correspondiente a ese tiempo.

El WhAEM2000 funciona en entorno Windows, incluye un interfaz gráfico completo, la utilización como mapas base de los mapas del USGS en formato *digital line graph* (.dlg) y una solución analítica ModAEM que incluye límites de flujo de formas arbitrarias, que es su principal novedad.

Este modelo se puede utilizar para la delineación de zonas de protección con radio fijo, en pozos con flujo uniforme y en acuíferos confinados o libres con flujo constante y con propiedades y recarga constantes.

Además incorpora límites en el dominio del flujo regional, calcula el flujo ambiental en base a la recarga del acuífero debida la precipitación por lo que este no tiene que ser calculado previamente y no se limitará a un flujo uniforme. Además las características superficiales y los límites geológicos pueden ser líneas curvadas y de extensión limitada.

No obstante queda limitado por carecer de asignación de diferente permeabilidad a distintas áreas, variabilidad en las cotas de elevación del acuífero, resistencia al flujo hacia o desde las aguas superficiales, y la existencia de un flujo multi-acuífero. Todo ello limita su aplicabilidad pero lo hace más sencillo de operar y con necesidad de menor número de datos que modelos más sofisticados, por ejemplo MODFLOW.

Es un modelo de dominio público (freeware), encontrándose la versión WhAEM2000 v 2.1.0 en las páginas de Internet de la USEPA. Se está trabajando en la mejora de diversas características pobremente desarrolladas en la actualidad y el desarrollo de otras nuevas para la mejora de la simulación.

(<http://www.epa.gov/athens/software/whaem/index.html>).

6.3.12.2. Delimitación de zonas de protección mediante la utilización del WhAEM2000

Los mapas base que utiliza el modelo tienen formato "binary base map" (.bbm), forma comprimida de los mapas .dlg desarrollados por el USGS, que utilizan proyección UTM. Además este formato acepta la conversión de mapas base con diferentes formatos, entre los que destaca el formato utilizado por AutoCAD (.dxf).

El modelo acepta la utilización de cualquier sistema cartesiano de coordenadas, ya que el interfaz gráfico proporciona el preproceso y postproceso de las coordenadas del mapa base.

La delimitación de las zonas de protección mediante la utilización del modelo WhAEM2000 se puede realizar a través de diferentes aproximaciones en función de los datos de entrada de que se disponga. Así éstas pueden venir definidas mediante los siguientes criterios, de los que el tercero es el específico para el funcionamiento real del modelo:

- Criterio de **distancia**: mediante un radio fijo, primera línea de defensa contra la contaminación superficial y también contra microbios patógenos. Se lleva a cabo mediante la situación del pozo en las coordenadas exactas y la asignación del valor del radio arbitrario.
- Criterio del **tiempo de residencia**: los contaminantes no conservativos se asimilarán en un tiempo determinado de residencia en el subsuelo y la detección de éstos da tiempo para la remediación o búsqueda de captaciones alternativas para el abastecimiento. Se puede llevar a cabo en el modelo mediante la aplicación de:
 - Radio fijo calculado: basado en un análisis bidimensional del balance estático de agua asumiendo un flujo ambiental despreciable, que necesita los datos de recarga, tiempo, porosidad, espesor saturado y caudal. Puede considerarse dos casos simplificados *método de la recarga* y *método volumétrico*. La isocrona radial simétrica sólo será válida si no hay flujo ambiental o el pozo domina el flujo dentro de ésta.
 - Pozo con flujo uniforme: para la aplicación del modelo a este caso es necesario utilizar dirección y sentido del flujo natural, gradiente hidráulico, transmisividad, caudal de explotación y tiempo máximo de residencia deseado. El modelo permite el cálculo del gradiente mediante el método de los tres puntos.

En este caso, y los que se exponen seguidamente de mayor complejidad, se pueden realizar comprobaciones de la solución conceptual mediante puntos de control de nivel conocido que mostraran las diferencias con el nivel calculado por el modelo y el asignado.

- Criterio de los **límites de flujo**: mediante la utilización del método analítico.

El modelo WhAEM utiliza el método de elementos analíticos para resolver el flujo subterráneo sujeto a condiciones de contorno. Los **elementos analíticos** son "funciones matemáticas que representan características hidrológicas en un modelo de flujo subterráneo".

En el WhAEM estos elementos se asocian a funciones que representan entrada o salida de agua de una sección de un elemento que influye en el sistema del agua subterránea:

- *Corrientes superficiales y lagos*: con densidad de filtración constante que en general no es conocida, por lo que se asigna un valor piezométrico central medio. La densidad de filtración se iguala a la densidad de flujo desde el acuífero al río y cada sección puede tener una densidad diferente. Éstas no son conocidas a priori, únicamente se considera conocida la carga hidráulica bajo cada sección que conduce a un sistema de ecuaciones. El número de líneas necesarias para la representación de una corriente superficial depende de la necesidad de ajustarse a su geometría y la necesidad de modificar las condiciones de recarga o descarga a lo largo de ella.
- *Pozos*.
- *Líneas de flujo nulo, contactos geológicos y líneas dobles*: no presenta la posibilidad de diferenciar zonas de diferente permeabilidad, se utilizan líneas abiertas o dobles para representar límites de flujo nulo para simular una reducción total de la permeabilidad. Su extensión asegura su influencia en la zona de interés. Si su presencia no afecta significativamente a la zona delineada, no se necesitan modelos más complejos.

Una vez que el modelo calcula todas las densidades del sistema se puede calcular el potencial y flujo medio para cualquier punto añadiendo la influencia de todos los elementos. Este es el *principio de superposición*.

La salida del modelo crea unos archivos de resultados calculados y representa los mapas de base con-

siderados, así como con los elementos introducidos que se soliciten y diversos elementos gráficos que se obtienen a partir de los datos calculados por el modelo destacando la piezometría de la zona modelada y las trayectorias de flujo de las partículas (el número deseado) dentro de la zona de captura obtenida para el tiempo simulado, que permitirán diseñar el área de protección necesaria para este tiempo de tránsito (ver figura 30). Estos mapas obtenidos se pueden exportar en formato .dxf para su tratamiento posterior.

6.3.13. Método de Hoffman y Lillich

Es un método iterativo (Hoffman y Lillich, 1973) aplicable en medios homogéneos cuando el descenso provocado por el bombeo es pequeño en relación al espesor del acuífero. El descenso en las proximidades de una captación puede describirse como:

Acuífero confinado

$$h - h_w = (h_0 - h_w) \cdot \frac{\ln(l/r)}{\ln(R/r)}$$

Acuífero libre. Si el descenso es menor que 1/10 de la potencia del acuífero se puede emplear la ecuación del acuífero confinado.

$$(h - h_w)^2 = (h_0 - h_w)^2 \cdot \frac{\ln(l/r)}{\ln(R/r)}$$

Donde:

h = nivel piezométrico en relación a un nivel de referencia en un punto dado

L = distancia de ese punto a la captación

h_w = nivel dinámico en el pozo respecto al nivel de referencia

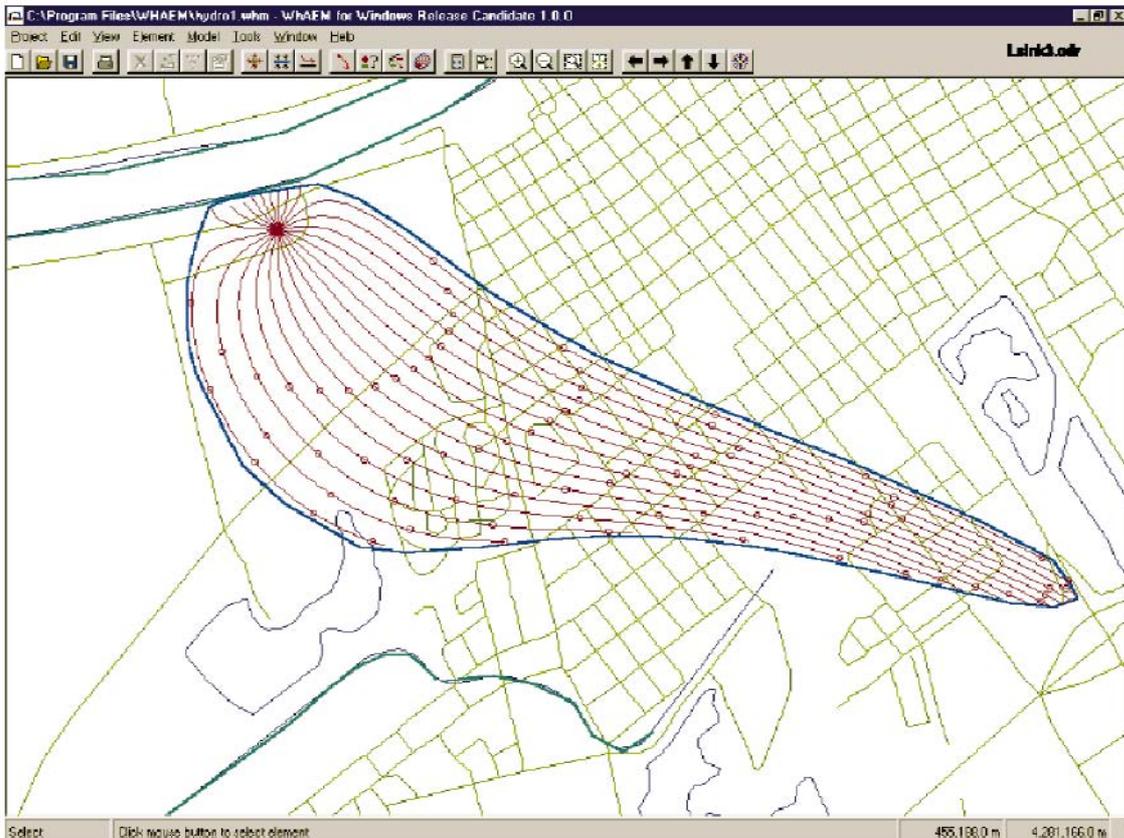
h_0 = nivel piezométrico en reposo respecto al nivel de referencia

R = radio de influencia

r = Radio del pozo

Para aplicar este método (Figura 31) se sigue el siguiente procedimiento:

1º) El gradiente:
$$i = \frac{(h - h_w)}{l}$$



Fuente: USEPA, 2000

Figura 30: Aspecto de la salida del modelo WhAEM 2000 para la simulación de una zona de protección de una captación en un tiempo determinado.

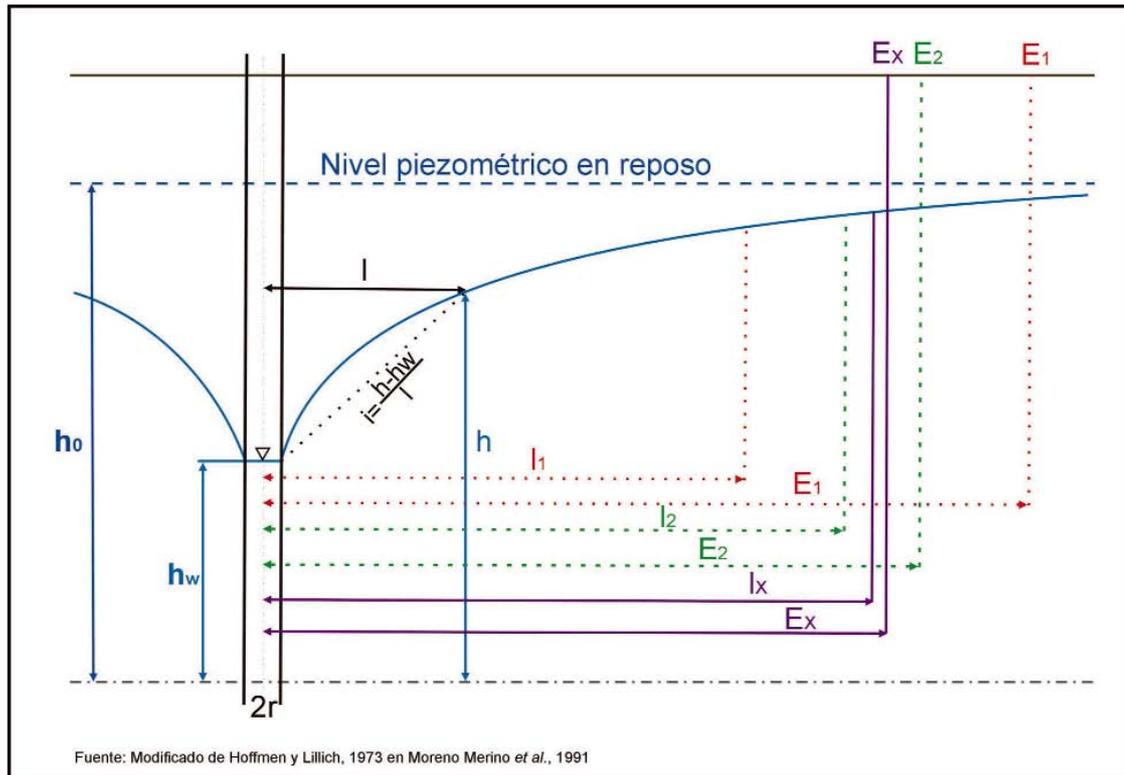


Figura 31. Aplicación del método de Hoffman y Lillich.

2º) La velocidad eficaz: $V_e = \frac{K \cdot i}{m_e}$

Donde:

K = Conductividad hidráulica

i = Gradiente hidráulico

m_e = Porosidad eficaz

3º) La distancia correspondiente a un tiempo de tránsito t es:

$$L = V_e \cdot t$$

Se trata entonces de encontrar la distancia l para la cual (siguiendo el procedimiento descrito en los pasos 1 a 3) esta tenga el mismo valor que la distancia E .

6.3.14. Método de Albinet

Este método (Albinet, 1972) se basa en la fórmula de Theis, válida en régimen transitorio. Si se considera una larga duración del bombeo esta fórmula proporciona un estado en régimen pseudopermanente.

Las curvas de descenso en función de la distancia al pozo pueden calcularse aplicando la fórmula de Theis,

$$d = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot W(u) \quad u = \frac{R^2 \cdot S}{4 \cdot T \cdot t}$$

d : descenso a una distancia R del pozo de bombeo tras un tiempo t

Q : caudal constante de bombeo

T : transmisividad

R : distancia a la captación

S : coeficiente de almacenamiento

$W(u)$: función de pozo (tabulada)

u : función auxiliar

t : tiempo transcurrido desde el comienzo del bombeo

Conocida la superficie piezométrica previa al bombeo se trazan curvas de igual descenso alrededor de la captación, en función del caudal elegido, según la fórmula de Theis (Figura 32). Estos círculos cortarán las isopiezas antes del bombeo en unos puntos en los que se calcularán, por sustracción, los valores modificados de la carga hidráulica. A partir de esos puntos se trazan las isopiezas resultantes tras el bombeo, así como las líneas de corriente, que permitirán deducir el perímetro de llamada de la captación.

Albinet, 1972 en Moreno Merino *et al.*, 1991, proporciona un ejemplo. Se trata de un acuífero libre; el caudal elegido es de 200 m³/h.

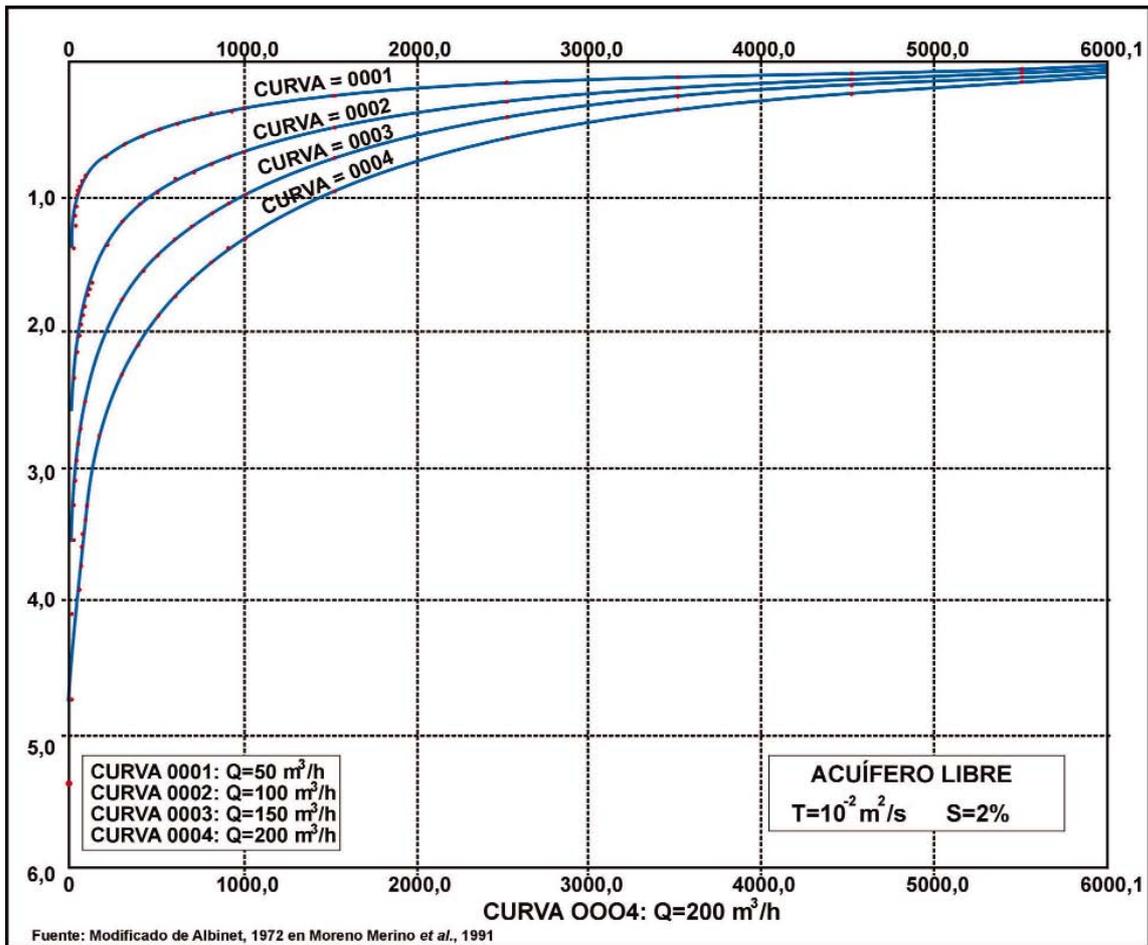


Figura 32: Curvas distancia/descenso.

A partir de la curva de descenso/distancia correspondiente (Figura 33) se trazan los círculos de igual descenso. Se trazan después las isopiezas modificadas por el bombeo (Figura 34) y la zona de llamada de la captación.

Se entiende como “zona de llamada” la parte del área de alimentación en la cual puede apreciarse un descenso piezométrico consecuencia del bombeo y las líneas de corriente se dirigen a la captación.

6.3.15. Nomograma de Van Waegeningh y Van Duijvenboden

Estos autores han puesto a punto nomogramas para obtener el tamaño de la zona de protección. Para su empleo (Van Waegeningh, 1981) es necesario conocer: porosidad eficaz, infiltración, tiempo de tránsito, caudal bombeado y espesor del acuífero.

Si se supone que el caudal extraído de un sondeo Q , es igual a la recarga del acuífero por infiltración, I , sobre una superficie de radio L , se tiene:

$$Q = \pi \cdot L^2 \cdot I$$

A una distancia l del sondeo se tiene:

$$Q_l = \pi \cdot (L^2 - l^2) I$$

con una superficie de alimentación del acuífero

$$A = 2 \cdot \pi \cdot l \cdot b \cdot m_e$$

la velocidad a la distancia l es:

$$V = \frac{dl}{dt} = \frac{Q_l}{A} = \frac{(L^2 - l^2) I}{2 \cdot l \cdot b \cdot m_e}$$

$$dt = \frac{2 \cdot m_e \cdot b \cdot l \cdot dl}{(L^2 - l^2) I}$$

$$t = \frac{-m_e \cdot b}{I} \ln(L^2 - l^2) + cte$$

Para $l=0$, $t=0$ la constante vale:

$$\frac{m_e \cdot b \cdot \ln L^2}{I}$$

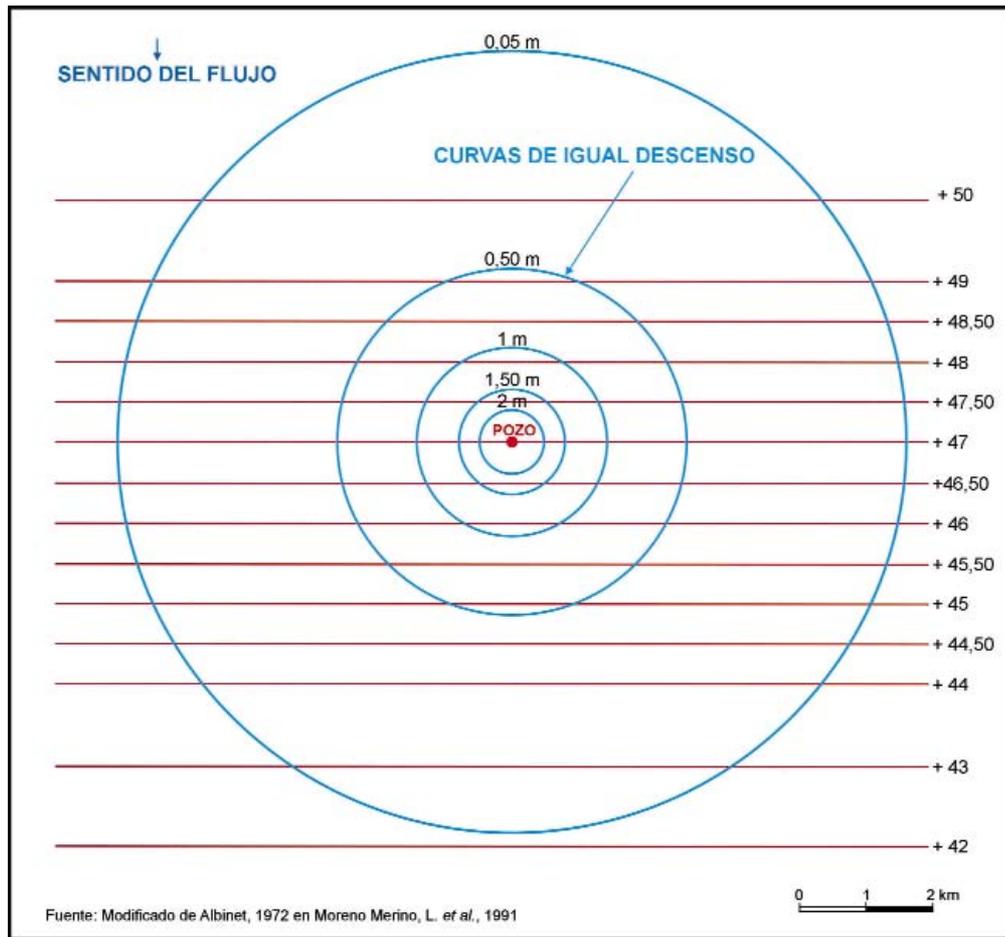


Figura 33: Curvas de igual descenso.

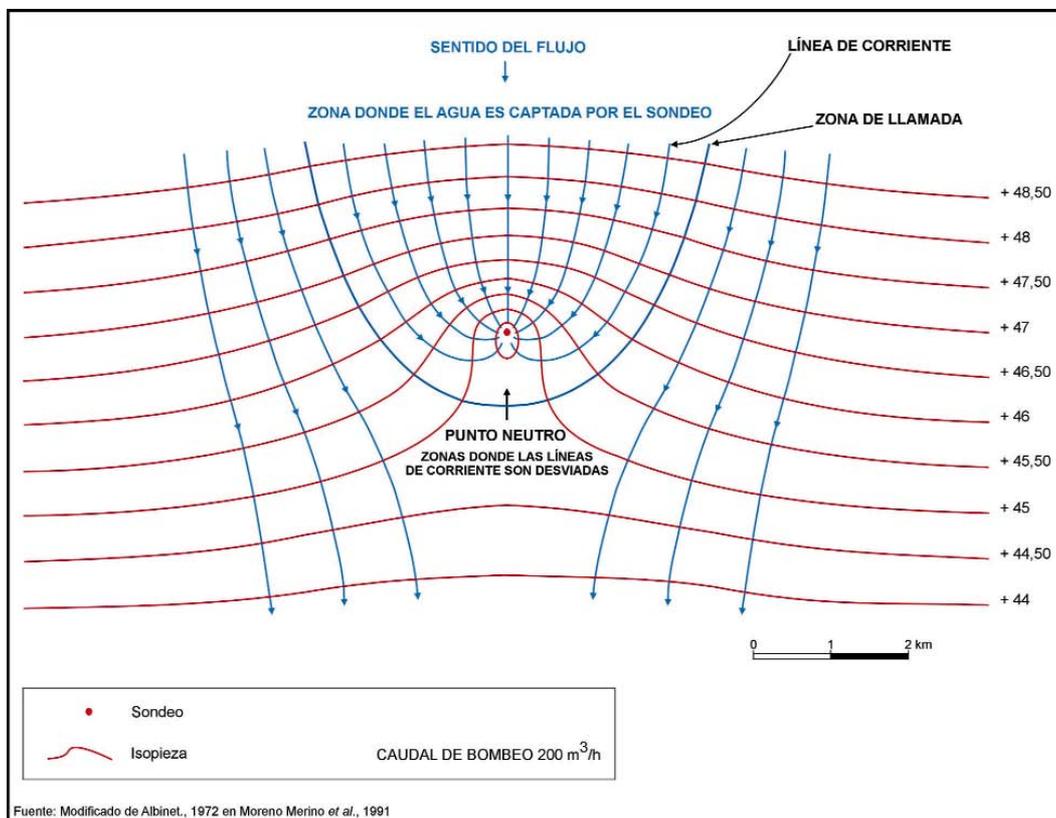


Figura 34: Determinación de la zona de llamada de una captación.

y en consecuencia:

$$t = \frac{m_e \cdot b}{I} \ln \frac{L^2}{(L^2 - l^2)} \text{ para } L^2 = \frac{Q}{\pi \cdot I}$$

$$t = \frac{m_e \cdot b}{I} \ln \frac{Q}{Q - l^2 \cdot \pi \cdot I} \rightarrow l = \sqrt{\frac{Q}{\pi \cdot I} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-t \cdot I}{b \cdot m_e}\right)\right)^*}$$

El nomograma de la figura 35 muestra los valores para l y A en función de Q y b en un acuífero libre con un tiempo de transferencia de 10 años, una porosidad eficaz de 935 y una infiltración de $1 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{año}$, los cálculos se han realizado a partir de la ecuación anterior (*).

Se podrían obtener otros nomogramas variando los parámetros que se han fijado para obtener éste, por ejemplo el tiempo de transferencia, la porosidad eficaz, etc.

6.3.16. Nomógrafo de Pettyjon

Se va a explicar su principio de utilización a partir de un ejemplo (Lallemand-Barrès y Roux, 1989).

Sea un acuífero con las siguientes características:

- Espesor $b = 33,52 \text{ m}$
- Porosidad $m_e = 0,35$

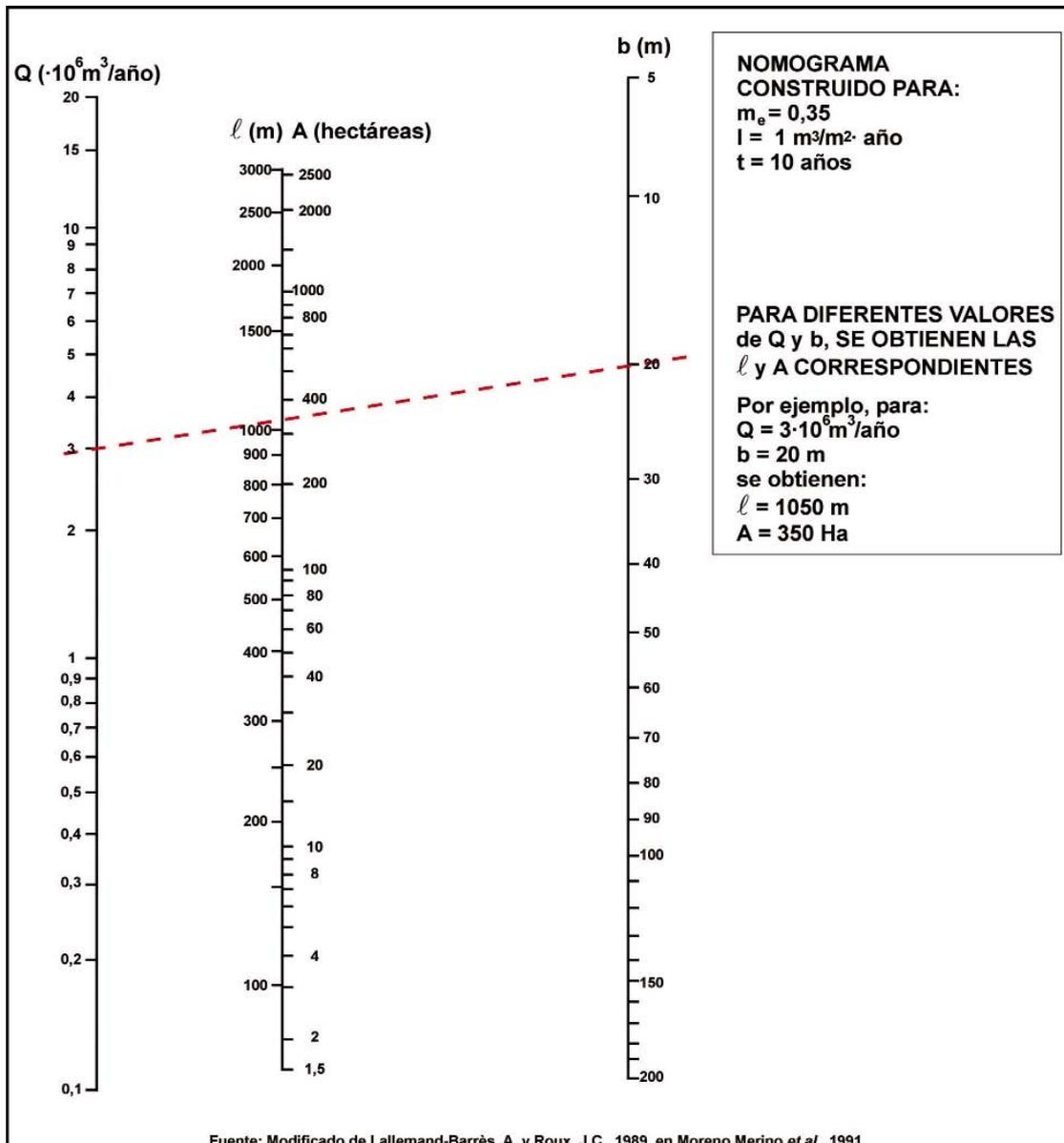


Figura 35: Ejemplo de aplicación de los nomogramas de Van Waegening y Van Duijvenboden.

- Velocidad $V_e = 0,5$ m/día
- Coeficiente de dispersión longitudinal $DX = 9,75$ m²/día
- Coeficiente de dispersión transversal $DY = 1,95$ m²/día
- Dispersividad $X_D = 19,5$ m (DX/V)
- Factor de retardo $R_d = 1$
- Caudal de inyección $Q = 795,2$ m³/día

Se desea encontrar la distancia x a la cual una concentración $C_0 = 50$ mg/L aparece al cabo de un tiempo de 5 años, $t = 1.825$ días. El contaminante se inyecta con una concentración de 150 mg/L con un caudal de 800 m³/día .

Los pasos a seguir son los siguientes (ver figura 36):

- a) Sobre la gráfica C se sitúa la concentración C_0 que se espera que aparezca (50 mg/L), es el punto A.

b) $Q_D = me \cdot b \cdot \sqrt{DX \cdot DY} = 51,15$ m³/día

$\frac{Q \cdot C_0}{Q_D} = 2.346$ mg/L que es el punto B.

- c) Se unen los puntos A y B prolongando la línea hasta el nomógrafo, punto C.

d) $t_B = \frac{R_d \cdot DX}{V_e^2} = 39$

El valor de la curva $\frac{t}{t_B} = 46,79$

Se interpola dicha curva obteniéndose el punto D donde la corte una línea paralela al eje $\frac{x}{X_D}$ que pase por C

- e) Trazando una paralela al eje $\frac{t}{t_B}$ que pase por D se obtiene E.

Se obtiene así la distancia a la cual aparecerá dentro de 5 años una concentración de 50 mg/L del contaminante. Esta distancia ha de ser medida en la línea central de la pluma de contaminación.

$E = 45 \quad E = \frac{X}{X_D} \rightarrow X = 19,5 \cdot 45 = 877,5$ m

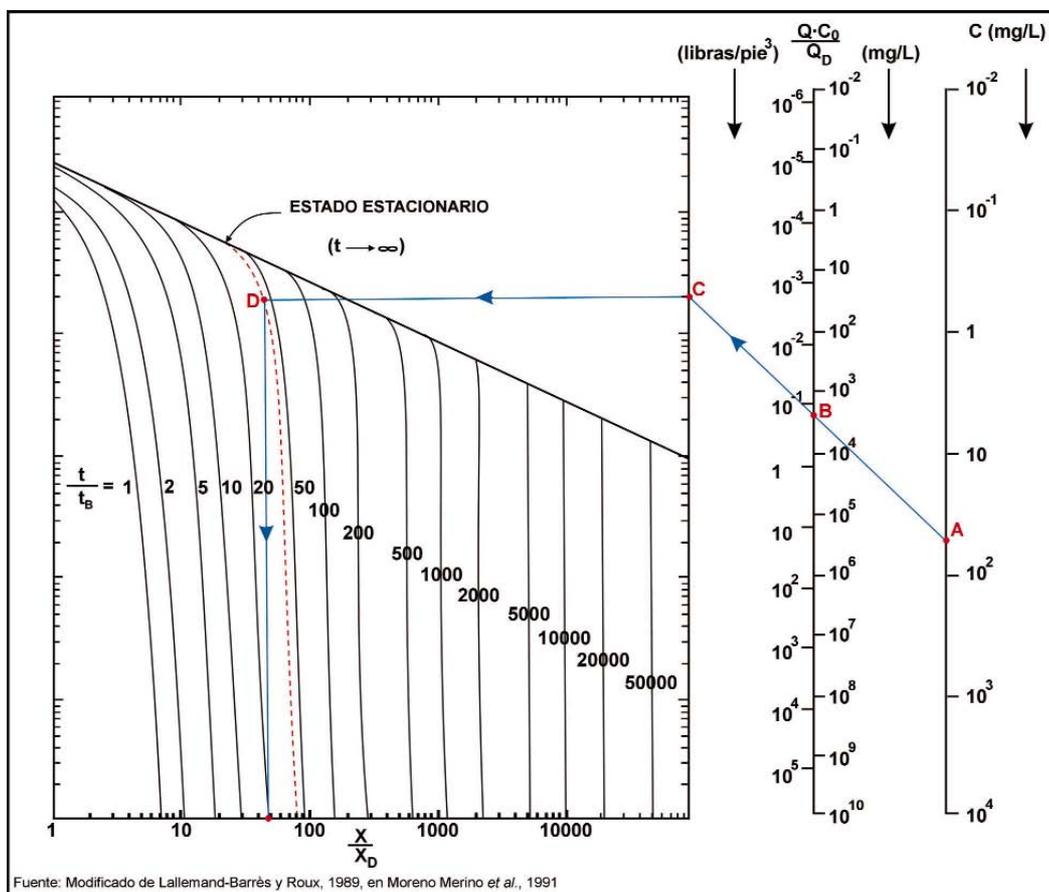


Figura 36: Nomograma de Pettyjon para la determinación de la concentración en la línea central de la pluma de contaminación.

6.3.17. Método de Horsley

Este método (Horsley, 1983) define la zona de protección en 3 fases: En la primera obtiene la distancia; aguas abajo del flujo, en la que termina la zona de llamada (y por lo tanto las líneas de corriente ya no se dirigirán hacia la captación).

Para ello representa en una gráfica (Figura 37), la variación del nivel piezométrico antes de comenzar el bombeo (curva A) al alejarse de la explotación y el cono de bombeo que se produce por efecto de las extracciones (curva B).

El punto de inflexión en la curva, suma de ambas, indica la distancia a la divisoria del flujo aguas abajo.

En la segunda fase delimita la extensión del perímetro aguas arriba. Para ello calcula qué proporción existe entre la profundidad del sondeo y el espesor saturado del acuífero, aplicando la misma propor-

ción (Figura 38), a la distancia existente hasta la divisoria hidrogeológica aguas arriba de la captación.

En la tercera fase calcula el área que necesita para proporcionar el caudal extraído por el sondeo, en función de la recarga existente.

Emplea:

$$A = \frac{Q}{N}$$

Donde:

A = Área de alimentación (m²)

Q = Caudal anual medio de explotación (m³/año)

N = Recarga anual media a largo plazo (m/año)

Esta área, junto con la distancia aguas arriba y aguas abajo, permite delimitar el perímetro de protección resultante.

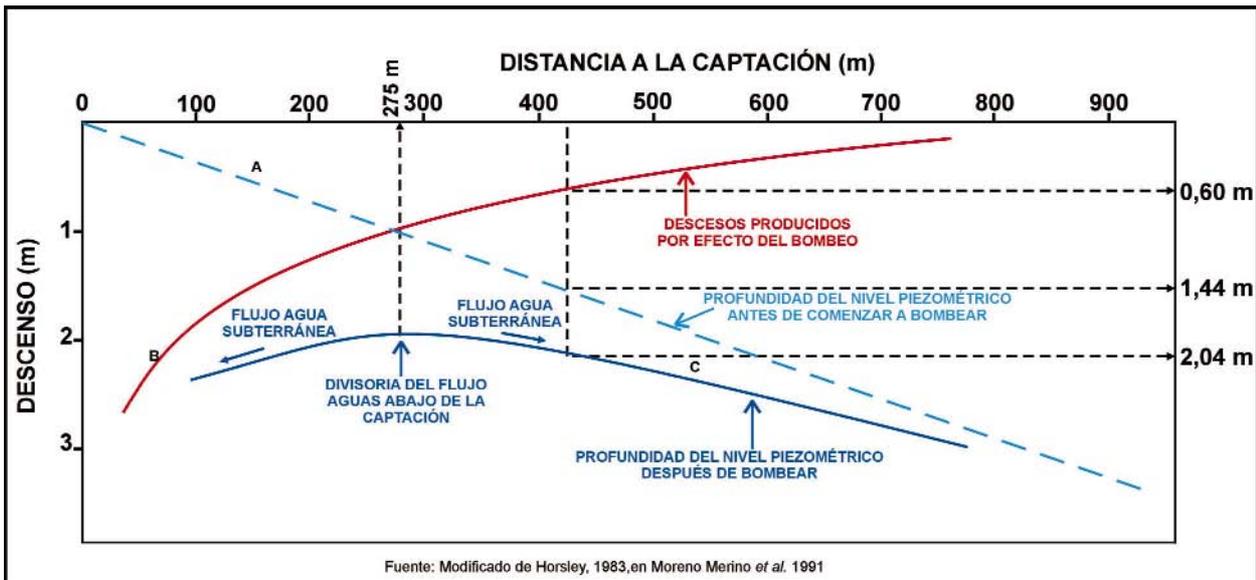


Figura 37: Aplicación del método de Horsley.

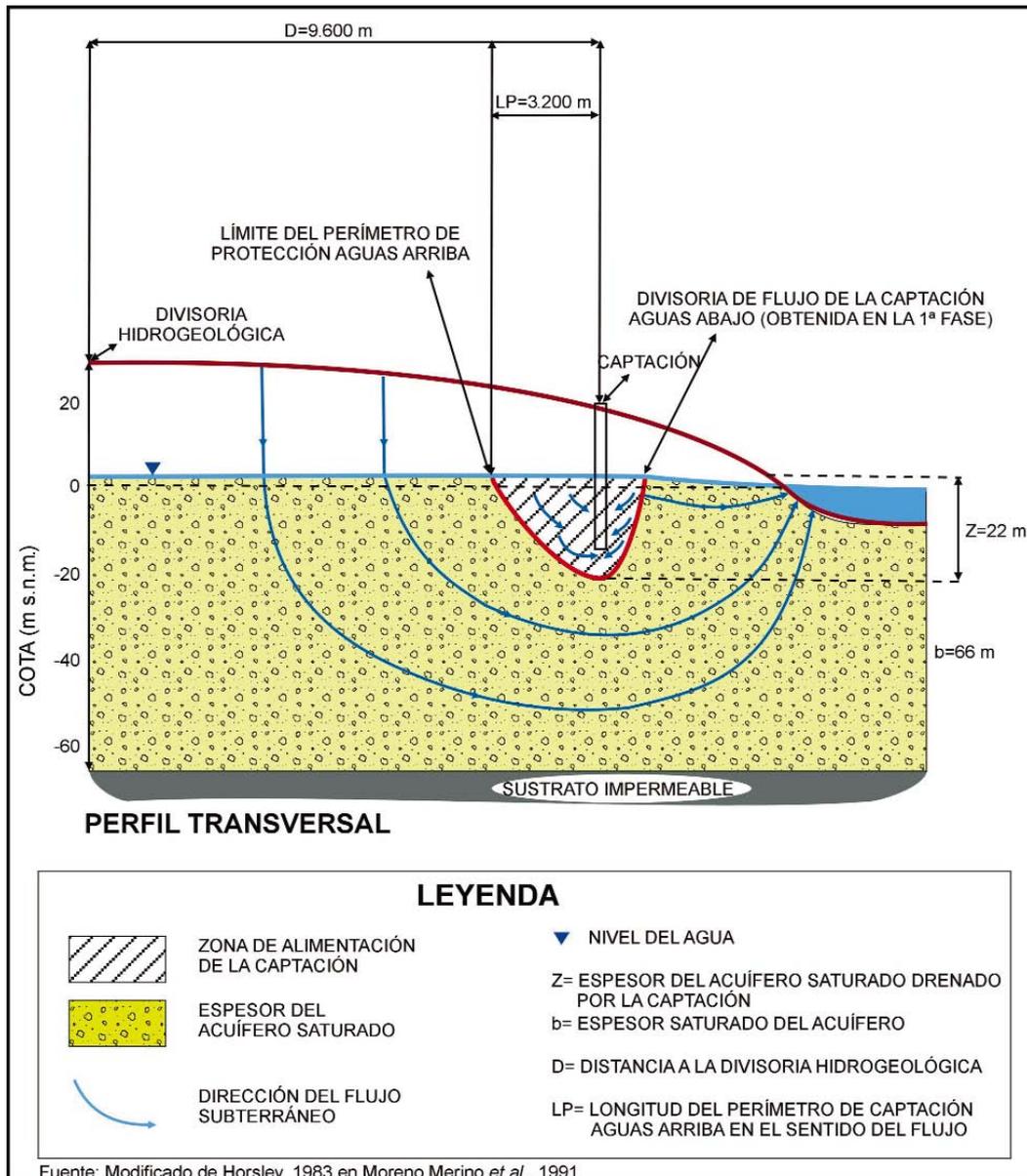


Figura 38: Aplicación del método de Horsley.

6.4. Comparación de los perímetros de protección de la calidad obtenidos aplicando diferentes métodos

Para evaluar la exactitud obtenida al emplear diversos métodos, cuyas principales características se sintetizan en la tabla 42, al delimitar las zonas de los perímetros de protección de la calidad de las captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín, en el acuífero del Terciario detrítico, cuyo desarrollo y resultados se detallaron en el apartado 6.3., se compararán los resultados obtenidos en cada método con los proporcionados por la simulación efectuada mediante un modelo matemático.

Al aplicar métodos hidrogeológicos como único criterio de delimitación se obtiene un perímetro único,

que corresponde a todo el área de alimentación posible de la captación, bidimensionalmente, lo que da lugar a perímetros innecesariamente extensos, no siendo posible subdividirlos en zonas en las que aplicar diferentes grados de restricciones.

La utilización de modelos matemáticos (modelos numéricos), cuando se dispone de información adecuada para su ejecución y calibrado, permite considerar flujo tridimensional, distribución espacial de los parámetros hidráulicos, heterogeneidades del acuífero, influencia de ríos o drenes y efecto de los bombeos, entre otros factores, por lo que proporcionan resultados que se ajustan más a la realidad que los obtenidos al aplicar otros métodos. Así en los métodos analíticos es necesario efectuar una gran simplificación de las características hidrogeológicas

Tabla 42: Principales características de los métodos empleados para delimitar los perímetros de protección de la calidad en las captaciones de abastecimiento urbano en medios con porosidad intergranular.

Nombre del método	Tipo de acuífero	Limitaciones	Datos necesarios								Otros datos	
			i	K	b	m _e	S	N	T	V _e		
Métodos hidrogeológicos.	P K F	Proporciona un área única para el perímetro de protección. Esta no depende del tiempo de tránsito.										Límites acuífero captado. Cartografía hidrogeológica del acuífero. Isopiezas y dirección del flujo. Relación río acuífero.
Análisis del sistema de flujo combinado con el cálculo del tiempo de tránsito.	P	Flujo bidimensional. Flujo ambiental despreciable. Pozo con alta capacidad de bombeo.		i	K		m _e				V _e	Isopiezas y dirección de flujo. Divisorias hidrogeológicas.
Radio Fijo calculado. Ecuación Volumétrica.	P	Flujo bidimensional. Flujo ambiental despreciable. Pozo con alta capacidad de bombeo.	Q			b	m _e					
Radio Fijo calculado. Método de la recarga.	P	Flujo bidimensional. Flujo ambiental despreciable. Pozo con alta capacidad de bombeo. Proporciona un área única. Solo válida para valores de tiempo muy grandes.	Q									
Radio Fijo calculado. Función del descenso.	p	Flujo bidimensional. Flujo ambiental despreciable.	Q					S		T		
Método de Wyssling.	P	Acuífero homogéneo en las proximidades de la captación. Gradiente regional uniforme.		i	K	b	m _e				V _e	Isopiezas y dirección de flujo.
Análisis del sistema de flujo combinado con la ecuación de flujo uniforme	p	Proporciona un área única para el perímetro de protección. Esta no depende del tiempo de tránsito. Flujo bidimensional. No considera el tiempo de tránsito.	Q	i	K	b						Isopiezas y dirección de flujo. Divisoria hidrogeológica.
Método de Jacobs y Bear	P	Acuífero homogéneo en las proximidades de la captación. Gradiente regional uniforme.	Q	i		b	m _e			T		Isopiezas y dirección de flujo.
Solución analítica simple para la aproximación a isocronas que definen zonas de transporte	p	Acuífero homogéneo en las proximidades de la captación.	Q	i	K	b	m _e					Isopiezas y dirección de flujo.
Método de Krijgsman y Lobo Ferreira	P	Aplicable con valores de $x < 18$ aguas arriba y $x > -3,5$ y $m_e > 0.1$ (10%) aguas abajo (1).	Q	i	K	b	m _e					Isopiezas y dirección de flujo.
Método de Rehse para el calculo del poder depurador de los materiales	P	Proporciona un área única para el perímetro de protección. Esta no depende del tiempo de tránsito.		i	K		m _e				V _e	Descripción litológica y longitud de recorrido de los diferentes materiales en la zona no saturada y en la zona saturada
Modelos matemáticos: Visual MODFLOW y Visual MODPATH	P	Considera la componente de advección del transporte de solutos pero no considera la difusión ni la dispersión.	Límites hidrogeológicos del área a modelar. Condiciones de contorno (Recarga, celdas de nivel constante, características ríos y drenes). Capas (geometría y tipo de acuífero). Valores de piezometría. Valores de parámetros hidráulicos en cada celda (K_x, K_y, K_z, S, m_e) caudal y régimen de bombeo en cada captación.									

LEYENDA:

Tipo de acuífero:

P: Porosidad intergranular o asimilable
K: Kárstico
F: Fisurado.

Datos necesarios:

Q: Caudal bombeado
i: Gradiente hidráulico
K: Conductividad hidráulica
b: Espesor saturado
m_e: Porosidad eficaz

S: Coeficiente de almacenamiento
N: Recarga
T: Transmisividad
V_e: Velocidad eficaz

Metodología	Definición del área de protección
Análisis hidrogeológico del acuífero captado.	Área de alimentación de la captación.
Delimita el área de alimentación mediante el análisis de isopiezas y divisorias hidrogeológicas. Se obtiene la distancia aguas arriba para diferentes tiempos de tránsito a medir como un radio dentro del área de alimentación.	Radio que define la zona del área de alimentación correspondiente a diferentes tiempos de tránsito.
Delimita el área de cilindro de acuífero necesario para proporcionar el caudal bombeado considerando que procede del agua almacenada, definida por el volumen del cilindro y la porosidad eficaz, considerando la recarga despreciable.	Radio de un cilindro para que cualquier partícula dentro de él tarde un tiempo de tránsito fijado en alcanzar la captación, efectuándose para diferentes tiempos de tránsito.
Delimita el área necesaria para proporcionar el caudal bombeado para valores de tiempo muy grandes considerando que el agua procede exclusivamente de entradas al acuífero debidas a ecarga.	Radio del cilindro que define el perímetro de protección para valores de tiempo muy grandes.
Delimita la zona en la que se produce un descenso determinado del nivel piezométrico con el audal bombeado empleando la ecuación de Theis para régimen transitorio.	Radio a la captación para el cual se produce un descenso determinado del nivel piezométrico para diferentes valores de tiempo.
Calcula la zona de llamada de la captación (hay descenso piezométrico y el flujo se dirige a la captación) y define posteriormente la distancia en la dirección de flujo correspondiente al tiempo de tránsito deseado.	Ancho del frente de llamada. Radio de llamada. Ancho del frente de llamada a la altura de la captación. Distancia aguas abajo y aguas arriba del flujo para diferentes tiempos de tránsito.
Delimita la divisoria hidrogeológica mediante el análisis de las isopiezas y líneas de flujo. Emplea a ecuación de flujo uniforme para definir el ancho del área de alimentación en la divisoria hidrogeológica y su distancia aguas abajo.	Área de alimentación de la captación indicando su ancho a la altura de la divisoria hidrogeológica y su distancia aguas abajo.
e calcula mediante una fórmula un "tiempo reducido", buscándose en la colección de curvas de tiempo definidas por los autores sus puntos de corte con los ejes de ordenadas y se transforma mediante ecuaciones esa distancia gráfica a distancia en metros.	Distancia aguas arriba, distancia aguas abajo, distancia lateral a ambos lados para cada tiempo de tránsito.
cuación que define el tiempo de tránsito necesario para que una partícula se mueva en la dirección del flujo desde un punto a una distancia conocida de la captación aguas arriba o aguas abajo hasta alcanzarla.	Distancia aguas arriba y distancia aguas abajo para tiempos de tránsito determinados mediante el método de tanteo empleando una ecuación.
cuaciones obtenidas mediante una solución empírica que minimiza las diferencias entre la fórmula de Bear y Jacob y los resultados obtenidos con el programa Visual Modflow para un tiempo de tránsito de 50 días.	Distancia de una elipse aguas arriba, aguas abajo, perpendicular a la dirección de flujo y forma final redondeada de la elipse.
Método empírico que cuantifica el poder depurador de los materiales en la zona no saturada y aturada ante efluentes contaminantes (sin especificar), que pudieran atravesarla, obteniendo los valores requeridos de tablas.	Depuración en la zona no saturada y distancia que como mínimo es necesario recorrer en la zona saturada para alcanzar una depuración total.
Modflow es un modelo tridimensional en diferencias finitas que resuelve las ecuaciones que definen el flujo considerando valores de las propiedades del acuífero específicas en cada celda, y proporciona el potencial hidráulico del agua en las mismas para régimen permanente y transitorio. Modpath usa los resultados de flujo de Modflow y calcula el recorrido de partículas considerando la componente de advección en el transporte de solutos.	Delimita con precisión el área correspondiente al perímetro de protección para diferentes tiempos de tránsito en planta y perfil para diferentes hipótesis de bombeos.

(1) Limitaciones al método de Krijgsman y Lobo Ferreira:

$$x = 2 \cdot K \cdot i \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot b \cdot t}{Q \cdot m_e}}$$

del acuífero, y de las condiciones de explotación, siendo necesario introducir condiciones muy estrictas (pozos totalmente penetrantes, acuíferos de extensión infinita...) que pueden alejarse sensiblemente de la realidad, como ha sido indicado en apartados precedentes.

Estas ventajas han hecho que los modelos matemáticos sean cada vez más utilizados como método estándar para definir los perímetros de protección.

En este trabajo la comparación se realiza tomando como referencia los resultados de las simulaciones efectuadas para delimitar los perímetros de protección de la calidad, de las captaciones de abastecimiento de Villacastín, en el acuífero del Terciario detrítico, detalladas en el apartado 6.3.11, empleando los programas Visual MODFLOW y Visual MODPATH (Waterloo Hydrogeologic, 1995).

El conocer la exactitud es importante para poder preseleccionar los métodos más adecuados a las condiciones de las captaciones analizadas, especialmente cuando no sea posible emplear en modelo matemático, que será la opción preferente.

La comparación de los resultados de los diferentes métodos se realiza empleando como elemento aglutinador el tiempo de tránsito, al ser el criterio más utilizado para delimitar perímetros de protección en materiales con porosidad intergranular o asimilables en su funcionamiento a los mismos. Ésta se efectúa de modo independiente para los tiempos de tránsito de 1 día, 50 días, 4 años y 25 años, habitualmente empleados para definir las zonas en que se subdividen los perímetros cuando se emplea este criterio.

En el análisis correspondiente a cada tiempo de tránsito se incluyen también los resultados obtenidos aplicando métodos que emplean otros criterios alternativos, como el poder autodepurador del terreno o hidrogeológicos.

La inclusión de métodos que no emplean el tiempo de tránsito como criterio, ni este influye al obtener las distancias que definen las zonas, y proporcionan un perímetro único, sin subdividir, se realiza para disponer de una referencia de la extensión de los perímetros aplicando otros criterios alternativos, que pueden también emplearse para delimitar la zona en que imponer restricciones a diferentes actividades, si bien lógicamente esa área será siempre la misma en esos métodos que no dependen del tiempo.

Cabe recordar además que en España debe seleccionarse en cada estudio cuantas zonas hay que establecer en el perímetro de protección, con qué criterio, y en su caso, que tiempos de tránsito emplear

(como se analizó en capítulos precedentes), por lo que un planteamiento amplio de la comparación entre métodos, como el efectuado, proporciona una herramienta útil para su aplicación según los criterios de los técnicos encargados de delimitar los perímetros de protección de cada captación.

6.4.1. Zona de los perímetros de protección de la calidad definida empleando un tiempo de tránsito de 1 día y la obtenida mediante otros criterios alternativos

En la tabla 43 se analiza la idoneidad de aplicar cada uno de los doce métodos contemplados, para delimitar la zona del perímetro de protección de la calidad, de las captaciones de abastecimiento de Villacastín, en el acuífero del Terciario detrítico, para un tiempo de tránsito de 1 día o mediante criterios alternativos y los resultados obtenidos.

No ha sido posible efectuar una simulación empleando el modelo matemático para el tiempo de tránsito de 1 día, por las dimensiones de las celdas, que han sido adoptadas en función de la información disponible, por lo que este no puede emplearse como referencia para evaluar la precisión de los mismos.

Los métodos que no emplean el tiempo para definir los perímetros de protección, empleando otros criterios, como el poder autodepurador del terreno o los criterios hidrogeológicos, definen un área única en el ámbito del perímetro, de dimensiones a priori demasiado grandes para ser asumibles en esta zona, en la que se aplicarán las restricciones más intensas a las diversas actividades reguladas. Es el caso de los métodos hidrogeológicos (Apartado 6.3.1) y del Análisis del sistema de flujo combinado con la ecuación de flujo uniforme (Apartado 6.3.6).

El método de Rehse también proporciona un área única, con un radio del orden de 100 m (107 y 99 m) en dos captaciones, estimando que no es necesaria en un sondeo, proporcionando por último un valor del área a proteger con un radio de 29 m en el sondeo "Camino del Valle"(172020005).

No es adecuado el método de la recarga del radio fijo calculado (Apartado 6.3.3) al proporcionar un solo valor, aplicable para tiempos grandes, no siendo lógico considerar como tal 1 día.

La función del descenso del radio fijo calculado (Apartado 6.3.4) proporciona para 1 día una zona con radio de 367 m.

Los 6 métodos restantes (análisis del sistema de flujo

Tabla 43: Comparación de los perímetros de protección de la calidad obtenidos empleando diferentes métodos para un tiempo de tránsito de 1 día o mediante criterios alternativos en las captaciones de abastecimiento de Villacastín en el acuífero del Terciario detrítico.

MÉTODOS EMPLEADOS	Sondeo San Bartolomé (172020004) Distancias en metros	Sondeo Puente Alzado (172020001) Distancias en metros	Sondeo Cañada del Abad (172020003) Distancias en metros	Sondeo Camino del Valle (172020005) Distancias en metros
Método hidrogeológico (*).	Delimita una única zona que es independiente del tiempo. (ver figura 29).			
Análisis del sistema de flujo combinado con el cálculo del tiempo de tránsito.	d = 4	d = 2	d = 4	d = 7
Radio fijo calculado. Ecuación volumétrica.	R = 16	R = 16	R = 17	R = 17
Radio fijo calculado: Método de la recarga (*).	No emplea el tiempo. Da un único valor para tiempos grandes Ej: 4 años. (Ver figura 30 a).			
Radio fijo calculado: Función del descenso.	R = 367	R = 367	R = 367	R = 367
Método de Wyssling.	So= 23 (Aguas arriba) Su=19 (Aguas abajo)	So= 22 (Aguas arriba) Su=21 (Aguas abajo)	So= 24 (Aguas arriba) Su=21 (Aguas abajo)	So= 26 (Aguas arriba) Su=19 (Aguas abajo)
Análisis del sistema de flujo combinado con la ecuación de flujo uniforme (*).	Delimita una única zona que es independiente del tiempo. (ver figura 29).			
Método de Jacobs y Bear.	Xa-b= 11 (Aguas arriba) Xa-c= 7 (Aguas abajo) Xa-d= 8 (Lateral) Xa-e= 8 (Lateral)	Xa-b= 4 (Aguas arriba) Xa-c= 2 (Aguas abajo) Xa-d= 3 (Lateral) Xa-e= 3 (Lateral)	Xa-b= 10 (Aguas arriba) Xa-c= 6 (Aguas abajo) Xa-d= 7 (Lateral) Xa-e= 7 (Lateral)	Xa-b= 21 (Aguas arriba) Xa-c= 12 (Aguas abajo) Xa-d= 15 (Lateral) Xa-e= 15 (Lateral)
Método de solución analítica simple para la aproximación a isocronas que definen zonas de transporte.	$X_L = 20$	$X_L = 20$	$X_L = 20$	$X_L = 20$
Método de Krijgsman y Lobo Ferreira.	L = 19	L = 18	L = 20	L = 22
Método de Rehse para el cálculo del poder depurador de los materiales (*).	No depende del tiempo L = 107	No depende del tiempo L = 99	No depende del tiempo L = 0	No depende del tiempo L = 29
Modelos matemáticos. Programas Visual MODFLOW y Visual MODPATH.	No se ha efectuado simulación para 1 día al ser demasiado pequeño para el tamaño del mallado establecido..			

(*) Estos métodos no emplean como criterio el tiempo de tránsito. Se incluyen como referencia de la extensión del perímetro de protección obtenido empleando estos criterios. Proporcionan una única zona independiente del tiempo.

combinado con el cálculo de tiempo de tránsito, ecuación volumétrica del radio fijo calculado, método de Wyssling, método de Jacobs y Bear, método de solución analítica simple para aproximación a isocronas que definen zonas de transporte y método de Krijgsman y Lobo Ferreira) proporcionan valores del mismo orden de magnitud, como se muestra en la tabla 43.

El análisis del sistema de flujo combinado con el cálculo del tiempo de tránsito de 1 día da los valores más pequeños (2 a 7 m aguas arriba en el sentido de flujo), el método de Jacobs y Bear de 4 a 21 m aguas arriba en el sentido del flujo, el radio fijo calculado (ecuación volumétrica) de 16 a 17 m de radio con centro en la captación, el método de solución analítica simple para la aproximación isocronas que definen zonas de transporte da distancias de 20 m aguas arriba y el método de Wyssling de 22 a 26 m aguas arriba, indicándose en la tabla 43 y en la descripción de cada método la magnitud y orientación del resto de las distancias.

6.4.2. Zona de los perímetros de protección de la calidad definida empleando un tiempo de tránsito de 50 días y la obtenida mediante otros criterios alternativos

Se han comparado los resultados obtenidos al aplicar 10 métodos con los que proporciona la simulación del modelo matemático antes indicado, efectuada empleando los programas Visual MODFLOW y Visual MODPATH, tomada como referencia.

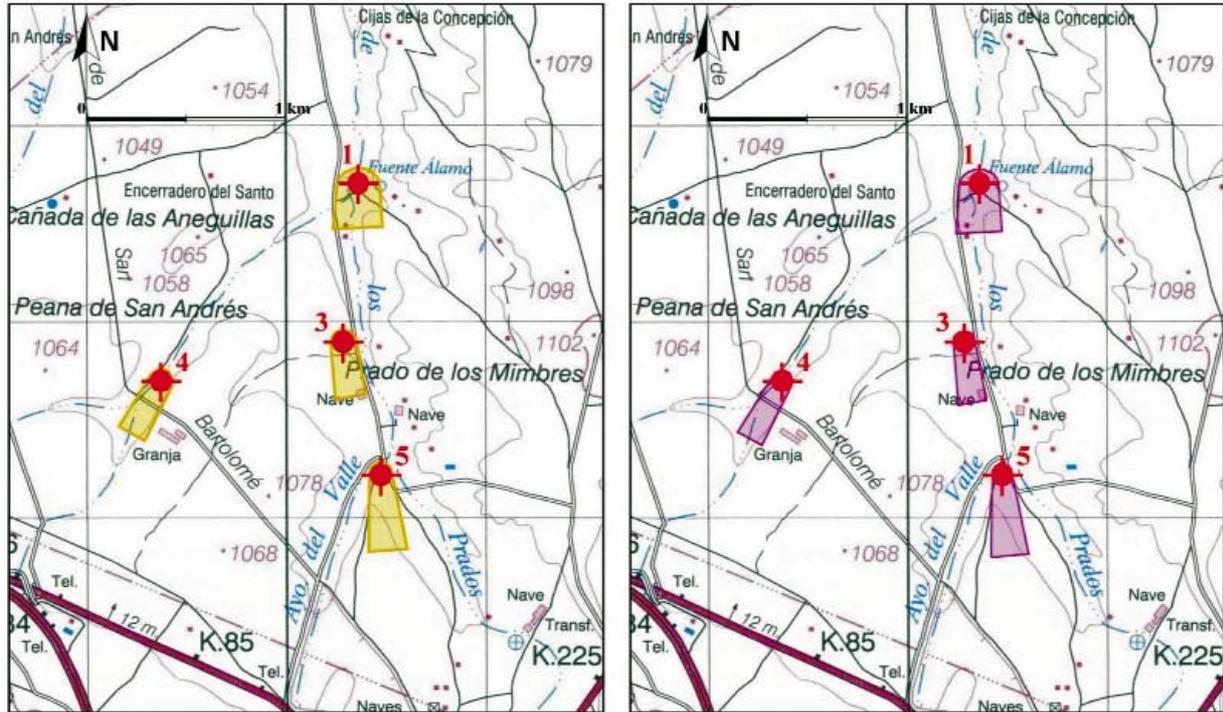
Métodos que emplean el tiempo de tránsito como criterio o en los que el tiempo influye en las distancias obtenidas

De los 7 métodos que emplean el tiempo los resultados más precisos se obtienen con los métodos de Wyssling (Apartado 6.3.5), Jacobs y Bear (Apartado 6.3.7) y método de solución analítica simple para la aproximación a isocronas que definen zonas de transporte (Apartado 6.3.8).

Con esos tres métodos los resultados son prácticamente idénticos (Figuras 39 a y 39 b) por lo que respecta a la longitud aguas arriba y aguas abajo de esta zona del perímetro y suelen indicar un área a proteger algo inferior a la requerida según el modelo matemático. Existe en todos ellos cierto grado de subjetividad, al tener que definir una única dirección principal del flujo en base a los valores de piezometría conocidos, lo que puede producir un error al orientar el perímetro en algunas captaciones, como puede ocurrir en el sondeo 5.

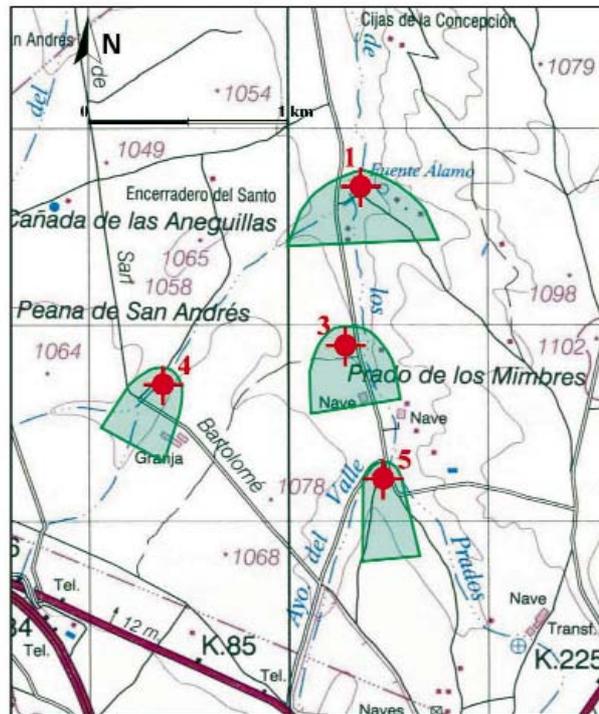
A pesar de esta similitud respecto a la longitud, el método de Wyssling delimita, no obstante, perímetros de protección más anchos, siendo el método que proporciona resultados más parecidos a los obtenidos con el modelo en los sondeos 1 y 4, si bien infraprotege en los sondeos 3 y 5 (Figura 39 b).

El método de Krijgsman y Lobo Ferreira (Apartado 6.3.9) proporciona perímetros de protección similares a los anteriores (Figura 39 c), pero aumenta las áreas sobreprotegidas aguas abajo. Esto se debe



Solución Analítica Simple.

Método de Jacobs y Bear.



Método de Wyssling.

Fuente: Martínez Navarrete, 2002

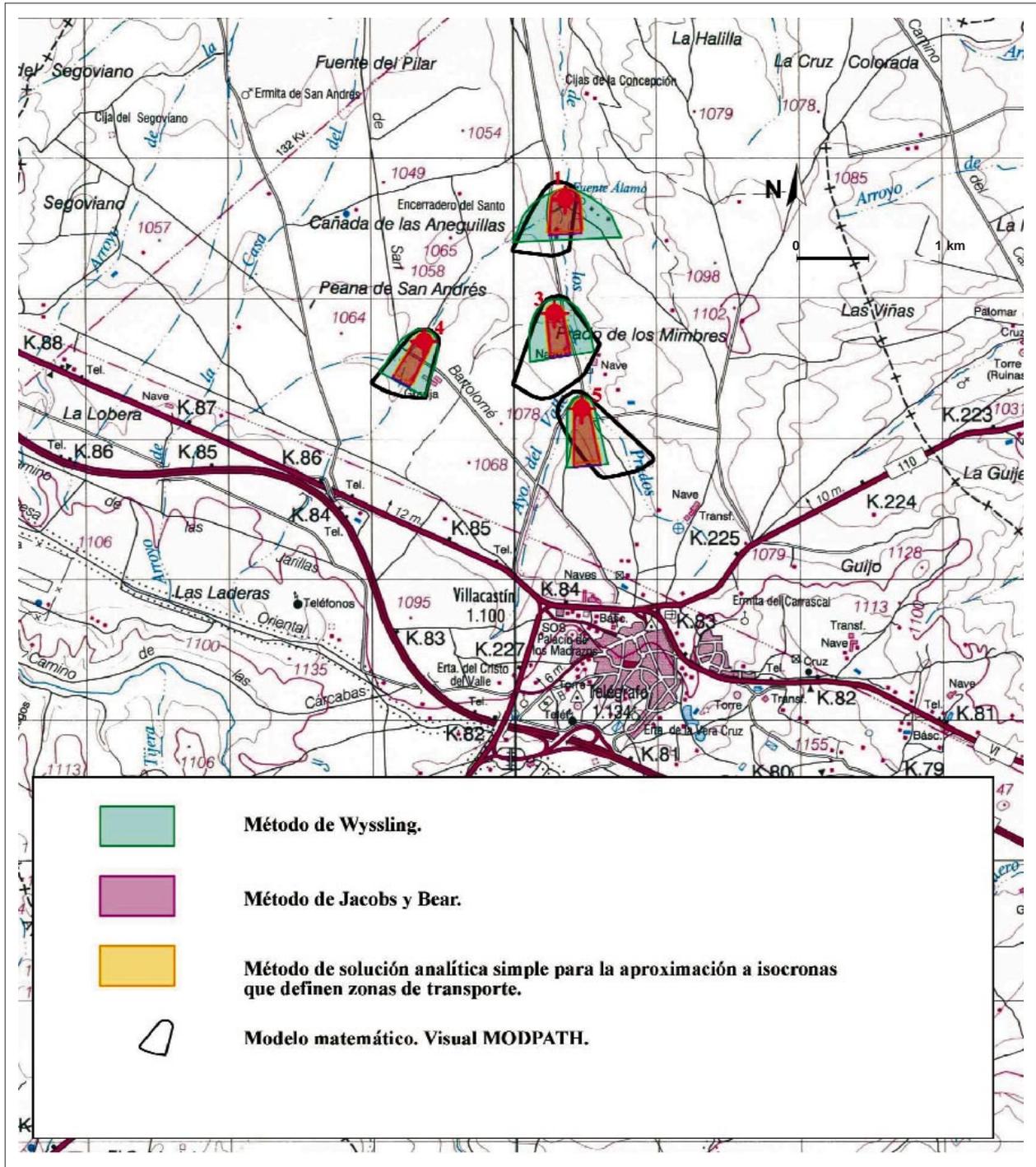
Figura 39 a: Cartografía de los perímetros de protección obtenidos empleando diferentes métodos para un tiempo de tránsito de 50 días.

probablemente a que debido a los valores de porosidad eficaz del acuífero en esta área no se está dentro del rango de aplicabilidad del método aguas abajo como se indicó en el apartado 6.3.9.

El método del radio fijo calculado: ecuación volumétrica (Apartado 6.3.3) proporciona zonas del períme-

tro muy pequeñas que infraprotegen aguas arriba en el sentido de flujo (Figura 39 d).

En el extremo opuesto el radio fijo calculado, función del descenso, considerando un descenso de 15 mm (Apartado 6.3.4) proporciona una zona extraordinariamente grande (Figura 39 d) que incluye toda



Fuente: Modificado de Martínez Navarrete, 2002

Figura 39 b: Superposición cartográfica de los perímetros de protección obtenidos empleando diferentes métodos para un tiempo de tránsito de 50 días.

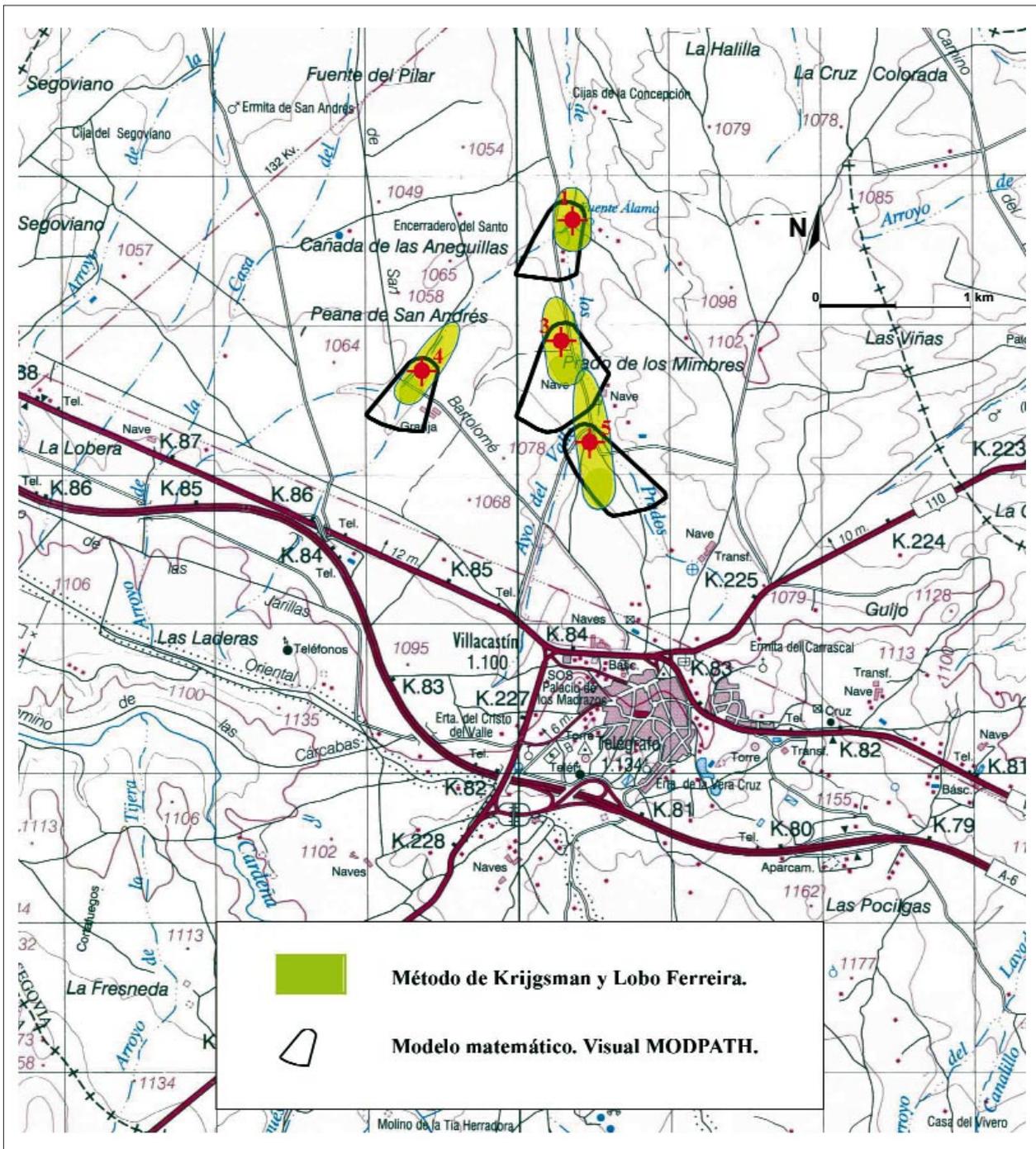
la zona que indica el modelo pero sobreprotege amplísimas zonas alrededor de las captaciones.

Por último el método de análisis del sistema de flujo combinado con el cálculo del tiempo de tránsito (Figura 39 d) proporciona unas zonas más próximas a los resultados requeridos pero menos precisas que las obtenidas mediante los métodos de Wyssling, Jacobs y Bear, solución analítica simple y método de Krijgsman y Lobo Ferreira.

Métodos en los que el tiempo no influye al definir el perímetro de protección

Definen una única zona independiente del tiempo incluyéndose en este análisis para poder comparar con el tamaño del perímetro de protección obtenido empleando métodos que utilizan otros criterios.

El método de Rehse (Apartado 6.3.10) proporciona perímetros muy pequeños e incluso la no necesidad



Fuente: Modificado de Martínez Navarrete, 2002

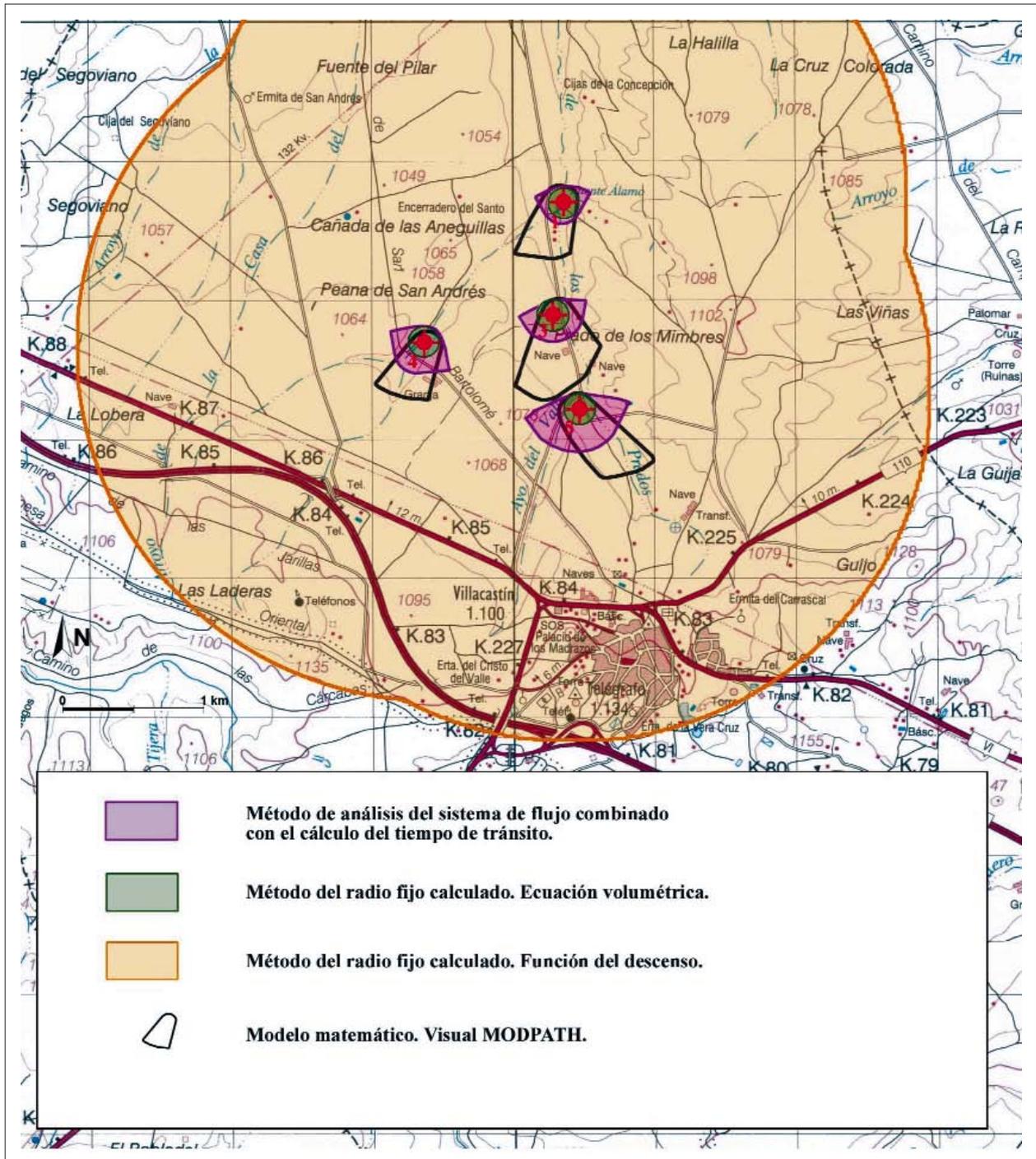
Figura 39 c: Superposición cartográfica de los perímetros de protección obtenidos empleando diferentes métodos para un tiempo de tránsito de 50 días.

de establecerlos como ocurre en el sondeo 3 (Figura 40).

Los perímetros de protección definidos empleando métodos hidrogeológicos exclusivamente cubren toda el área a proteger pero delimitan una zona única de gran tamaño, muy superior a la definida

por el modelo para el tiempo de tránsito de 50 días con el que se comparan (Figura 40).

La aplicación del análisis del sistema de flujo combinado con la ecuación de flujo uniforme si bien no disminuye la longitud de la zona a proteger si reduce sustancialmente su anchura (y por tanto disminu-

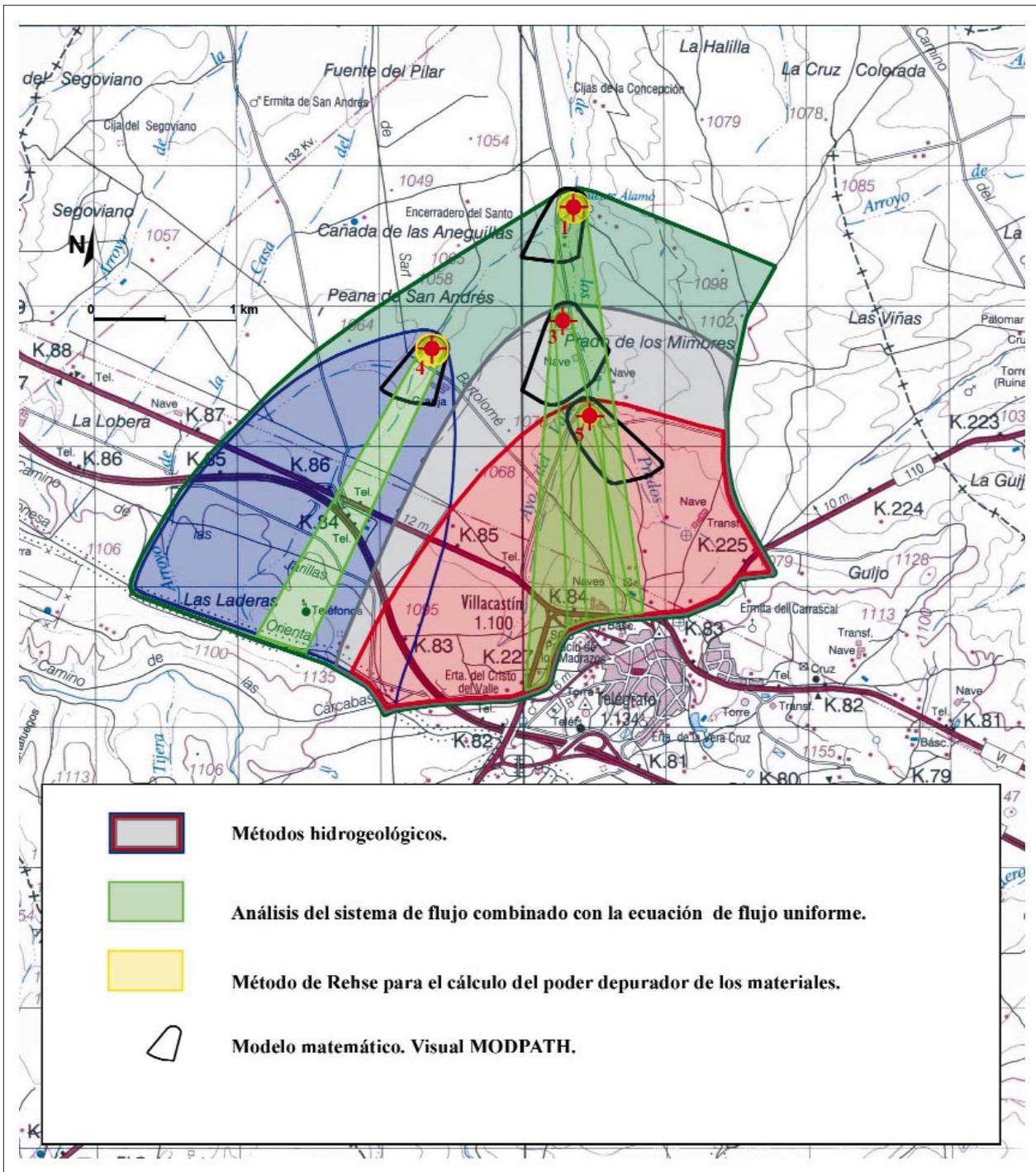


Fuente: Modificado de Martínez Navarrete, 2002

Figura 39 d: Superposición cartográfica de los perímetros de protección obtenidos empleando diferentes métodos para un tiempo de tránsito de 50 días.

ye significativamente su extensión), pero infraprotege en parte, principalmente en los sondeos 1, 3 y 5, por lo que dejaría fuera del perímetro de protección zonas en las cuales una eventual contaminación

afectaría a la captación de abastecimiento en un tiempo inferior a 50 días según los resultados del modelo (Figura 40).



Fuente: Modificado de Martínez Navarrete, 2002

Figura 40: Superposición cartográfica de los perímetros de protección obtenidos empleando diferentes métodos, en los que el tiempo de tránsito no influye al definir el perímetro, con los resultados del modelo matemático para un tiempo de 50 días.

6.4.3. Zona de los perímetros de protección de la calidad definida empleando un tiempo de tránsito de 4 años y la obtenida mediante otros criterios alternativos

Se han comparado los resultados obtenidos al aplicar 10 métodos con los que proporciona la simulación del modelo matemático efectuada empleando los programas Visual MODFLOW y Visual MODPATH, tomada como referencia.

Métodos que emplean el tiempo de tránsito como criterio o en los que el tiempo influye en las distancias obtenidas

Los métodos de Wyssling (Apartado 6.3.5), Jacobs y Bear (Apartado 6.3.7), método de solución analítica simple (Apartado 6.3.8) y método de Krijgsman y Lobo Ferreira (Apartado 6.3.9) proporcionan zonas a proteger (Figuras 41 a, 41 b y 41 c) con una longitud aguas arriba mucho mayor de la necesaria. Para este tiempo se obtienen resultados de longitud prácticamente idénticos para el método de Wyssling y el de la solución analítica simple y más largos para los métodos de Krijgsman y Lobo Ferreira así como de Jacobs y Bear. El ancho de la zona a proteger que proporciona el método de Wyssling es mayor que en las otras siendo más preciso, si bien es menor de la obtenida con la simulación matemática efectuada y se produce una zona sobreprotegida en longitud de gran envergadura.

Los métodos de radio fijo calculado, ecuación volumétrica, y Radio fijo calculado, método de la recarga (Apartado 6.3.3) son prácticamente idénticos y proporcionan zonas a proteger definidas por un círculo (Figura 41 c) que abarcan aproximadamente la mitad de la longitud que debería tener aguas arriba y sobreprotegen la captación aguas abajo.

El método de radio fijo calculado: función del descenso proporciona una zona definida por un círculo de tamaño desmesurado (Figura 41 c).

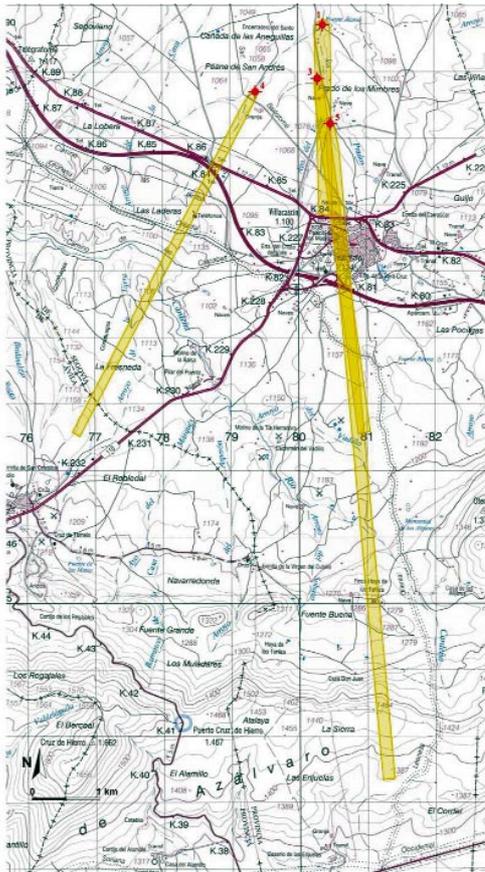
El método de análisis del sistema de flujo combinado con el cálculo del tiempo de tránsito engloba la totalidad del área que proporciona el modelo matemático, si bien las áreas obtenidas son, en este caso, aproximadamente el doble de lo requerido respecto a la longitud, sobreprotegiendo también una zona amplia lateralmente.

Métodos en los que el tiempo no influye al definir el perímetro de protección

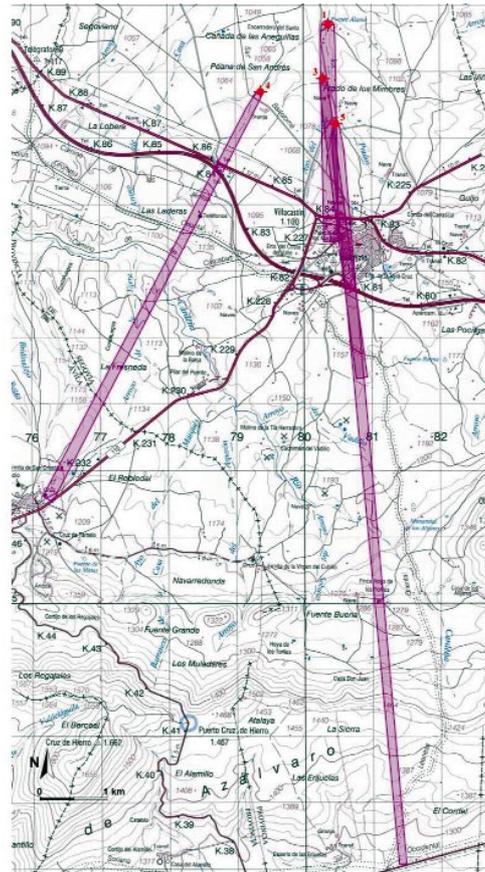
Definen una única zona independiente del tiempo incluyéndose en este análisis para poder comparar con el tamaño del perímetro de protección obtenido empleando métodos que utilizan otros criterios, como ya ha sido indicado anteriormente. Al no depender del tiempo son idénticos a los reseñados para 50 días previamente, pero se comparan con la simulación del modelo para 4 años que es una zona más amplia.

El método de Rehse (Apartado 6.3.10) proporciona zonas excesivamente reducidas (Figura 42). Los perímetros de protección que se definen empleando métodos hidrogeológicos exclusivamente, delimitan áreas (Figura 42) que incluyen en su totalidad las proporcionadas por el modelo matemático, para un tiempo de tránsito de cuatro años, pero de extensión muy superior, ya que considera toda el área de recarga posible, bidimensionalmente.

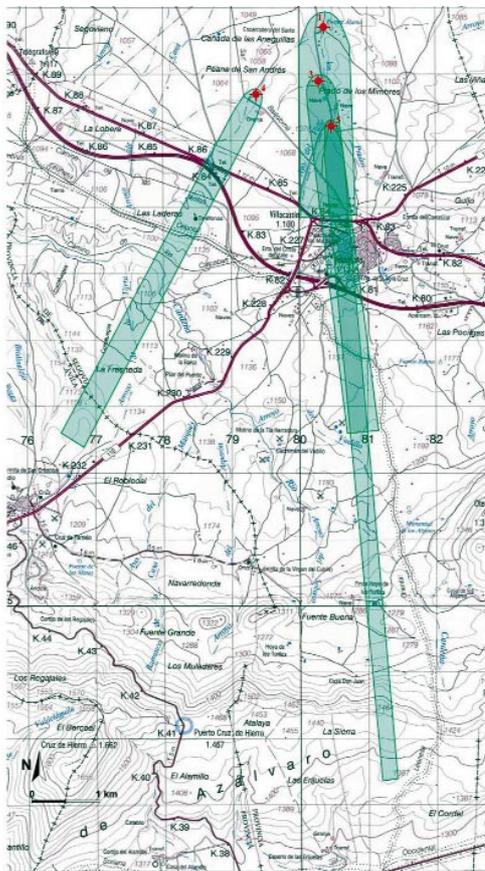
El método de análisis del sistema de flujo combinado con la ecuación de flujo uniforme (Apartado 6.3.6), da una extensión menor a la obtenida con el método hidrogeológico, infraprotege una zona amplia respecto a la salida del modelo matemático (Figura 42). Es decir, no incluye en el perímetro grandes zonas en las cuales, según la simulación efectuada, una eventual actividad contaminante en las mismas alcanzaría la captación de abastecimiento en un tiempo inferior a 4 años. Cabe señalar, no obstante, la gran influencia que supone en este método cualquier posible incertidumbre respecto a la definición de la dirección principal de flujo.



Solución Analítica Simple.



Método de Jacobs y Bear.



Método de Wyssling.

Fuente: Martínez Navarete, 2002

Figura 41 a: Cartografía de los perímetros de protección obtenidos empleando diferentes métodos para un tiempo de tránsito de 4 años.

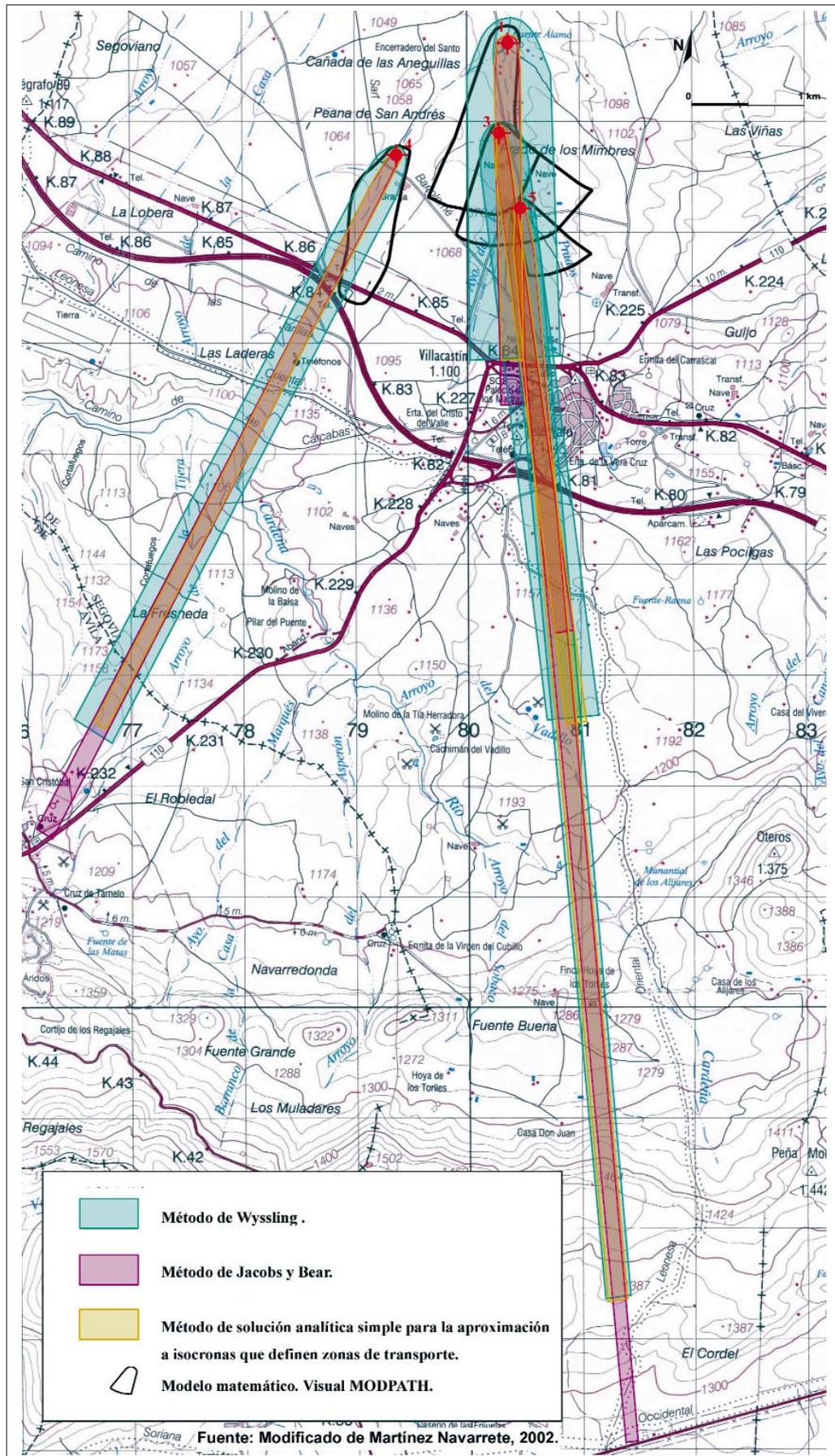
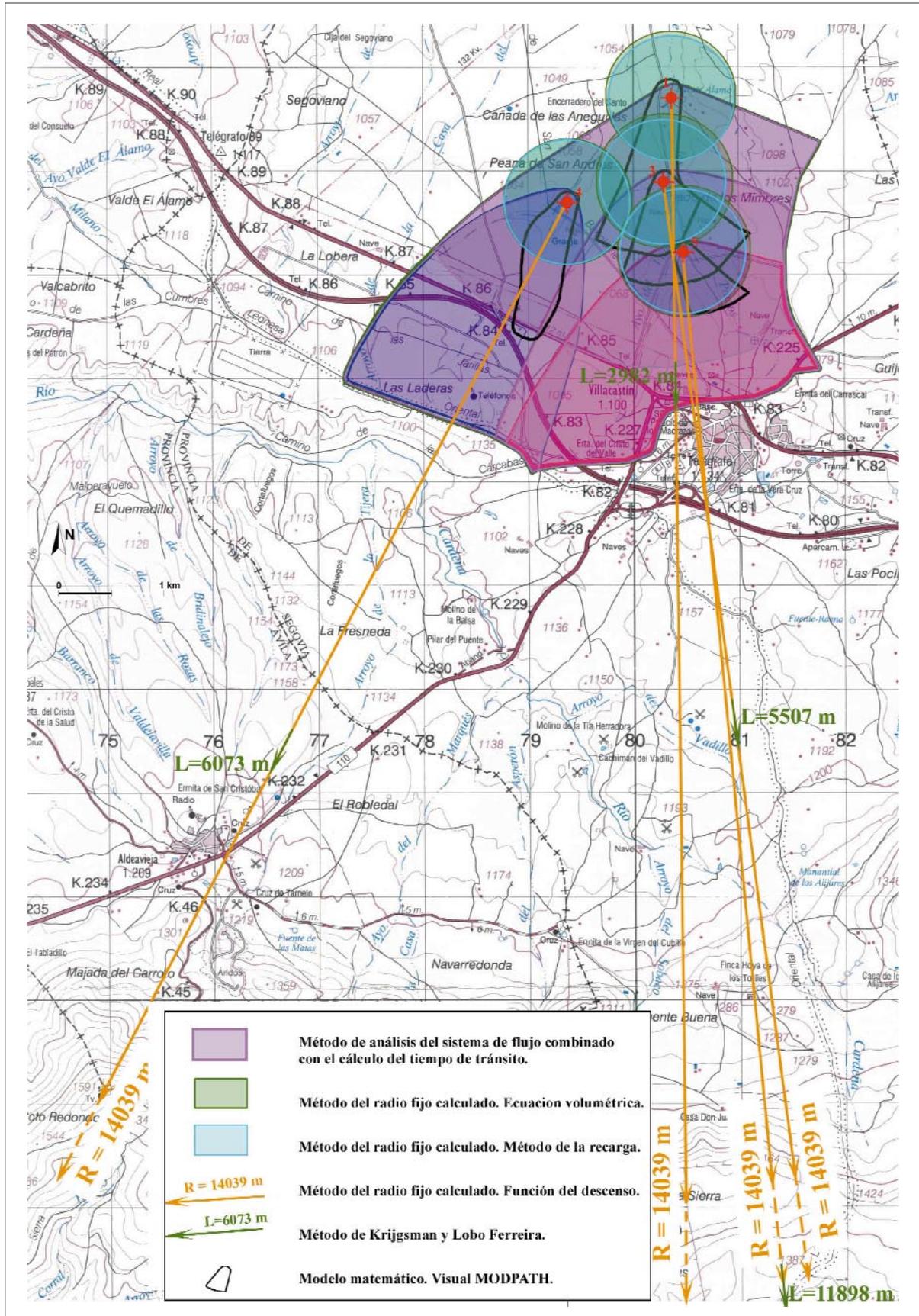
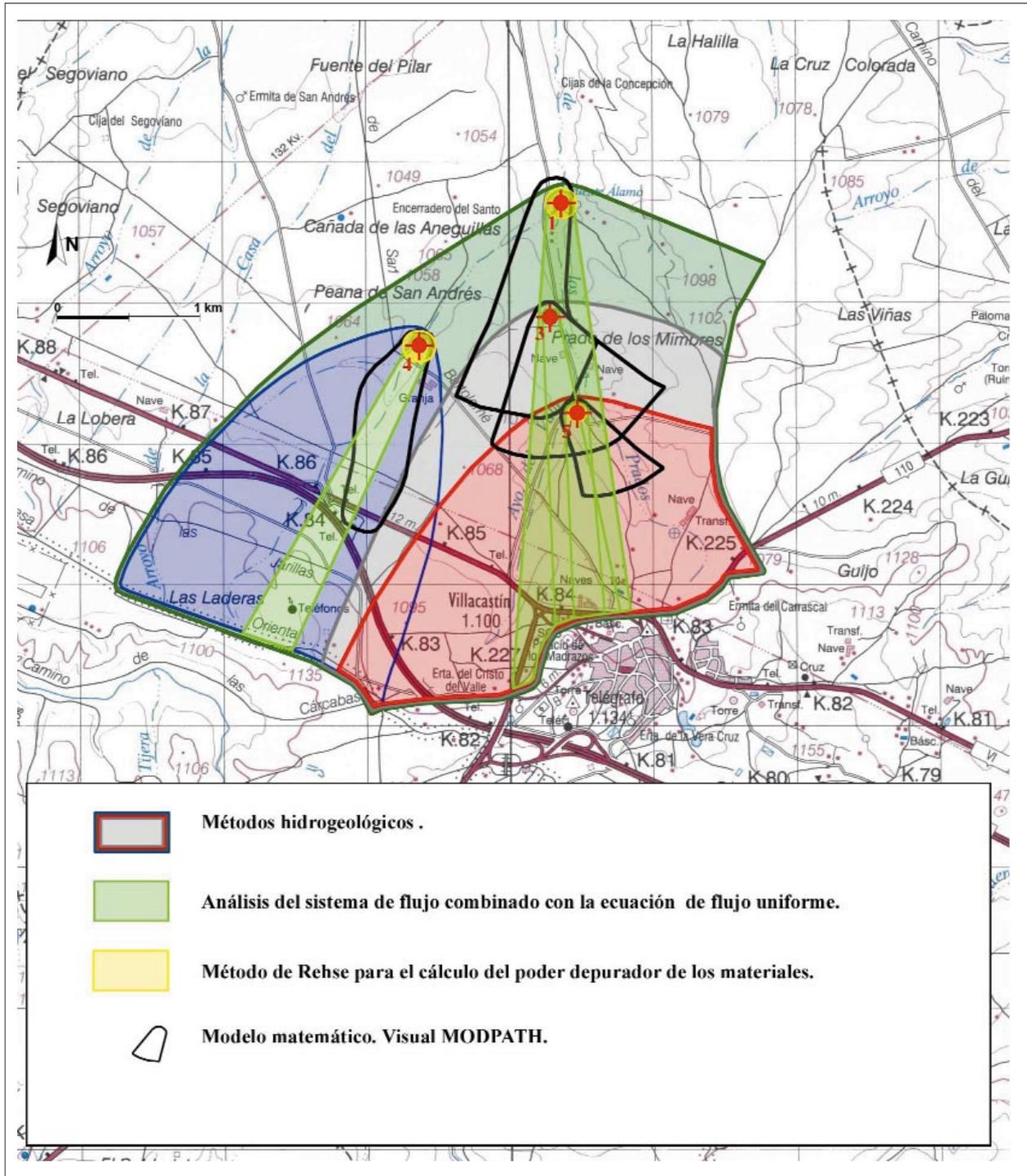


Figura 41 b: Superposición cartográfica de los perímetros de protección obtenidos empleando diferentes métodos para un tiempo de tránsito de 4 años.



Fuente: Modificado de Martínez Navarrete, 2002

Figura 41 c: Superposición cartográfica de los perímetros de protección obtenidos empleando diferentes métodos para un tiempo de tránsito de 4 años.



Fuente: Modificado de Martínez Navarrete, 2002

Figura 42: Superposición cartográfica de los perímetros de protección obtenidos empleando diferentes métodos en los que el tiempo de tránsito no influye al definir el perímetro con los resultados del modelo matemático para un tiempo de 4 años.

6.4.4. Zona de los perímetros de protección de la calidad definida empleando un tiempo de tránsito de 25 años y la obtenida mediante otros criterios alternativos

Se han comparado los resultados obtenidos al aplicar 10 métodos con los que proporciona la simulación del modelo matemático efectuada empleando los programas Visual MODFLOW y Visual MODPATH, tomada como referencia.

Métodos que emplean el tiempo de tránsito como criterio o en los que el tiempo influye en las distancias obtenidas

Para un tiempo de tránsito de 25 años son inasumibles los resultados que proporcionan los métodos de Jacobs y Bear (Apartado 6.3.7), Wyssling (Apartado 6.3.5), Solución analítica simple para la aproximación a isocronas que definen zonas de transporte (Apartado 6.3.8) así como el de Krijgsman y Lobo Ferreira (Apartado 6.3.9) ya que sobreprotegen ampliamente en longitud (Figura 43), y proporcionan áreas muy estrechas, infraprotegiendo paralelamente al flujo.

El radio fijo calculado, función del descenso (Apartado 6.3.4) sobreprotege amplísimas zonas (Figura 43).

El método de radio fijo calculado, método de la recarga (Apartado 6.3.3) tampoco es aplicable pues sobreprotege aguas abajo del flujo principalmente e infraprotege una gran parte de la zona que debería constituir el perímetro (Figura 43).

El método de radio fijo calculado, ecuación volumétrica (Apartado 6.3.3) aunque mejora la precisión respecto al anterior tampoco cubre toda la zona y sobreprotege amplias zonas (Figura 43), especialmente aguas abajo.

El análisis del sistema de flujo combinado con el tiempo de tránsito es para este tiempo idéntico al método hidrogeológico.

Métodos en los que el tiempo no influye al definir el perímetro de protección

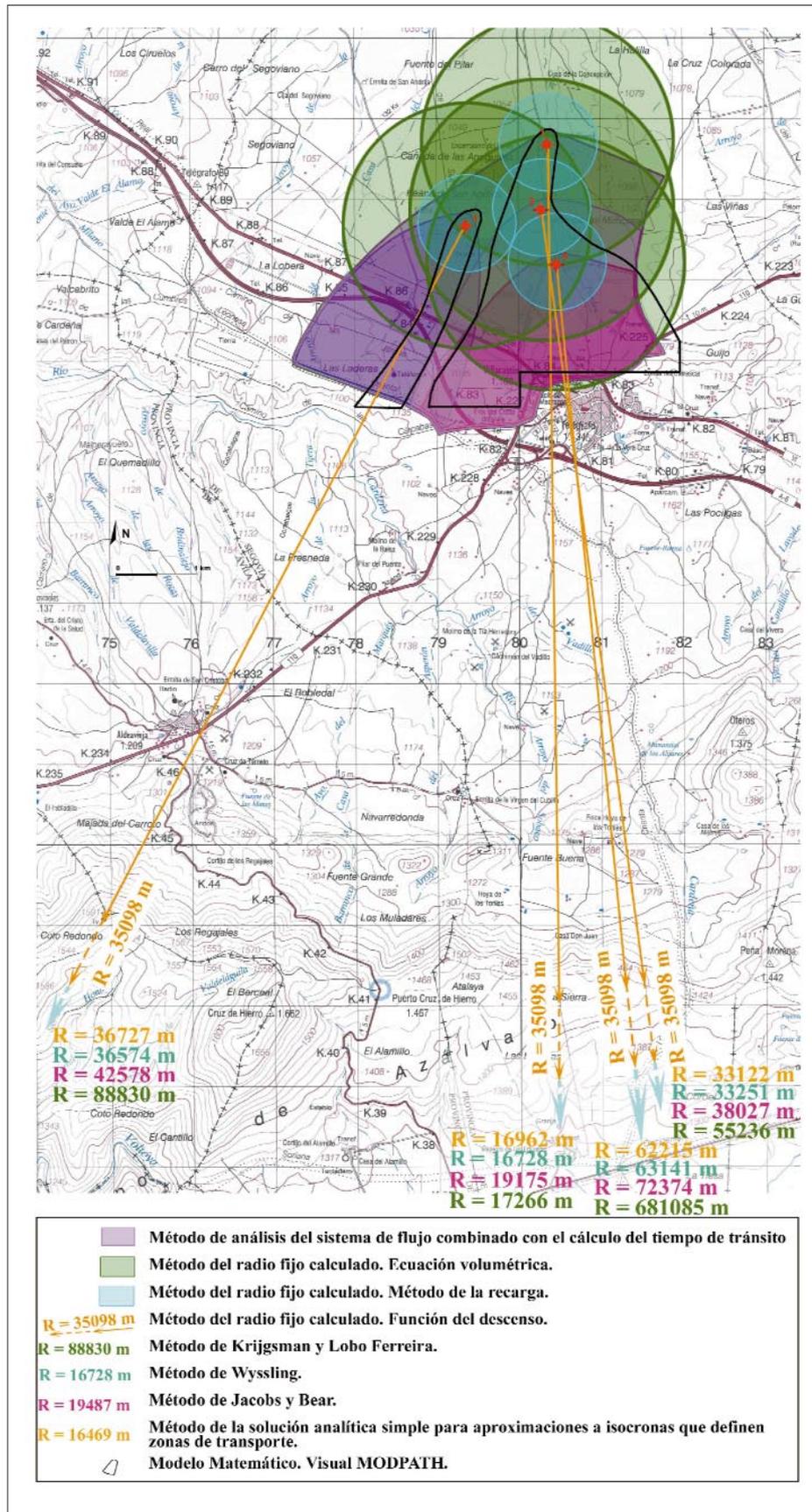
Definen, como se indicó anteriormente, una única zona independiente del tiempo, permitiendo su inclusión en este análisis poder comparar con el tamaño de los perímetros de protección que se obtienen al emplear métodos que utilizan otros criterios.

Al no depender del tiempo son idénticos a los reseñados para 50 días y 4 años previamente, pero se comparan con la simulación del modelo para 25 años que es una zona mucho mayor.

El método de Rehse (Figura 44) proporciona zonas muy reducidas en comparación con la obtenida en el modelo.

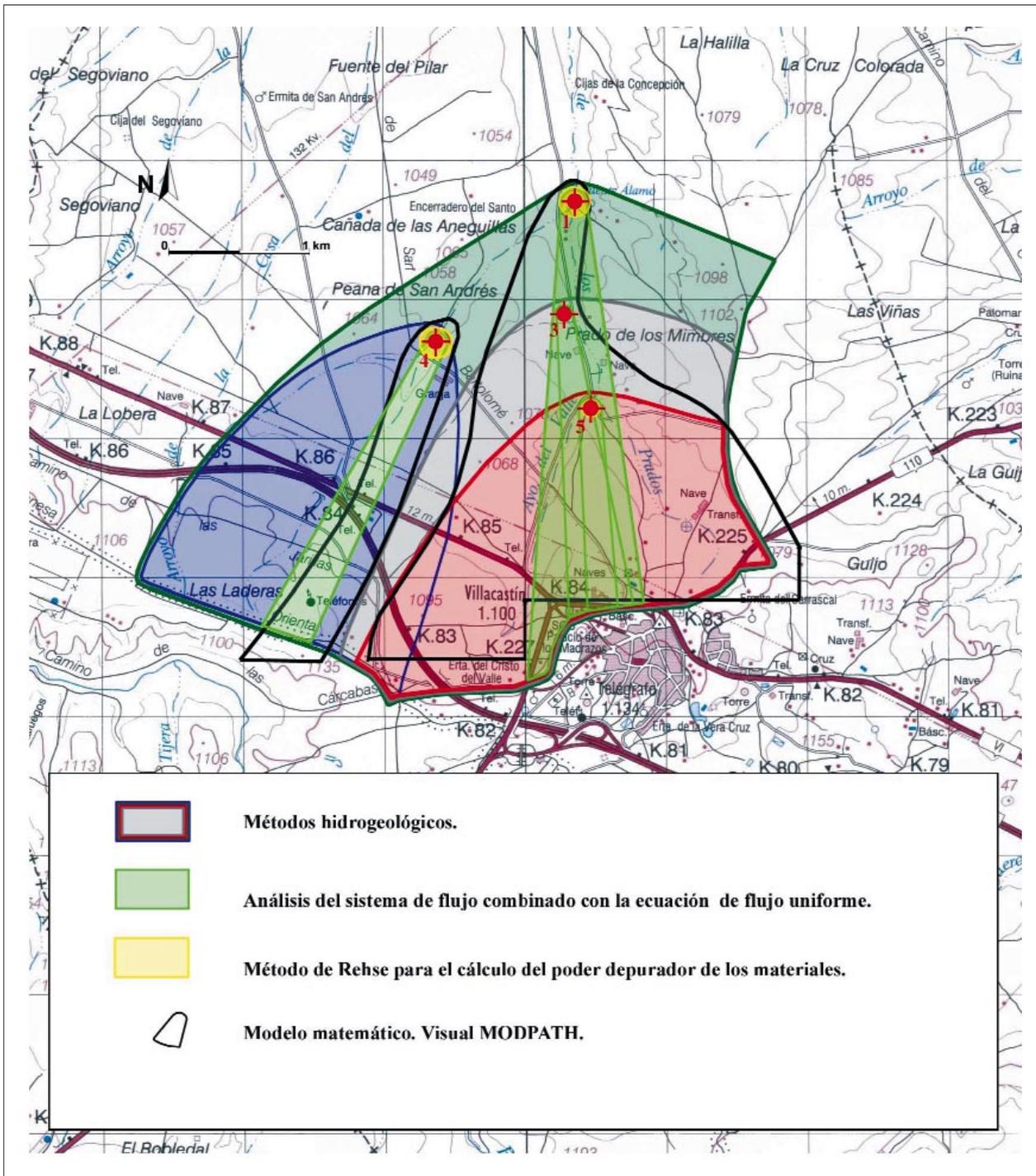
Las áreas delimitadas empleando métodos hidrogeológicos exclusivamente (Figura 44) engloban en su práctica totalidad (no incluyen una zona en el límite sudeste de los perímetros de protección), las proporcionadas por el modelo matemático, para un tiempo de tránsito de 25 años, pero su extensión es más amplia, aunque en este caso la diferencia es, lógicamente, menor a la existente al compararlos con los resultados del modelo para tiempos de tránsito menores.

El método de análisis del sistema de flujo combinado con la ecuación de flujo uniforme (Apartado 6.3.6), proporciona áreas más reducidas a las obtenidas mediante los métodos hidrogeológicos pero que infraprotegen amplias zonas (Figura 44). No incluye así áreas en las que, según la simulación efectuada, una contaminación en las mismas alcanzaría las captaciones en un tiempo inferior a 25 años.



Fuente : Modificado de Martínez Navarrete, 2002

Figura 43: Comparación de los perímetros de protección obtenidos empleando diferentes métodos para un tiempo de tránsito de 25 años.



Fuente: Modificado de Martínez Navarrete, 2002

Figura 44: Comparación de los perímetros de protección obtenidos empleando diferentes métodos, en los que el tiempo no influye al definir el perímetro, con el resultado del modelo matemático para un tiempo de 25 años.

6.5. Propuesta final de perímetros de protección de la calidad

La propuesta final de delimitación de los perímetros de protección de la calidad de los cuatro sondeos de abastecimiento urbano de Villacastín, que captan el acuífero del Terciario detrítico, sondeos San Bartolomé (172020004), Puente Alzado (172020001), Cañada del Abad (172020003) y Camino del Valle (172020005), debe incluir cuantas zonas se propone alrededor de cada captación, con qué criterios se delimitan, y las restricciones a imponer a diversas actividades en las mismas, si bien corresponde a la Junta de Gobierno del Organismo de cuenca su aprobación, artículo 28 del texto refundido de la Ley de Aguas (BOE, 2001 c), como se indicó en el capítulo 3 y el apartado 6.2.

Las conclusiones obtenidas del análisis efectuado de las características hidrogeológicas del acuífero captado, infraestructura del abastecimiento, necesidades de agua para el mismo, focos potenciales de contaminación en el municipio, vulnerabilidad de las diferentes zonas (Apartado 6.1), junto con el análisis de los resultados obtenidos aplicando diferentes métodos para delimitar los perímetros de protección de la calidad (Apartados 6.3 y 6.4), entre otros factores, permiten considerar como más apropiado la propuesta de dividir los perímetros de protección en tres zonas, cuyas principales características son las siguientes:

Zona inmediata o de restricciones absolutas

Esta zona se ha definido en base a un criterio de tiempo de tránsito de 1 día, empleándose para delimitarlas el método de Wyssling.

El objetivo principal de esta zona es proteger la captación y sus instalaciones (la captación propiamente dicha, la caseta del transformador o del motor y depósitos de agua o combustible entre otros) contra vertidos o infiltraciones directas en su superficie, así como impedir el acceso de animales y desaprensivos que pudieran contaminar directamente las captaciones.

Por ello estará cerrada mediante una valla que impida el acceso a personas no autorizadas y convenientemente señalizada su identificación como parte del perímetro de protección así como la prohibición de acceso. Sus dimensiones se muestran en la tabla 44.

Las regulaciones y restricciones que se propone imponer a diversas actividades o instalaciones en esta zona se detallan en la tabla 45. Esta ha sido elaborada en base al análisis de las actividades reguladas en diferentes países (Lallemand-Barrès, Roux, 1989 y 1999; Environment Agency, 1998; Moreno Merino *et al.*, 1991), los contemplados expresamente en la legislación española de aguas, en los artículos 173.5 y 173.6 del R.D.P.H. (BOE, 1986), así como otros trabajos precedentes (Martínez Navarrete y

Tabla 44: Dimensiones de la zona inmediata o de restricciones absolutas para los sondeos de abastecimiento a Villacastín.

CAPTACIÓN DE ABASTECIMIENTO	EJE PRINCIPAL			Longitud transversal a la altura de la captación
	Dirección	S _o : Longitud aguas arriba en la dirección del flujo (m) y orientación	S _u : Longitud aguas abajo en la dirección del flujo (m) y orientación	
Sondeo San Bartolomé (172020004)	N 30° E	23 m - sudoeste	19 m - nordeste	2 segmentos de 19 m perpendiculares al eje principal
Sondeo Puente Alzado (172020001)	N-S	22 m - sur	21 m - norte	2 segmentos de 21 m perpendiculares al eje principal
Sondeo Cañada del Abad (172020003)	N 6° W	24 m - sudeste	21 m - noroeste	2 segmentos de 21 m perpendiculares al eje principal
Sondeo Camino del Valle (172020005)	N 4° W	26 m - sudeste	19 m - noroeste	2 segmentos de 19 m perpendiculares al eje principal

Fuente: Martínez Navarrete, 2002

Fernández Sánchez, 2000; Martínez Navarrete y García García, 2001 b).

Las restricciones indicadas en la tabla 45 para esta zona deben ser trasladadas al planeamiento urbanístico del municipio de Villacastín.

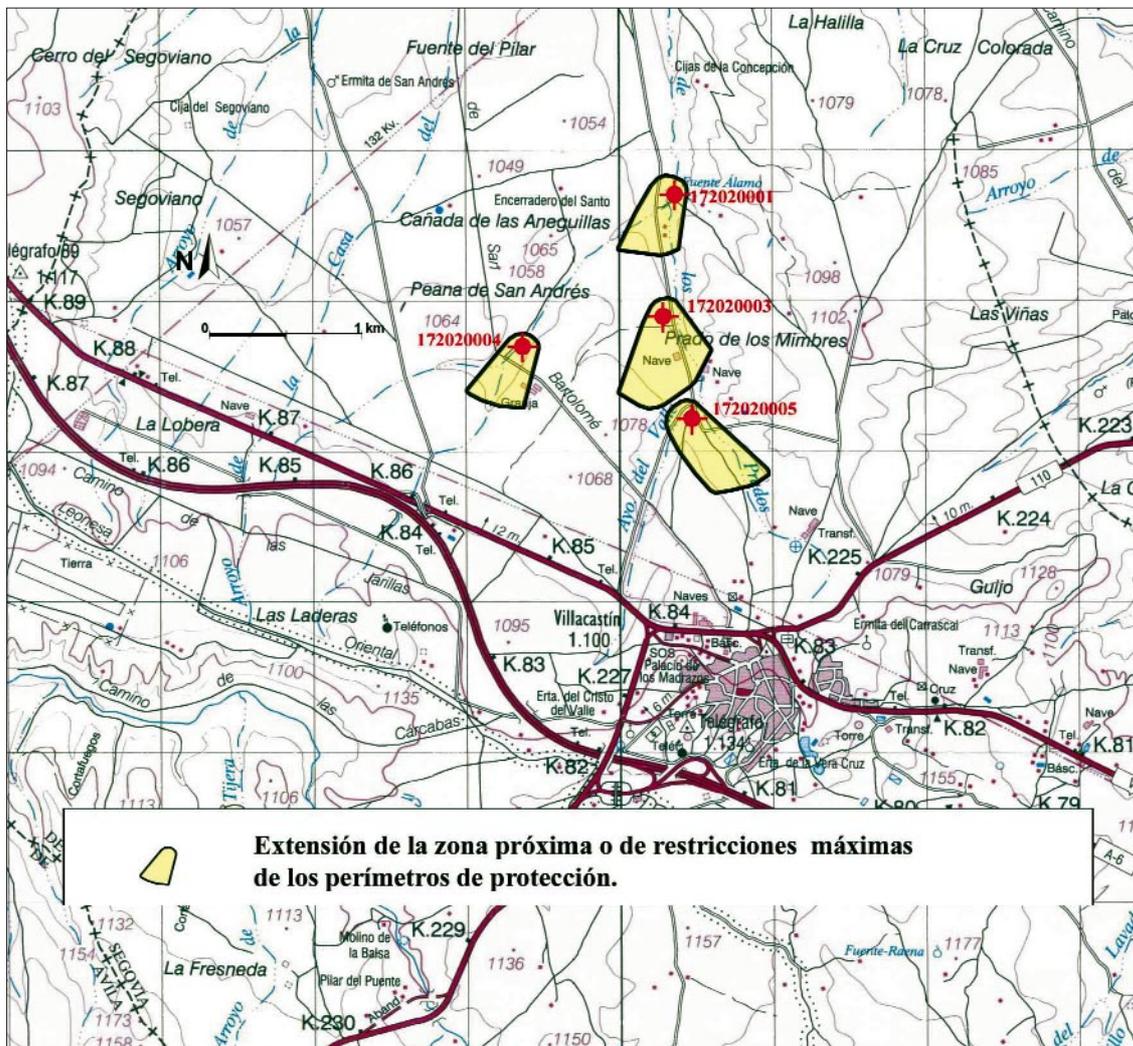
Zona próxima o de restricciones máximas

Su objetivo es proteger frente a la contaminación bacteriológica. Comprende el área en la cual una eventual contaminación en la misma alcanzaría la captación de abastecimiento en un tiempo de tránsito inferior a 50 días. Para delimitarlas se han utilizado los resultados de la simulación efectuada mediante Visual MODFLOW en régimen permanente y la simulación advectiva del transporte con Visual MODPATH, indicándose sus dimensiones en la figura

45, siendo recomendable el establecimiento de una poligonal envolvente que la delimite y que puede incluirse fácilmente en un sistema de información geográfica facilitando así su control administrativo.

El tiempo de tránsito de 50 días es el que se considera necesario para garantizar la degradación de la contaminación bacteriológica (Lallemand-Barrès, Roux, 1989; Moreno Merino, et al., 1991; Käss, 1998) y es utilizado con esta finalidad en la regulación de numerosos países (como ha sido analizado en el capítulo 2), detallándose los factores a considerar en el anexo 2.

En la tabla 45 se detallan las regulaciones y restricciones a imponer a diversas actividades o instalaciones. Estas son las mismas de la zona anterior, si bien aquí se permitiría el acceso peatonal y que la atra-



Fuente: Martínez Navarrete, 2002

Figura 45: Zona próxima o de restricciones máximas de los perímetros de protección, obtenida con la simulación efectuada mediante Visual MODFLOW en régimen permanente y la simulación advectiva del transporte con Visual MODPATH para un tiempo de tránsito de 50 días.

viesen redes de comunicación. Éstas deben ser trasladadas al planeamiento urbanístico del término municipal.

Hay que indicar que en el área que delimita esta zona próxima o de restricciones máximas existen actualmente cultivos de secano (trigo y cebada), así como diversas granjas (las identificadas con los números 6, 7, 8 y 10 en el mapa 2 y tabla 17, en la que se evalúa su potencial contaminante), y otras previstas (números 5 y 11 en las mismas), cuyas actividades quedarían afectadas por la regulación contemplada en el perímetro de protección.

Zona alejada o de restricciones moderadas

Una eventual contaminación en la misma tardaría en alcanzar la captación de abastecimiento un tiempo comprendido entre un mínimo de 50 días y el límite superior de tiempo de tránsito considerado en esta zona, 25 años, al ser su objetivo proteger frente a contaminantes de larga persistencia. Para delimitarlas se ha utilizado los resultados de la simulación efectuada mediante Visual MODFLOW en régimen permanente, y la simulación advectiva del transporte con Visual MODPATH.

La elección de un tiempo de tránsito de 25 años se ha realizado valorando, entre otros aspectos, la problemática del abastecimiento a la localidad. Éste, como ha sido detallado en el capítulo 6, se efectúa exclusivamente en base a la explotación de siete captaciones de agua subterránea ubicadas en el término municipal.

El bombeo de los cuatro sondeos que captan el acuífero detrítico del Terciario y Cuaternario, al norte del casco urbano, supone en torno al 72% del volumen requerido para el abastecimiento, proporcionando los tres pozos en materiales graníticos, al sur del casco urbano, el 28% restante.

Las características de los materiales graníticos hacen muy improbable que pueda incrementarse notablemente esa cantidad, y no existen otros acuíferos en el ámbito del término municipal, es decir, la explotación, con calidad adecuada, de las captaciones en el acuífero detrítico del Terciario y Cuaternario es imprescindible para el abastecimiento a la población.

La dependencia del abastecimiento de la explotación de esos cuatro sondeos y su vulnerabilidad a la contaminación, hace necesario que el límite externo de esta zona, y por lo tanto del perímetro de protección, no existiendo restricciones a partir de él, sea lo suficientemente elevado para garantizar un abastecimiento desde los mismos con calidad adecuada, al

menos durante un periodo de tiempo dilatado, 25 años. Éste permitirá en su caso la búsqueda de fuentes de abastecimiento alternativas a la existente en el término municipal de Villacastín, ya que eventuales contaminantes de larga persistencia no alcanzarían las captaciones hasta transcurrido ese plazo de tiempo.

Sus dimensiones se indican en la figura 46. Como se muestra en dicha figura se ha considerado idóneo agrupar las zonas correspondientes a tres captaciones: Sondeo Puente Alzado (172020001), sondeo Cañada del Abad (172020003) y sondeo Camino del Valle (172020005) al solaparse parcialmente y mantener independiente el correspondiente al sondeo San Bartolomé (172020004). Es recomendable como en la anterior zona establecer una poligonal envolvente que la delimite, incluyéndola en un sistema de información geográfica que facilite su control administrativo.

En la tabla 45 se detallan las regulaciones y restricciones a imponer a diversas actividades o instalaciones en esta zona, que deben ser trasladadas al planeamiento urbanístico del término municipal, destacando que muchas actividades, especialmente las agrícolas o urbanas, con fuentes potenciales de contaminación de carácter bacteriológico, degradable en un tiempo superior a 50 días, pasan a ser condicionadas o permitidas.

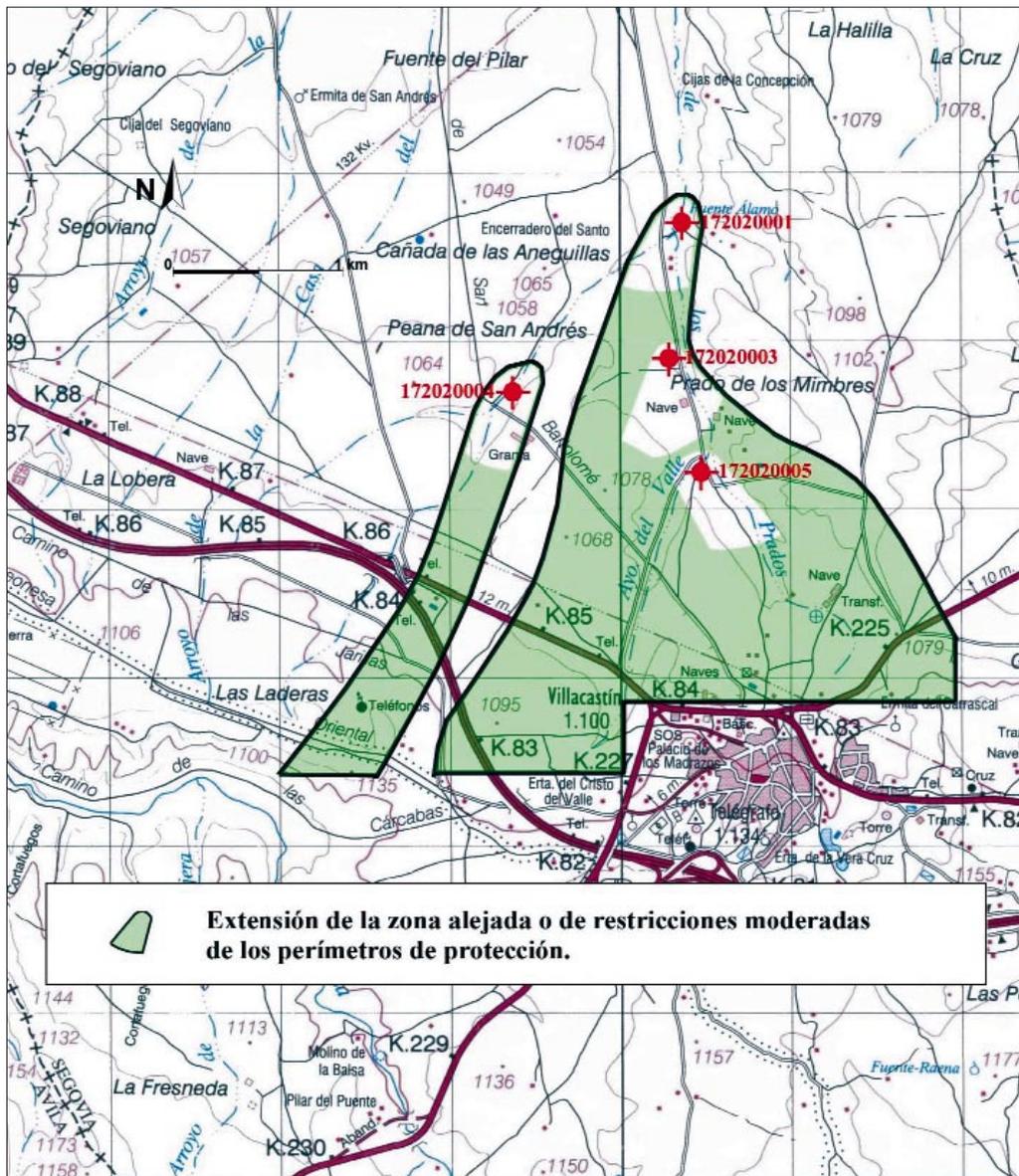
Hay que indicar que en el área que delimita esta zona alejada o de restricciones moderadas existen en la actualidad cultivos de secano (trigo y cebada), así como las instalaciones del matadero municipal y la depuradora (identificados con los números 9 y 40 en el Mapa 2 y Tabla 17), cuyas actividades quedarían afectadas por la regulación contemplada en el perímetro de protección.

Las actividades que se propone regular o restringir en las diferentes zonas del perímetro de protección, indicadas en la tabla 45, deben ser trasladadas al planeamiento urbanístico del término municipal, ya que como indica el artículo 128.1 del texto refundido de la Ley de Aguas (BOE, 2001 c) *“La Administración General del Estado, las Confederaciones Hidrográficas, las Comunidades Autónomas y las entidades locales, tienen los deberes de reciproca coordinación de sus competencias concurrentes sobre el medio hídrico con incidencia en el modelo de ordenación territorial, en la disponibilidad, calidad y protección de las aguas y, en general, del dominio público hidráulico, así como los deberes de información y colaboración mutua en relación con las iniciativas o proyectos que promuevan”*, como se indicó en el apartado 3.2.

Las limitaciones que se propone imponer en las tres zonas en que se subdividen los perímetros de protección de los cuatro sondeos (Figuras 45 y 46), afectan a suelo cuya calificación urbanística actual es de "suelo no urbanizable general".

Las modificaciones introducidas en la clasificación del suelo por la Ley 6/1998, de 13 de abril, sobre

régimen del suelo y valoraciones (BOE, 1998 a), supone que el mantenimiento como "suelo no urbanizable" del área definida por los perímetros de protección, requiere dotarlos de un régimen de especial protección (artículo 9 de dicha Ley), lo cual estaría plenamente justificado por la necesidad de establecer limitaciones para la protección del dominio público hidráulico.



Fuente: Martínez Navarrete, 2002

Figura 46: Zona alejada o de restricciones moderadas de los perímetros de protección, obtenida con la simulación efectuada mediante Visual MODFLOW en régimen permanente y la simulación advectiva del transporte con Visual MODPATH para un tiempo de tránsito de 25 años.

Tabla 45: Regulaciones y restricciones a imponer a diversas actividades e instalaciones en las diferentes zonas en que se subdividen los perímetros de protección de la calidad en los 4 sondeos de Villacastín que captan el acuífero del Terciario detrítico. (sondeo San Bartolomé, Puente Alzado, Cañada del Abad y Camino del Valle).

	DEFINICIÓN DE ACTIVIDADES	ZONA DE RESTRICCIONES ABSOLUTAS	ZONA DE RESTRICCIONES MÁXIMAS		ZONA DE RESTRICCIONES MODERADAS			
		Prohibido	Prohibido	Condicionado	Permitido	Prohibido	Condicionado	Permitido
ACTIVIDADES AGRÍCOLAS Y GANADERAS	Uso de fertilizantes	•	•				•	
	Uso de herbicidas	•	•				•	
	Uso de pesticidas	•	•				•	
	Almacenamiento de estiércol	•	•				•	
	Vertido de restos de animales	•	•				•	
	Ganadería intensiva	•	•				•	
	Ganadería extensiva	•	•					•
	Almacenamiento de materias fermentables para alimentación del ganado	•	•				•	
	Abrevaderos y refugios de ganado	•	•				•	
	Silos	•	•				•	
ACTIVIDADES URBANAS	Vertidos de aguas residuales urbanas sobre el terreno	•	•				•	
	Vertidos de aguas residuales urbanas en fosas sépticas o balsas	•	•				•	
	Vertidos de aguas residuales urbanas en cauces públicos	•	•				•	
	Vertido de residuos sólidos urbanos	•	•				•	
	Cementerios	•	•				•	
ACTIVIDADES INDUSTRIALES	Asentamientos industriales	•	•				•	
	Vertido de residuos líquidos industriales	•	•			•		
	Vertido de residuos sólidos industriales	•	•			•		
	Almacenamiento de hidrocarburos	•	•				•	
	Depósito de productos radiactivos	•	•			•		
	Inyección de residuos industriales en pozos y sondeos	•	•			•		
	Conducciones de líquido industrial	•	•			•		
	Conducciones de hidrocarburos	•	•			•		
	Apertura y explotación de canteras	•	•				•	
Relleno de canteras o excavaciones	•	•				•		
OTRAS	Camping	•	•				•	
	Acceso peatonal	•			•			•
	Transporte redes de comunicación	•		•			•	•

* El proyecto de actividades debe incluir un informe técnico sobre las condiciones que debe cumplir para no alterar la calidad existente del agua subterránea.

Modificado de Martínez Navarrete y García García, 2001 b.

6.6. Establecimiento de planes de emergencia y sistemas de vigilancia

Cabe señalar que sería conveniente establecer un Plan de Emergencia, como el indicado a modo de ejemplo en la figura 47 por parte del Ministerio de Agricultura francés, contemplando la eventualidad de que se produjera algún vertido accidental en el ámbito del perímetro de protección, y estableciese un protocolo de actuación para los responsables municipales del suministro de agua potable a la población.

En el caso de la localidad de Villacastín este Plan de Emergencia permitiría detener con carácter inmediato los bombeos en la zona afectada, al disponer el abastecimiento al municipio de dos sistemas, con conducciones independientes, uno con bombeos anuales de 86.724 m³ en los sondeos que captan el acuífero del Terciario detrítico, y otro que proporciona 33.276 m³ procedentes de las captaciones en materiales graníticos, como se indicó en el apartado 6.1.6.

Al ser altamente improbable una contaminación accidental simultánea en los dos ámbitos, unido a la existencia de depósitos, con una capacidad total de

1.440 m³, la cual permite cubrir el suministro actual, sin restricciones, durante 3 días en el período de abril, a septiembre, y de 6 días de octubre a marzo, proporcionaría el tiempo necesario para evaluar la repercusión que tendría esa contaminación accidental, en función de las previsiones y análisis efectuados al elaborar el perímetro de protección, actuando en consecuencia, evaluando en el caso de que el corte de suministro deba prolongarse en el tiempo o incluso sea necesario cerrar la captación afectada de manera definitiva la posibilidad de establecer un sistema de abastecimiento alternativo, así como estableciendo un sistema de lucha contra la contaminación.

El establecimiento de un sistema de vigilancia que defina puntos de control permitirá detectar la presencia de un fenómeno contaminante activando las previsiones contempladas en el Plan de Emergencia, siendo también de gran ayuda para evaluar si es necesario revisar el perímetro de protección.

El sistema de vigilancia, para ser eficaz ha de cumplir al menos dos objetivos:

- Detectar cualquier variación en la composición del agua que va a ser extraída en la captación. Este punto reviste una especial dificultad, sobre todo



Figura 47: Plan de intervención ante una contaminación de agua de consumo.

de orden económico, pues si bien teóricamente la realización de análisis “completos” solventaría el problema, éstos, en especial la determinación de metales, son muy caros. Será necesario pues, diseñar los análisis en función de los contaminantes que presumiblemente pueden aparecer, además de realizar controles de parámetros menos específicos pero más fácilmente determinables (pH, Eh, temperatura y conductividad entre otros) debiendo ser valorada la conveniencia del establecimiento de controles continuos.

- Detectar la contaminación con tiempo suficiente para poder actuar. Para ello será preciso efectuar un inventario exhaustivo y la evolución detallada de los lugares en los que con mayor probabilidad pueda producirse un fenómeno de contaminación.

No obstante, es conveniente realizar algunas consideraciones en torno a las limitaciones que la propia dinámica del acuífero o de los contaminantes imponen al rendimiento exigido al sistema de vigilancia.

1. El movimiento del agua en el seno del acuífero es, por lo general, un proceso muy lento y pueden transcurrir meses o incluso años desde que se produjo la contaminación hasta que es detectada por el sistema de vigilancia. La velocidad del movimiento del contaminante en el acuífero está determinada fundamentalmente por la del agua

(que a su vez viene determinada por las características hidrodinámicas del acuífero) tratándose de un parámetro muy variable.

No obstante, puede paliarse el problema del retardo entre el momento de la contaminación y su detección, incrementando la cantidad de puntos de muestreo en las zonas con posibles focos de contaminación con la esperanza de obtener una alerta más rápida al disminuir el recorrido que deberá hacer el contaminante entre el vertido y su detección.

2. Los contaminantes sufren variaciones en su naturaleza, debido a procesos químicos o biológicos que modifican su estructura molecular. Estos procesos serán más intensos cuanto mayor sea el tiempo transcurrido desde la liberación de la sustancia madre, debido a que el contacto con los agentes modificadores será también mayor.

La principal consecuencia de este hecho consiste en que con gran frecuencia, la especie química detectada en el punto de control es muy diferente a la que produjo la contaminación primaria.

3. Una muestra de agua tomada en un punto representa la calidad del agua en un área muy restringida. La extensión de este área es muy variable, dependiendo básicamente de las características

hidrodinámicas del acuífero. Cuando se esté ante un acuífero en el que el agua se mueve de manera relativamente rápida, el área representada por cada punto será mayor; también será mayor en acuíferos muy homogéneos.

4. Una vez introducida una sustancia en el suelo de un acuífero suele ser muy difícil de eliminar, en especial cuando las características propias del acuífero impongan un movimiento muy lento del agua.

Establecida la necesidad de un sistema de vigilancia así como de los objetivos que ha de cumplir y sus limitaciones, se debe establecer de forma práctica su diseño. El éxito del sistema dependerá de un gran número de circunstancias difícilmente valorables de forma general, pero desde el punto de vista del diseño estrictamente, se puede decir que tendrá éxito si es posible responder a tres cuestiones:

- ¿Dónde han de ser localizados los puntos de control?.
- ¿Qué determinaciones físicas o químicas es necesario realizar?.
- ¿Cual será la frecuencia de muestreo?.

Los puntos de control estarán situados en el área del acuífero que alimenta la captación, de forma que se corten las líneas de flujo hacia ésta, a una distancia tal que permitan una actuación entre la contaminación, la detección y su llegada al sondeo. Además los puntos de control deberán estar próximos a los focos potenciales de contaminación.

La frecuencia de muestreo viene dada por las características dinámicas del acuífero, siendo mayor cuando dicha dinámica implique un rápido movimiento del agua, ya que presentan una rápida respuesta al vertido. También es necesario valorar el tipo de contaminante que presumiblemente pueden encontrarse, pues su naturaleza física (sólido disuelto o en suspensión, líquido miscible o no con el agua, gases), sus propiedades físico-químicas, el nivel de absorción y adsorción por el terreno, el factor de biodegradabilidad, fotosensibilidad, reactividad con compuestos del medio o con otros contaminantes y otros factores tienen una fuerte influencia sobre la frecuencia idónea de muestreo. Así por ejemplo, una sustancia muy tóxica pero rápidamente neutralizable por algún agente del medio (sería el caso de algunos venenos orgánicos biodegradables) podría provocar la aparición de intoxicaciones puntuales difíciles de determinar si la red no dio la alarma a tiempo y el producto ya ha sido degradado.

Esta fácil transformación de algunas sustancias es causa por otro lado de que en función del tiempo transcurrido entre la toma de muestras se puedan detectar especies químicas de diversa naturaleza, todas procedentes de una misma sustancia original.

Los parámetros a controlar serán definidos según el tipo de actividad contaminante predominante en la zona, ya sea industria (metalúrgica, textil, papelera u otras), agricultura, actividad urbana, etc.

Por último, pero no menos importante, hay que indicar la necesidad de establecer campañas informativas que pongan en conocimiento de la población las principales características de los perímetros de protección que se proponen, la utilidad de este sistema para salvaguardar la calidad del agua extraída en las captaciones de abastecimiento urbano y avancen en la necesaria participación de los habitantes del municipio en la protección de las captaciones de abastecimiento.

Hay que resaltar que la existencia de nueva información podría hacer necesario efectuar una revisión del perímetro de protección, definido en base a los conocimientos del medio físico y la metodología existente en el momento en el que ha sido elaborado, debiéndose contemplar periódicamente si se considera necesario efectuar su revisión y eventual modificación.

6.7. Análisis metodológico para la protección del recurso hídrico en cantidad

El análisis crítico del encuadre legal de los perímetros de protección "de la cantidad" en las captaciones de abastecimiento urbano, efectuado en el apartado 3.3, indicaba la conveniencia de desarrollar mecanismos que permitieran contemplar regulaciones a establecer en un área del acuífero, en el entorno de las captaciones de abastecimiento, para garantizar el volumen extraído destinado al suministro de agua a la población y otras demandas, definiendo ese área, y las regulaciones a establecer, con una metodología adecuada.

Para desarrollarla se ha analizado el tratamiento metodológico otorgado a la protección de la cantidad por diversos autores y organismos (Environment Agency, 1998; Lallemand-Barrès, Roux, 1989 y 1999; Moreno Merino *et al.*, 1991; USEPA, 1987, 1993 a, 1993 b, y 2000), junto con los resultados del análisis de diversos aspectos técnicos y metodológicos realizados en los apartados precedentes, en las captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín.

La metodología que se propone para la protección del recurso hídrico en cantidad, en las captaciones de abastecimiento urbano, se esquematiza en la figura 48 indicándose secuencialmente los estudios a elaborar y diversos métodos aplicables.

ETAPA A:

En primer lugar habría que recopilar y analizar la información existente sobre la Unidad Hidrogeológica en la que se ubica la captación objeto de protección, especialmente respecto a sus recursos, la Norma general de explotación y las diferentes regulaciones existentes respecto a demandas ambientales, y de otro tipo, así como a las concesiones existentes para abastecimiento y otros usos.

ETAPA B:

En la segunda etapa se procederá a estudiar detalladamente el acuífero explotado por las captaciones de abastecimiento, efectuando un balance hidrogeológico detallado, cuantificando sus recursos y reservas (si es posible) y contemplando las limitaciones establecidas al recurso en la Unidad Hidrogeológica que le afecten efectuándose los estudios indicados en la etapa B en la figura 48. Habría que analizar además la relación del acuífero con otros, tanto física como de gestión del recurso hídrico.

El análisis de la piezometría en diferentes estaciones y diferentes sectores permite, además de caracterizar el funcionamiento hidrogeológico del acuífero, contrastar los datos del balance, siendo de gran utilidad para delimitar zonas de protección, excepto en los casos en que existan grandes cambios de niveles y de direcciones de flujo estacionales o muy variables.

En el caso, muy frecuente, de que no exista una concesión específica para el abastecimiento, habrá que obtener el caudal necesario para abastecer a la población partiendo de las dotaciones previstas para estas en los Planes Hidrológicos de cuenca, efectuando la distribución del volumen necesario entre las captaciones de abastecimiento existentes, en función de sus características y la infraestructura municipal.

El dato de caudal se empleará posteriormente en los diferentes métodos existentes para definir zonas de protección, y será básico para definir cuándo se produciría afección a la captación de abastecimiento, al definirse esa afección como la "disminución del caudal realmente aprovechable o un deterioro de su calidad que lo haga inutilizable para el fin a que se dedicaba, y que sea consecuencia directa y demostrada del nuevo aprovechamiento, pero no la simple variación del nivel de agua en un pozo o la merma

de caudal en una galería o manantial, si el remanente disponible es igual o superior al aprovechado (Artículo 184 del R.D.P.H. BOE, 1986).

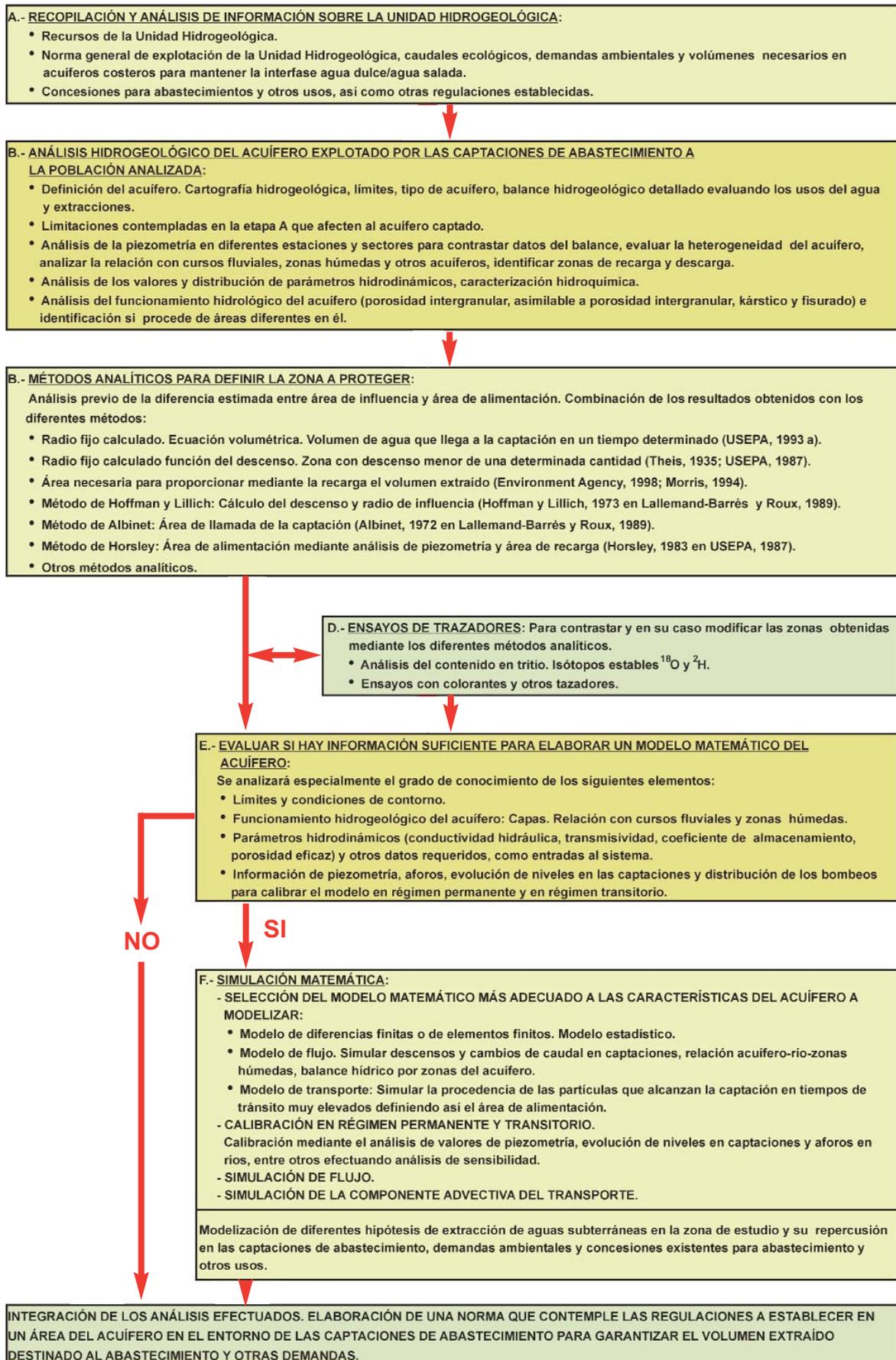
ETAPA C:

La recopilación crítica de información y el análisis hidrogeológico detallado del acuífero captado, efectuado en las primeras etapas del estudio, debe complementarse con la aplicación de otros métodos para definir con mayor precisión la zona a proteger, recomendándose inicialmente la aplicación de métodos analíticos o de parámetros agregados, como primera aproximación, combinándose los resultados obtenidos en la aplicación de cada uno de ellos.

En la figura 48 se indican alguno de los métodos analíticos más utilizados:

- El método del radio fijo calculado. Ecuación volumétrica (USEPA, 1993 a), delimita el área de un cilindro de acuífero necesario para proporcionar el caudal bombeado, considerando que procede íntegramente del agua almacenada, definida por el volumen del cilindro y la porosidad eficaz, considerando la recarga despreciable. Ha sido descrito en el apartado 6.3.3, indicándose también en el mismo los resultados de su aplicación a las captaciones de abastecimiento en el Terciario detrítico de Villacastín.
- Método que delimita el área necesaria para proporcionar mediante la recarga el volumen extraído (Environment Agency, 1998; Morris, 1994), su descripción y resultados obtenidos tras su aplicación se indican igualmente en el apartado 6.3.4.
- El método del radio fijo calculado. Función del Descenso (Theis 1935; USEPA, 1987) se ha descrito en el apartado 6.3.4, junto con los resultados obtenidos en su aplicación a las mismas captaciones.
- El método de Albinet (Albinet, 1972 en Lallemand-Barrès, Roux, 1989) descrito en el apartado 6.3.14., emplea la misma ecuación de Theis (Theis, 1935) para el régimen transitorio, con idéntica formulación que el método anterior, del radio fijo calculado, función del descenso, para obtener las curvas de descenso en función de la distancia a la captación.

Éstas se superponen a los valores de piezometría previos al bombeo, calculando por sustracción los valores modificados de la carga hidráulica. A partir de esos valores se trazan las isopiezas resultantes tras el bombeo, y las líneas de corriente hasta la captación, definiendo así el área de llamada de la captación.



Fuente: Martínez Navarrete, 2002

Figura 48: Metodología para la protección del recurso hídrico en cantidad en las captaciones de abastecimiento urbano.

- El método de Hoffman y Lillich (Hoffman y Lillich, 1973, en Lallemand-Barrès y Roux, 1989) se ha descrito en el apartado 6.3.13.
- El método de Horsley (Horsley, 1983, en USEPA, 1987) se ha descrito en el apartado 6.3.17.

ETAPA D:

Es muy conveniente contrastar y, en su caso, modificar las zonas obtenidas mediante la combinación de los diferentes métodos analíticos efectuando ensayos de trazadores, destacando el estudio de los isótopos estables del agua ^{18}O y deuterio, el empleo del análisis del contenido en tritio y el empleo de colorantes como la fluoresceína, al ser especialmente adecuadas para este tipo de estudios.

ETAPA E:

Consiste en evaluar si se dispone de la información suficiente para poder efectuar un modelo matemático del acuífero.

Para ello es imprescindible analizar el grado de conocimiento respecto a los límites y condiciones de contorno, funcionamiento hidrogeológico del acuífero, valores de piezometría y de parámetros hidráulicos, entre otros factores referidos en la figura 48.

En caso de que no se disponga de suficiente información se dará por terminado el análisis, integrando los resultados obtenidos previamente.

ETAPA F:

La simulación matemática, que se realiza cuando se dispone de información suficiente para la ejecución, y calibrado del modelo, consta de las siguientes fases:

- Selección del modelo matemático más adecuado a las características del acuífero a modelizar.
- Calibración en régimen permanente y transitorio.
- Simulación de flujo.
- Simulación de la componente advectiva del transporte.

Cabe indicar especialmente que, si bien lo más habitual es el empleo de modelos de flujo para definir la protección de la cantidad también puede emplearse la simulación de la componente advectiva del transporte simulando la procedencia de las partículas para tiempos de tránsito muy elevados, lo que permitiría definir el área de alimentación (Rayne *et al.*, 2001).

La simulación matemática permite modelizar diferentes hipótesis de extracción de aguas subterráneas en la zona de estudio, y su repercusión en las captaciones de abastecimiento, demandas ambientales y concesiones existentes para abastecimiento y otros usos, por lo que constituye una herramienta muy útil para definir la protección del recurso hídrico en cantidad en las captaciones de abastecimiento urbano.

La metodología descrita debe concluir con la integración de los análisis efectuados y la elaboración de una norma que contemple las regulaciones a establecer en un área del acuífero, en el entorno de las captaciones de abastecimiento, para garantizar el volumen extraído destinado al abastecimiento y otras demandas.

Esta incluirá el volumen global máximo de extracción en el entorno delimitado, la cuantía máxima de extracción para captaciones distintas de la que es objeto de protección, demandas ambientales, profundidades de sondeos y de instalación de bombas, distancias mínimas a la captación protegida entre otras a definir en una propuesta legal de contenido de una norma relativa a estos aspectos.

6.8. Propuesta final de protección de la cantidad en los sondeos de abastecimiento

Para definir el contenido de la Norma que contemple las regulaciones a establecer en un área del acuífero en el entorno de las captaciones para garantizar el volumen extraído destinado al abastecimiento y otras demandas se empleará los análisis y la información reflejados en los apartados precedentes, destacando especialmente la contemplada en el apartado 6.1. (análisis de la información requerida para definir la protección a establecer en las captaciones de abastecimiento urbano), así como la referente a la aplicación de los modelos matemáticos, especialmente Visual MODFLOW y su módulo "Zone Budget" (Apartado 6.3.11).

Hay que resaltar inicialmente que el Plan Hidrológico de la cuenca del Duero contempla que: "se establecerán las Normas de Explotación de las Unidades Hidrogeológicas, que no podrán abordarse hasta completar la delimitación de las mismas y su inventario, actualmente en elaboración". Al no ser posible por tanto disponer aún de dichas Normas de Explotación, con su previsible repercusión en la zona analizada, se efectuará en base a criterios propios.

Se considera imprescindible garantizar:

- Los cuatro sondeos de abastecimiento urbano en el

acuífero detrítico del Terciario deben permitir obtener, a largo plazo, todo el volumen requerido para el abastecimiento a la población (120.000 m³/año) al no existir otros acuíferos en la zona. Reservándose los pozos en el acuífero granítico como fuente de suministro puntual alternativo.

- Los niveles de dichas captaciones deben ser estables a largo plazo.
- Los arroyos que surcan el término municipal no deben secarse y deberán continuar siendo ganadores para evitar cambios de flujo que pudieran favorecer la contaminación de las captaciones, permitiendo el mantenimiento de la vegetación y fauna asociada a los arroyos.
- Permitir otros bombeos siempre que no impidan que se alcancen los requisitos precedentes.

El análisis efectuado en los apartados precedentes cubre las etapas A, B, C indicadas en la metodología propuesta para proteger el recurso hídrico en cantidad desarrolladas en el apartado 6.6, sintetizada en la figura 48, y han permitido utilizar un modelo matemático (como se contemplaba en los apartados E y F de la misma).

El modelo matemático, una vez calibrado, ha permitido simular el comportamiento del acuífero, en régimen permanente, con un bombeo continuo de las cuatro captaciones de abastecimiento y de otras dos captaciones más, obteniéndose los niveles piezométricos que se producirían.

Resalta que el acuífero soporta a largo plazo un bombeo continuo de 81 m³/día en cada una de las cuatro captaciones de abastecimiento y otros dos bombeos adicionales de 21 m³/día en el sondeo 172010003 (Gasolinera) y de 25 m³/día en el sondeo 172020006 (Granja de Huevos Velasco), produciéndose unos descensos de nivel asumibles, manteniéndose un flujo hacia los arroyos. Esta situación se observa en los perfiles de las filas 6 y 8, figuras 49 y 50 respectivamente, cuya ubicación en el área modelizada se indica en la figura 51.

Para avanzar en el análisis de la protección en cantidad de las captaciones de abastecimiento se ha empleado además el módulo "Zone Budget" del programa Visual MODFLOW.

Este módulo permite efectuar balances hídricos de entradas y salidas al acuífero por zonas, empleando los resultados procedentes de la simulación efectuada con MODFLOW, en régimen permanente o transitorio, especificando el usuario en qué regiones quiere que se calculen éstos.

En la figura 51 se indican las cinco zonas seleccionadas. Estas son:

- Zona 1: Todo el área modelizada excepto la incluida en las zonas 2-3-4-5.
- Zona 2: Arroyos de la Asperilla y de la Casa del Caballero (al oeste).
- Zona 3: Arroyos de los Prados y del Valle (que discurre junto a las captaciones de abastecimiento).
- Zona 4: Sondeo de abastecimiento San Bartolomé (172020004) y de la Granja Avícola Velasco (172020006).
- Zona 5: Límite septentrional de la zona simulada.

En la figura 52 se muestra el flujo total de entradas y salidas en cada zona.

En la figura 53 se muestra el flujo de entrada a cada una de las cinco zonas desglosado por su procedencia (celdas de nivel constante, pozos, drenes, recarga y zonas externas) y en la figura 54 el correspondiente a las salidas desglosando igualmente su destino.

En la tabla 46 se muestra cuantitativamente el balance de masas que el programa efectúa para la totalidad del área simulada. Cabe indicar que:

El modelo considera que la recarga en las celdas de nivel constante (5 celdas) es cero, por lo que es una cantidad ligeramente inferior a la obtenida si se hace el cálculo analíticamente (122 celdas activas x 500 m x 500 m x 0,0009 m/día = 2.745 m³/día).

El agua bombeada se corresponde lógicamente con la indicada (81 m³/día x 4 sondeos de abastecimiento + 22 m³/día, sondeo gasolinera, + 25 m³/día Granja Huevos Velasco= 371 m³/día).

El programa proporciona que fluyen 1.931 m³/día por las celdas de nivel constante y que los drenes (es decir el conjunto de los arroyos en la zona simulada, zona 2 y zona 3) drenan 331 m³/día es decir 3,8 L/s, salidas superficiales y subterráneas del sistema).

Por su parte en las tablas 47, 48 y 49 se refleja el balance correspondiente a cada una de las cinco zonas indicadas. Cabe destacar:

- Balance correspondiente a la zona 2 (Arroyos de la Asperilla y de la Casa del Caballero, al oeste):

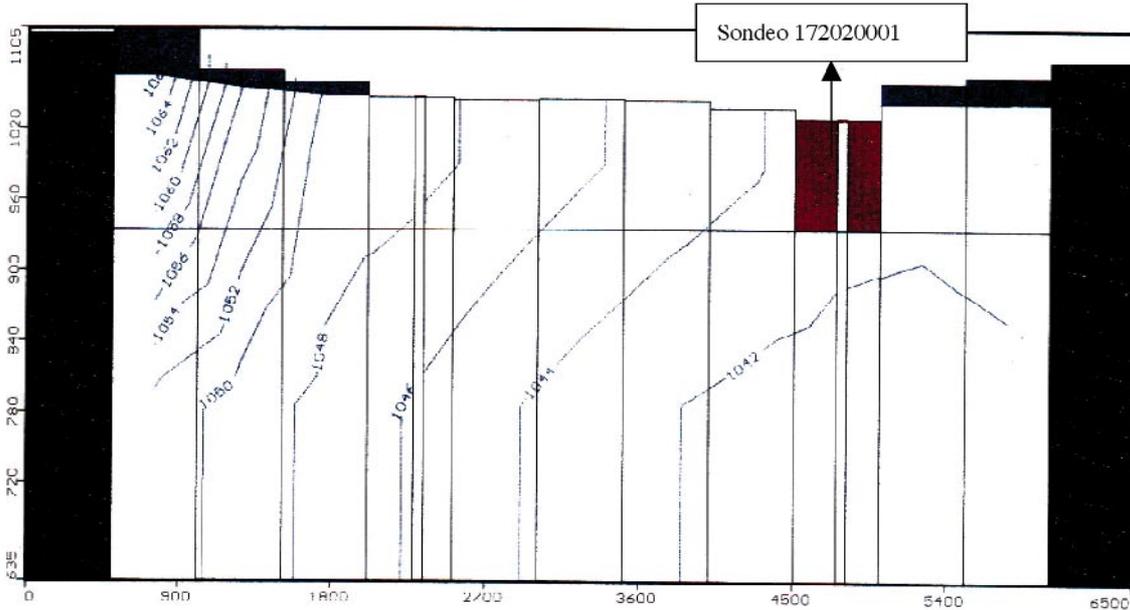
Las entradas se deben a la recarga por infiltración de la precipitación y procedente de la zona 1 del

acuífero. Las salidas se producen hacia las celdas de nivel constante y otras zonas, así como al bombeo de unos 22 m³/día en el sondeo de la gasolinera.

Hay que resaltar especialmente por su interés para los objetivos planteados, que fluyen hacia los drenes (arroyos) 186 m³/día, es decir 2,1 L/s evacuan los arroyos del acuífero.

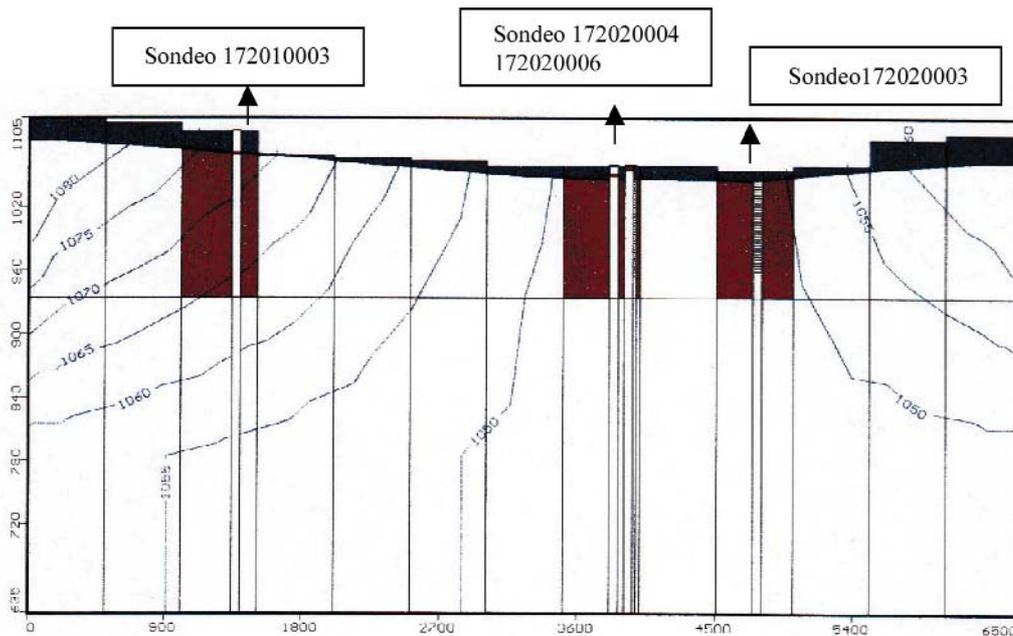
La zona 2 es por tanto ganadora en su balance con la zona 1 (tiene un superávit de 159 m³/día) y los drenes, con los bombeos previstos, reciben agua, es decir el arroyo es ganador y su aforo simulado es de 2,1 L/s.

– Balance correspondiente a la zona 3 (Arroyos de los Prados y del Valle):



Fuente: Martínez Navarrete, 2002

Figura 49: Perfil en la fila 6 del área modelizada (Figura 40). Simulación con bombeo continuo en los cuatro sondeos de abastecimiento y otras dos captaciones en régimen permanente.



Fuente: Martínez Navarrete, 2002

Figura 50: Perfil en la fila 8 del área modelizada (Figura 40). Simulación con bombeo continuo en los cuatro sondeos de abastecimiento y otras dos captaciones en régimen permanente.

Las entradas se deben a recarga por infiltración de la precipitación y procedente de la zona 1.

Las salidas se producen hacia las celdas de nivel constante y la zona 1, así como al bombeo de tres sondeos de abastecimiento (que coinciden con celdas de esta zona al estar próximo al arroyo), $81 \text{ m}^3/\text{día} \times 3 = 243 \text{ m}^3/\text{día}$.

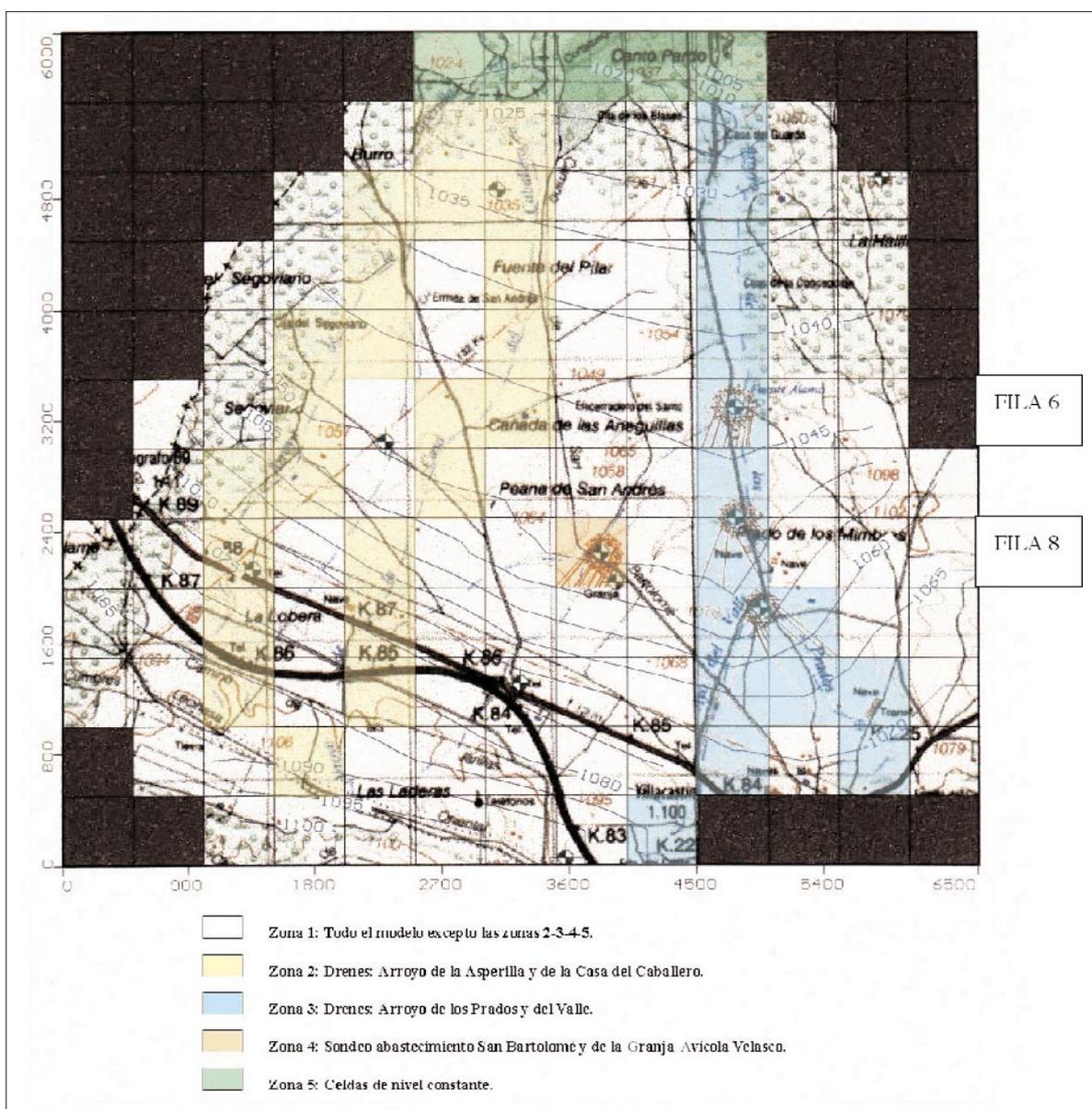
Como en el caso anterior hay que destacar que esta zona es también ganadora en su relación con la zona 1. Por su parte los drenes actúan, evacuando $145 \text{ m}^3/\text{día}$, es decir el arroyo es ganador y su aforo simulado es de 1,7 L/s.

– Balance correspondiente a la zona 4:

Las entradas proceden de la recarga y de la zona 1 y las salidas se producen hacia la zona 1 y al bombeo ($81 \text{ m}^3/\text{día}$ de un sondeo de abastecimiento junto con $25 \text{ m}^3/\text{día}$ de una granja, lo cual supone en total $106 \text{ m}^3/\text{día}$).

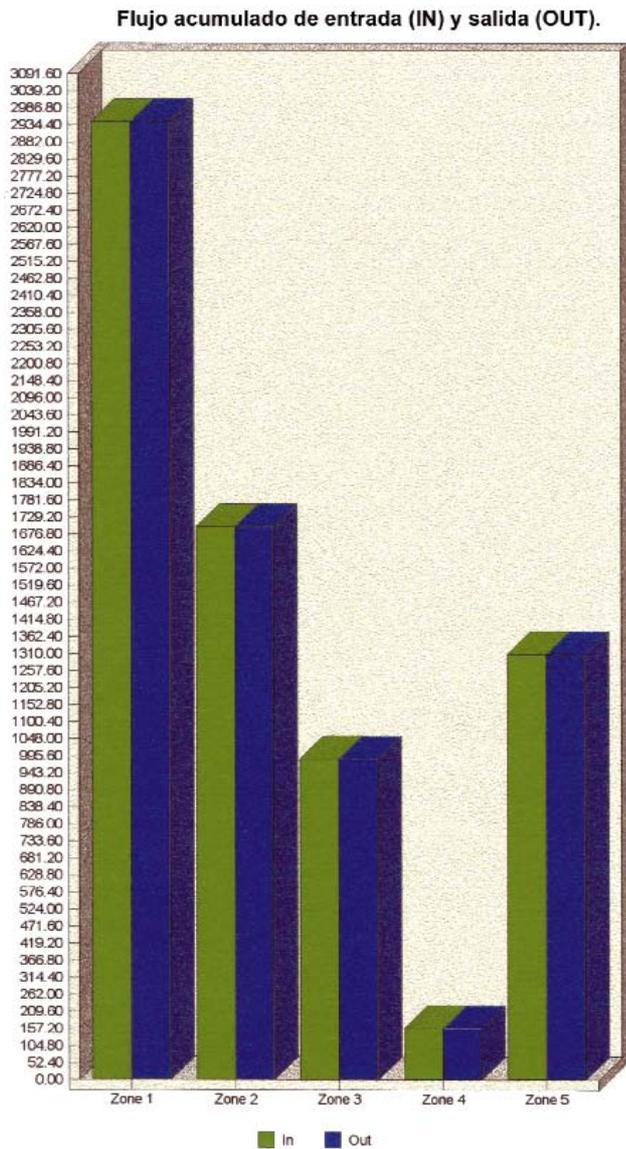
– Balance correspondiente a la zona 5 (celdas de nivel constante):

Esta zona recibe entradas procedentes de las demás con las que está en contacto (zonas 1, 2 y



Fuente: Martínez Navarrete, 2002

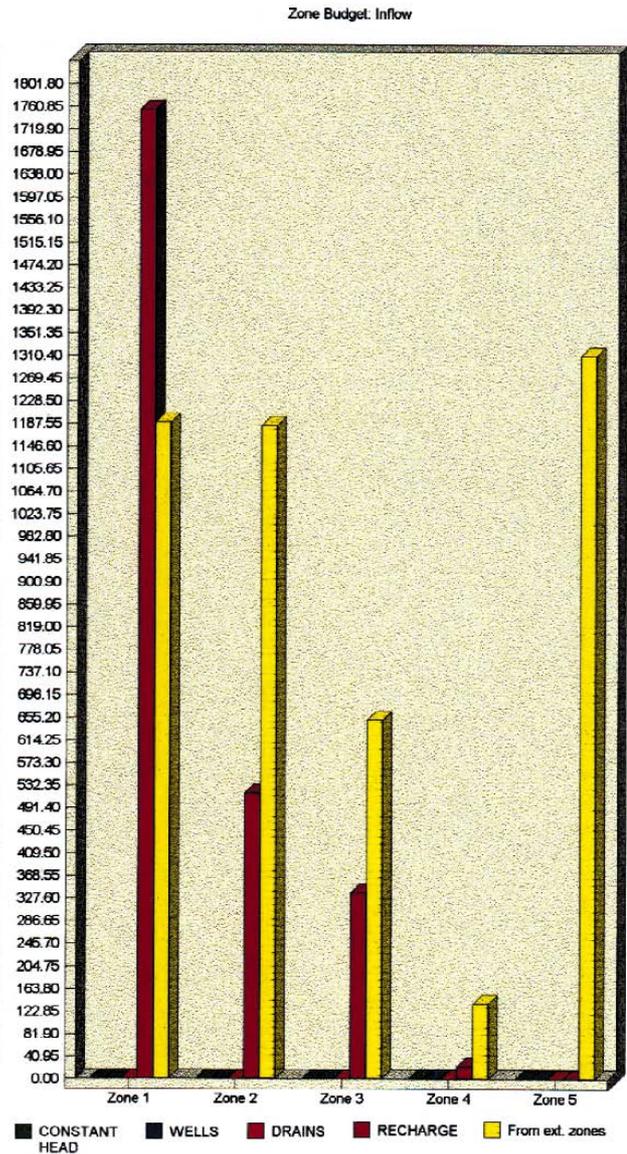
Figura 51: Zonas en las que se aplica la simulación con el programa Zone Budget.



- Zona 1: Resto del modelo no incluido en zonas 2-3-4-5.
- Zona 2: Drenes arroyo de la Asperilla y de la Casa del Caballero (al oeste).
- Zona 3: Drenes arroyo de los Prados y del Valle (al este).
- Zona 4: Sondeo de abastecimiento San Bartolomé y de la Granja Avícola Velasco.
- Zona 5: Celdas de nivel constante (límite norte de la zona modelada).

Fuente: Martínez Navarrete, 2002

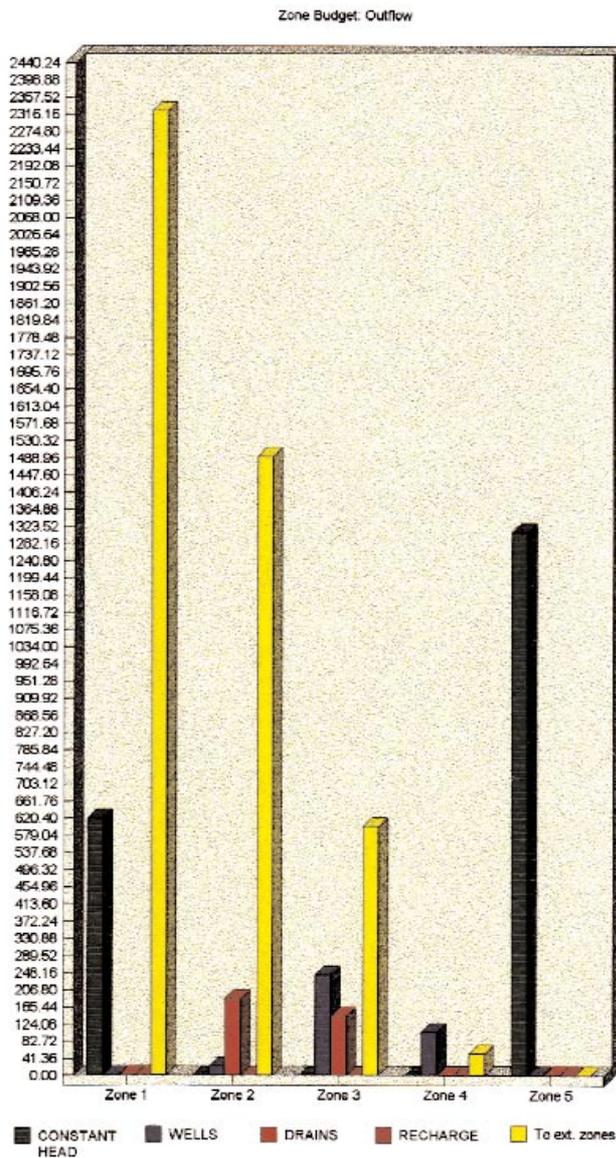
Figura 52: Flujo acumulado (m³/día) de entrada y salida en las zonas seleccionadas.



- Zona 1: Resto del modelo no incluido en zonas 2-3-4-5.
- Zona 2: Drenes arroyo de la Asperilla y de la Casa del Caballero (al oeste).
- Zona 3: Drenes arroyo de los Prados y del Valle (al este).
- Zona 4: Sondeo de abastecimiento San Bartolomé y de la Granja Avícola Velasco.
- Zona 5: Celdas de nivel constante (límite norte de la zona modelada).

Fuente: Martínez Navarrete, 2002

Figura 53: Flujo de entrada (m³/día) a cada una de las cinco zonas desglosado por su procedencia (celdas de nivel constante, pozos, drenes, recarga y zonas externas).



- Zona 1: Resto del modelo no incluido en zonas 2-3-4-5.
- Zona 2: Drenes arroyo de la Asperilla y de la Casa del Caballero (al oeste)
- Zona 3: Drenes arroyo de los Prados y del Valle (al este).
- Zona 4: Sondeo de abastecimiento San Bartolomé y de la Granja Avícola Velasco.
- Zona 5: Celdas de nivel constante (límite norte de la zona modelada).

Fuente: Martínez Navarrete, 2002

Figura 54: Flujo de salida (m³/día) de cada una de las cinco zonas desglosado por su destino (celdas de nivel constante, pozos, drenes, recarga y zonas externas).

Tabla 46: Balance de masas para la totalidad del área simulada.

BALANCE DE MASA

Volúmenes acumulados
Todo el área simulada

ENTRADAS (m³/día) :

Variación en el Almacenamiento =	0,0
Celdas nivel constante =	0,0
Pozos =	0,0
Arroyos (drenes) =	0,0
Recarga =	2.632,5
Evapotranspiración =	0,0
Pérdida/ganancia de los ríos =	0,0
Límites de nivel =	0,0
Entradas totales =	2.632,5 m³/día

SALIDAS (m³/día) :

Variación en el Almacenamiento =	0,0
Celdas nivel constante =	1.930,7
Pozos =	370,6
Arroyos (drenes) =	331,1
Recarga =	0,0
Evapotranspiración =	0,0
Pérdida/ganancia de los ríos =	0,0
Límites de nivel =	0,0
Salidas totales =	2.632,5 m³/día
Entradas-salidas =	-0,000732
% Discrepancia =	0,0

Fuente: Martínez Navarrete, 2002

3) sin presentar salida hacia las mismas (lo que no habría tenido ningún sentido hidrogeológico).

Esta zona aporta al resto de la cuenca del Duero 1.310 m³/día.

Los balances obtenidos empleando el módulo "Zone Budget" del programa Visual MODFLOW han corroborado las conclusiones obtenidas en la simulación empleando Visual MODFLOW para delimitación de perímetros de protección en calidad que indicaban que el acuífero soportaba a largo plazo los bombeos previstos, con descensos asumibles, manteniéndose un flujo hacia los arroyos permitiendo cuantificar los balances resultantes.

Su análisis ha indicado que se cumplen las premi-

as consideradas imprescindibles, detalladas previamente en este apartado (los cuatro sondeos de abastecimiento urbano en el acuífero detrítico del Terciario deben permitir obtener a largo plazo los 120.000 m³/año requeridos para abastecer a la población, los niveles de estas captaciones deben ser estables a largo plazo, los arroyos no deben secarse y permitirse otros bombeos solamente en el caso de que no impidan que se alcancen los anteriores requisitos). No obstante para mantener la condición de ganadores para los arroyos y los bombeos previstos no cabe permitir nuevos bombeos al considerarse, entre otros aspectos, el caudal simulado en los arroyos (2,1 L/s y 1,7 L/s) como un valor que no puede sufrir nuevas reducciones.

Tabla 47: Balance correspondiente a las zonas 1 y 2.

BALANCE CORRESPONDIENTE A CADA ZONA SELECCIONADA

Zona 1: Todo el modelo excepto lo incluido en zonas 2-3-4 y 5.

ENTRADAS (m³/día) :

Variación en el Almacenamiento =	0,0
Celdas nivel constante =	0,0
Pozos =	0,0
Arroyos (drenes) =	0,0
Recarga =	1.755,0
Evapotranspiración =	0,0
Pérdida/ganancia de los ríos =	0,0
Límites de nivel =	0,0
Zona 2 a 1 =	1.024,5
Zona 3 a 1 =	111,8
Zona 4 a 1 =	53,1
Zona 5 a 1 =	0,0
Entradas totales =	2.944,5 m³/día

SALIDAS (m³/día) :

Variación en el Almacenamiento =	0,0
Celdas nivel constante =	620,2
Pozos =	0,0
Arroyos (drenes) =	0,0
Recarga =	0,0
Evapotranspiración =	0,0
Pérdida/ganancia de los ríos =	0,0
Límites de nivel =	0,0
Zona 1 a 2 =	1.183,5
Zona 1 a 3 =	650,4
Zona 1 a 4 =	136,6
Zona 1 a 5 =	353,7
Salidas totales =	2.944,5 m³/día

Zona 2: Drenes (arroyos) del oeste

ENTRADAS (m³/día) :

Variación en el Almacenamiento =	0,0
Celdas nivel constante. =	0,0
Pozos =	0,0
Arroyos (drenes) =	0,0
Recarga =	517,5
Evapotranspiración =	0,0
Pérdida/ganancia de los ríos =	0,0
Límites de nivel =	0,0
Zona 1 a 2 =	1.183,5
Zona 5 a 2 =	0,0
Entradas totales =	1.701,0 m³/día

SALIDAS (m³/día) :

Variación en el Almacenamiento =	0,0
Celdas nivel constante. =	0,0
Pozos =	21,6
Arroyos (drenes) =	186,3
Recarga =	0,0
Evapotranspiración =	0,0
Pérdida/ganancia de los ríos =	0,0
Límites de nivel =	0,0
Zona 2 a 1 =	1.024,5
Zona 2 a 5 =	468,4
Salidas totales =	1.701,0 m³/día

Fuente: Martínez Navarrete, 2002

Tabla 48: Balance correspondiente a las zonas 3 y 4.

BALANCE CORRESPONDIENTE A CADA ZONA SELECCIONADA
Zona 3: Drenes (arroyos) del este.

ENTRADAS (m³/día) :

Variación en el Almacenamiento =	0,0
Celdas nivel constante =	0,0
Pozos =	0,0
Arroyos (drenes) =	0,0
Recarga =	337,5
Evapotranspiración =	0,0
Pérdida/ganancia de los ríos =	0,0
Límites de nivel =	0,0
Zona 1 a 3 =	650,4
Zona 5 a 3 =	0,0
Entradas totales =	987,9 m³/día

SALIDAS (m³/día) :

Variación en el Almacenamiento =	0,0
Celdas nivel constante =	0,0
Pozos =	243,0
Arroyos (drenes) =	144,8
Recarga =	0,0
Evapotranspiración =	0,0
Pérdida/ganancia de los ríos =	0,0
Límites de nivel =	0,0
Zona 3 a 1 =	111,8
Zona 3 a 5 =	488,2
Salidas totales =	987,9 m³/día

Zona 4: Celda de bombeo
Abastecimiento y granja

ENTRADAS (m³/día) :

Variación en el Almacenamiento =	0,0
Celdas nivel constante =	0,0
Pozos =	0,0
Arroyos (drenes) =	0,0
Recarga =	22,5
Evapotranspiración =	0,0
Pérdida/ganancia de los ríos =	0,0
Límites de nivel =	0,0
Zona 1 a 4 =	136,6
Entradas totales =	159,1 m³/día

SALIDAS (m³/día) :

Variación en el Almacenamiento =	0,0
Celdas nivel constante =	0,0
Pozos =	106,0
Arroyos (drenes) =	0,0
Recarga =	0,0
Evapotranspiración =	0,0
Pérdida/ganancia de los ríos =	0,0
Límites de nivel =	0,0
Zona 4 a 1 =	53,1
Salidas totales =	159,1 m³/día

Fuente: Martínez Navarrete, 2002

Tabla 49: Balance correspondiente a la zona 5.

Zona 5: Celdas de nivel constante.

ENTRADAS (m³/día) :

Variación en el Almacenamiento =	0,0
Celdas nivel constante =	0,0
Pozos =	0,0
Arroyos (drenes) =	0,0
Recarga =	0,0
Evapotranspiración =	0,0
Pérdida/ganancia de los ríos =	0,0
Límites de nivel =	0,0
Zona 1 a 5 =	353,7
Zona 2 a 5 =	468,4
Zona 3 a 5 =	488,2
Entradas totales =	1.310,5 m³/día

SALIDAS (m³/día) :

Variación en el Almacenamiento =	0,0
Celdas nivel constante =	1.310,5
Pozos =	0,0
Arroyos (drenes) =	0,0
Recarga =	0,0
Evapotranspiración =	0,0
Pérdida/ganancia de los ríos =	0,0
Límites de nivel =	0,0
Zona 5 a 1 =	0,0
Zona 5 a 2 =	0,0
Zona 5 a 3 =	0,0
Salidas totales =	1.310,5 m³/día

Fuente: Martínez Navarrete, 2002

La norma que define las regulaciones que se propone establecer en un área del acuífero del Terciario detrítico captado para el abastecimiento de la localidad de Villacastín, para garantizar el volumen destinado al abastecimiento a la población y otros usos, es la siguiente:

1. Se define una única zona para proteger en cantidad los cuatro sondeos de abastecimiento que captan el acuífero del Terciario detrítico, garantizar los caudales ecológicos y minimizar el impacto ambiental de los bombeos.
2. Su tamaño coincide con la totalidad del área simulada (Figura 51).
3. Los bombeos para abastecimiento urbano en dicha zona se destinarán exclusivamente a subsanar las necesidades de abastecimiento de la población de Villacastín (120.000 m³/año) distribuyéndose entre los cuatro sondeos de abastecimiento ya existentes (Camino del Valle, Cañada del Abad, Puente Alzado y San Bartolomé), sin realizar modificaciones en su profundidad (96 metros), efectuándose un bombeo máximo de 81 m³/día en cada uno de ellos.
Se autoriza proceder a la limpieza o sustitución de tuberías o equipos deteriorados en los mismos. En el caso de quedar inutilizado, por derrumbe u otras causas, podrán ser sustituidos por un nuevo sondeo, de características similares, ubicado lo más próximo posible a los actuales.
4. Se autoriza además continuar bombeos a largo plazo en las captaciones siguientes:
 - Sondeo 172010003. Sondeo que abastece dos gasolineras y un restaurante con un bombeo de 22 m³/día.
 - Sondeo 172020006. Sondeo que abastece a la Granja Avícola Velasco con un bombeo de 25 m³/día.La limpieza, acondicionamiento y eventual sustitución de los mismos cumplirá los mismos requisitos indicados previamente para los sondeos de abastecimiento.
5. No se autoriza efectuar nuevas captaciones en la totalidad del área modelizada excepto en los supuestos de sustitución de los actuales, reseñados en los puntos 3 y 4 de esta Norma.
6. Se señalará en el terreno mediante carteles que en esa zona existe una Norma que impide efectuar nuevas captaciones.
7. Se controlará periódicamente que se cumplen las previsiones de la simulación respecto a los arro-

yos (flujo estimado en 2,1 L/s y 1,7 L/s) que no deben secarse y tienen que continuar siendo ganadores, y que los descensos de niveles observados en los sondeos se mantienen estables a largo plazo.

En el caso de producirse desviaciones respecto a lo simulado se procedería a la revisión inmediata de estas Normas contemplándose en primer lugar, si fuera preciso, reducir los bombeos indicados en el punto 4.

6.9. Propuesta de modificaciones legales relativas a los perímetros de protección de la calidad y a la protección del recurso hídrico en cantidad en las captaciones de abastecimiento urbano

El análisis efectuado en este trabajo del marco legal referente a la delimitación de perímetros de protección, la metodología para la delimitación de perímetros de protección de la calidad y la referente a la protección en cantidad en las captaciones de abastecimiento urbano, junto con los resultados de su aplicación a las captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín en el acuífero del Terciario detrítico (capítulos 3 y 6), indica la necesidad de efectuar modificaciones legales relativas a la delimitación e implementación en el territorio de los mismos, coordinados con el tratamiento metodológico desarrollado.

Estas modificaciones de la legislación serían también aplicables a los restantes tipos de acuíferos (kársticos y fisurados), cuyo estudio metodológico se desarrolla en los capítulos 7 y 8.

Las propuestas de modificaciones legales efectuadas son las siguientes:

6.9.1. Propuesta de contenido de una norma parcial para otorgamiento de autorizaciones y concesiones en el acuífero captado para abastecimiento

La incertidumbre respecto al marco legal aplicable a los perímetros de protección que tienen como objetivo salvaguardar la cantidad ha sido analizada en el apartado 3.3. Está motivada en gran parte por la modificación efectuada en el artículo 56.3 del Texto Refundido de la Ley de Aguas (BOE, 2001 c), que contempla para estos únicamente la protección frente a los riesgos de contaminación, sin modificar ni derogar los artículos referentes a perímetros de protección en los Reglamentos (R.D.P.H., 1986 y

R.A.P.A.P.H., 1988) que consideran la protección en calidad y cantidad.

La propuesta que se realiza, para su eventual inclusión en la modificación, se supone que inminente, de los artículos referentes a perímetros de protección en el R.D.P.H. de 1986 (BOE, 1986), es reservar la denominación de "perímetros de protección" exclusivamente para los delimitados con objeto de proteger frente a la contaminación, con limitaciones a diversas actividades. Por otra parte se establecería una "norma parcial para otorgamiento de autorizaciones y concesiones en el acuífero captado para abastecimiento", referido a un entorno de las captaciones de abastecimiento, definido conforme a la metodología propuesta en el apartado 6.6.

La aprobación de estas "normas parciales", a incluir en la norma general de explotación de la Unidad Hidrogeológica, se efectuaría en el seno de la Confederación Hidrográfica, sin que sea imprescindible la concurrencia de otras Administraciones. El soporte legal estaría en los artículos 55.1 y 76 del Texto Refundido de la Ley de Aguas, 184 del Reglamento del Dominio Público Hidráulico, 84.4 del Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica, así como diversos artículos de los Planes Hidrológicos de cuenca en que se recogen normas para el otorgamiento de autorizaciones y concesiones en las unidades hidrogeológicas, dentro del capítulo sobre Conservación y Protección de Acuíferos.

La "norma parcial para otorgamiento de autorizaciones y concesiones en el acuífero captado para abastecimiento" que se propone, cuyas regulaciones prevalecerían sobre las de carácter general, ya que el hecho de dictarse presupone la existencia de circunstancias especiales o particulares que hacen necesaria su excepción de la norma general, definirá al menos los siguientes aspectos:

- A. Delimitación del acuífero explotado por la captación de abastecimiento urbano, características hidrogeológicas y esquema estructural y de funcionamiento del acuífero. Determinación de los recursos naturales y asignables con las restricciones que imponen los objetivos de calidad, los aspectos medioambientales y las explotaciones actuales en el ámbito del acuífero. Se detallarán:
- Límites, tipo de acuífero, litología y balance hidrogeológico, definiendo los usos de agua y extracciones.
 - Regulaciones sobre los volúmenes necesarios para el mantenimiento de zonas húmedas y caudales ecológicos de los cursos fluviales en el acuífero, volúmenes necesarios en acuíferos

costeros para mantener la interfase agua dulce agua salada, concesiones para abastecimiento y otros usos así como otras regulaciones establecidas.

- Recursos naturales asignables (recursos renovables minorados por regulaciones y concesiones existentes) y volumen necesario para abastecer a la población.
 - Análisis piezométrico en diferentes estaciones y años, valores y distribución de parámetros hidrodinámicos (conductividad hidráulica, transmisividad, coeficiente de almacenamiento y porosidad eficaz entre otros), caracterización hidroquímica, definición del funcionamiento hidrogeológico del acuífero (con porosidad intergranular, asimilable a éste, kárstico, fisurado) identificando si procede, áreas diferentes dentro del acuífero.
- B. Distribución de las extracciones y de los recursos asignables a los diferentes usos. Volúmenes de explotación y regulación de caudales en cada captación en el entorno delimitado para asegurar el recurso en cantidad en las captaciones de abastecimiento urbano.

Las extracciones totales máximas en todo el acuífero en un año deben ajustarse a los recursos renovables medios del acuífero minorados por las regulaciones medioambientales y las concesiones ya existentes para abastecimiento y otros usos en el acuífero considerando el volumen restante como recursos asignables. Se pretende asegurar que los niveles piezométricos estén estables y sean asumibles a largo plazo y que los descensos de niveles que se produzcan puedan recuperarse por la recarga.

El volumen de agua necesario para el abastecimiento se obtiene mediante todas las captaciones de abastecimiento del municipio, distribuyéndose entre estas en función de su productividad y de la infraestructura de abastecimiento a la población (depósitos, tuberías...). Para garantizar el volumen a bombear en cada una de ellas hay que definir un área que permita suministrarlo de un modo estable.

La Norma parcial puede definir un área que incluya únicamente la captación o captaciones de abastecimiento del municipio o bien un área que incluya, además de esta, limitaciones por usos medioambientales, otras concesiones o incluso otros recursos asignables en su interior, definiendo limitaciones al volumen máximo, caudal y profundidad entre otros de cada captación o uso.

El tamaño de ese área de protección y las restriccio-

nes en su interior se obtienen sobre la base de la aplicación de la metodología expuesta en el apartado 6.7 empleando una combinación de criterios hidrogeológicos, métodos analíticos, ensayos de trazadores y, en su caso, modelos matemáticos.

El grado de precisión con que se puede definir en cada zona estudiada las regulaciones establecidas en el entorno de la captación para garantizar el volumen requerido depende de los métodos que se hayan aplicado para complementar los criterios obtenidos por el análisis hidrogeológico de detalle del acuífero. Así, por ejemplo, si ha podido efectuarse un modelo matemático, pueden simularse muchas más hipótesis de la respuesta a obtener en la captación a proteger ante posibles nuevas extracciones que si se emplean métodos analíticos junto con criterios hidrogeológicos.

En todo caso, y con el grado de detalle que permita el método empleado y la complejidad e interrelación de los diferentes usos, deberán concretarse, además del método mediante el que fueron definidos, los siguientes aspectos:

- Tamaño del área de protección, número de captaciones de abastecimiento incluidas y si incluye además otras concesiones o limitaciones medioambientales.
- Normas de señalización en el terreno del área de protección.
- Régimen de explotación: Volumen global máximo de extracción en la totalidad del área de protección definida, incluyendo en ese volumen las captaciones de escasa importancia (que son aquellas con un volumen anual extraído menor de 7.000 m³ y un caudal instantáneo menor de 1 L/s, que tengan instalado un equipo mecánico adecuado a las anteriores condiciones, o las que cumplan los requisitos indicados expresamente en los Planes Hidrológicos para cada acuífero o Unidad Hidrogeológica), así como el volumen y caudal máximo de extracción para captaciones distintas de la que es objeto de protección.
- Distancia mínima entre la captación de abastecimiento a proteger y otras captaciones, detallando el método que se ha empleado en su definición.
- Requisitos a cumplir para limpiar, modificar o perforar una captación que sustituya a otra que disponga de concesión, así como condiciones de clausura de la captación original.
- Profundidades de perforación de los pozos, sondeos y de instalación de bombas, detallando, en

acuíferos con problemas de intrusión salina la evaluación de su repercusión ante el posible avance del frente salino.

- Regulación de solicitudes a presentar ante el Organismo de cuenca correspondiente para obtener la preceptiva autorización de investigación para determinar la existencia de aguas subterráneas y las labores de perforación, alumbramiento y aforo de caudales y requisitos mínimos del proyecto de investigación.
- Normas de sellado de niveles acuíferos con mala calidad química que haga inadecuada su explotación para abastecimiento a poblaciones, a otros usos, con objeto de no contaminar el recurso hídrico disponible, así como normas referentes al abandono de pozos o de sondeos de investigación para evitar conexiones entre diferentes acuíferos y contaminaciones.
- Regulaciones a las obras civiles, detallando las restricciones a imponer en el área de protección de la captación de abastecimiento urbano a dichas obras (autopistas, trazados férreos, túneles, fosas, aparcamientos subterráneos, barreras impermeables bajo el nivel piezométrico y cimentaciones entre otras), así como las restricciones a actividades mineras (como el establecimiento de graveras), ya que pueden producir cambios en el nivel piezométrico, creando depresiones o modificando la dirección y sentido del flujo entre otros, produciendo afección a la captación a proteger (Rayne *et al.*, 2001).
- Mecanismos de revisión de la norma parcial ante nueva información que mejore el conocimiento del área a proteger y definición de una red de control para evaluar su correcto funcionamiento.

6.9.2. Propuesta de modificaciones legales relativas a los perímetros de protección de la calidad

El análisis del marco legal referente a la delimitación de perímetros de protección, efectuado en el capítulo 3, ha puesto de manifiesto, entre otros aspectos, la insuficiente atención, diversidad de criterios y de detalle con que han sido contemplados los perímetros de protección en los Planes Hidrológicos de cuenca, así como la escasa implementación real en el territorio de las restricciones a diversas actividades que contemplan.

La modificación de la Ley de Aguas, reflejada en su Texto Refundido (BOE, 2001 c), sin modificar ni derogar los artículos referentes a perímetros de protección en los reglamentos (R.D.P.H., 1986 y

R.A.P.A.P.H., 1988), hace imprescindible una modificación urgente de los mismos.

Se propone incluir, en el nuevo reglamento que desarrollará la Ley, las siguientes propuestas de modificaciones legales relativas a los perímetros de protección de la calidad, que contemplan integradamente el desarrollo metodológico propuesto para la delimitación de estos, y los resultados de su aplicación a las captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín en el acuífero del Terciario detrítico.

Definición del perímetro de protección

En el marco legal vigente en cada estudio de delimitación de perímetros de protección debe indicarse cuantas zonas se deben establecer, con qué criterios y las restricciones a imponer a las mismas. Se propone efectuar una regulación de los perímetros que dependa de las características del acuífero captado para el abastecimiento a la población: con porosidad intergranular o asimilable en su funcionamiento, kárstico, fisurado.

En los perímetros de protección de captaciones de abastecimiento en acuíferos en medios con porosidad intergranular, o asimilables en su funcionamiento a los mismos, se propone establecer reglamentariamente su división en tres zonas y los criterios para su delimitación. Sus características principales son:

- Zona inmediata o de restricciones absolutas

Su objetivo es impedir el acceso de personal no autorizado a la captación, por lo que estará vallada y convenientemente señalizado la prohibición de acceso a la misma.

El criterio de delimitación es un tiempo de tránsito de 1 día.

- Zonas próxima o de restricciones máximas

Tiene como objeto proteger contra la contaminación bacteriológica. Se delimitará en función de un tiempo de tránsito de 50 días, empleando métodos analíticos o modelos matemáticos, utilizando también criterios hidrogeológicos.

- Zona alejada o de restricciones moderadas

Su objetivo es proteger frente a contaminantes de larga persistencia. Se delimitará conforme a un tiempo de tránsito de varios años, empleando métodos analíticos o preferentemente modelos matemáticos, criterios de tipo hidrogeológico o una combinación de ambos.

En la propuesta de delimitación se justificará el tiempo de tránsito empleado, considerándose en

todo caso: los focos potenciales de contaminación, la vulnerabilidad del acuífero en el entorno de las captaciones, las características del abastecimiento a la población y la existencia de acuíferos alternativos al empleado para el mismo.

En cada propuesta de delimitación de perímetros de protección se justificará las restricciones que se proponen para las tres zonas indicadas con objeto de evitar la contaminación de las aguas captadas para abastecimiento. Estas contemplarán como mínimo los condicionamientos y prohibiciones a los que deben someterse las actividades urbanas, agrícolas, ganaderas, industriales, recreativas y las obras de infraestructura indicada en la tabla 45 en el capítulo 6.

En los acuíferos kársticos y en los fisurados es necesario adaptar la metodología y los criterios para establecer la zonación a sus especiales características como se analizará en los capítulos 7 y 8.

Procedimiento administrativo de delimitación, aprobación de zonas e implantación en el territorio de las regulaciones indicadas en los perímetros de protección

La propuesta efectuada sustituiría al actual procedimiento del artículo 173 del R.D.P.H. (BOE, 1986).

El documento en el que se propone la delimitación del perímetro de protección, cuyo procedimiento se iniciará de oficio en las áreas de actuación del Organismo de cuenca o a solicitud de la autoridad medioambiental, municipal o cualquier otra en que recaigan competencias sobre la materia, será elaborado conforme a las indicaciones metodológicas antes indicadas. Dicho documento deberá considerar la normativa urbanística actual de las zonas en que se subdivide el perímetro de protección y detallará las regulaciones propuestas en cada zona con objeto de evitar la contaminación de las captaciones de abastecimiento.

Será tramitado ante el Organismo de cuenca que, tras su evaluación y eventual modificación, lo remitirá a los Servicios de Ordenación del Territorio de los Ayuntamientos y las Comunidades Autónomas a los que pertenezca el área que delimita el perímetro. Estos emitirán informe sobre el perímetro de protección, especialmente respecto a su incidencia en la normativa urbanística, actual y prevista, de los terrenos afectados.

La propuesta de perímetro de protección con las eventuales modificaciones, fruto de los informes previos que, analizados conjuntamente por dichas administraciones y la proponente del perímetro, resulten compatibles con el objetivo de preservar la

calidad del agua captada para abastecimiento, serán objeto de trámite de información y audiencia pública ante posibles interesados.

La propuesta final será aprobada por la Junta de Gobierno del Organismo de cuenca, que la remitirá a las Comunidades Autónomas y Ayuntamientos afectados para que trasladen las restricciones indicadas para las diferentes zonas que componen el perímetro de protección a las normativas autonómicas y locales sobre ordenación del territorio y autorización de actividades clasificadas.

Se considerarán las áreas incluidas en los perímetros de protección como suelo no urbanizable sometido a un régimen especial de protección, justificado por

la necesidad de proteger el dominio público hidráulico, máxime ante su uso para abastecimiento a la población. Este procedimiento subsanaría los actuales problemas en la implantación real en el terreno de los perímetros de protección.

Se contemplará por último reglamentariamente la conveniencia de establecer un Plan de intervención, y su Protocolo de actuación, ante eventuales contaminaciones accidentales en el entorno del perímetro de protección, así como la necesidad de revisar los perímetros de protección ante nueva información significativa, no existente en la época en que se elaboró el perímetro, y en todo caso transcurrido un período máximo de cinco años desde su aprobación.

7. PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO URBANO EN MEDIOS KÁRSTICOS. MÉTODOS Y CONSIDERACIONES ESPECÍFICAS

La denominación de acuíferos kársticos, habitualmente empleada para referirse al conjunto de los existentes en materiales carbonatados, resulta imprecisa, ya que engloba acuíferos muy dispares en su funcionamiento, existiendo una gradación con numerosos estadios intermedios desde aquellos que funcionan de una manera similar a los acuíferos en medios con porosidad intergranular hasta aquellos en los que el agua circula por una auténtica red de conductos perfectamente desarrollados. Su diferente funcionamiento se debe a las variaciones en la estructura del medio acuífero, su régimen hidráulico y la capacidad de almacenamiento de agua. El análisis minucioso de dichos aspectos será por tanto básico para la elección de la metodología que debe aplicarse en la delimitación de los perímetros de protección.

En una primera aproximación a estos acuíferos puede aceptarse que existen tres tipos de medios, que corresponderían a los dos grandes grupos de

acuíferos descritos en la literatura anglosajona como sistemas de flujo difuso y sistemas de flujo por conductos, con una frontera no definida sino gradual. Son los siguientes:

- Medios con una saturación general en los cuales la fisuración, la microfisuración y la eventual porosidad intergranular cumplen las funciones de almacenamiento y conducción, siendo hidráulicamente continuos y asimilables a un medio con porosidad intergranular.
- Medios en los que el almacenamiento en la matriz rocosa es prácticamente inexistente, sin continuidad hidráulica ni saturación general. El agua de recarga circula por una red de conductos bien jerarquizada en el interior del macizo rocoso.
- Medios intermedios en los que las fisuras, microfisuras y porosidad intergranular tienen funciones de almacenamiento mientras que el drenaje se realiza a través de conductos (fracturas, discontinuidades ensanchadas, juntas de estratificación, discordancias y otros).

Las principales características que definen a los dos primeros grupos se recogen en la figura 55.

		Tipo de Acuífero	
		Kárstico (s.s.)	Flujo difuso
Heterogeneidad	Alta	→	Baja
Almacenamiento	Escaso	→	Elevado
Piezometría	Virtual, discontinua	→	Continua
Circulación	Por conductos Acuíferos colgados	→	Flujo difuso
Hidrogramas semilogarítmicos	Picos y zonas tendidas	→	Rectas (en ausencia de precipitaciones)
Infiltración	En puntos localizados	→	Uniforme
Regulación natural	Escasa	→	Elevada
Oscilaciones piezométricas	Grandes, nivel del agua profundo	→	Regulares, nivel del agua somero
Morfología kárstica	Abundante	→	Escasa
Mejora de la regulación	Difícil	→	Posible

Intermedio

Fuente: Tomado de Bayó Dalmau, 1986, en Moreno Merino, et al., 1991

Figura 55: Principales características de los tipos básicos de acuíferos carbonatados.

Por todo lo anteriormente indicado se considera necesario la utilización de metodologías específicas para el establecimiento de los perímetros de protección de captaciones de abastecimiento urbano en medios kársticos, contemplando la posibilidad de establecer adicionalmente a las zonas de restricciones absolutas, máximas y moderadas habitualmente empleadas *zonas de protección especial* (zonas que presentan comunicación directa con el área del acuífero donde se ubica la captación de abastecimiento aunque quede fuera, sin continuidad física, del ámbito geográfico definido por las otras tres zonas). En ellas se establecerían restricciones o condicionamientos específicos a las actividades que pudieran llevarse a cabo.

El análisis de las legislaciones y normativas aplicadas en otros países del entorno de España realizado en el capítulo 2 refleja que la necesidad de metodologías específicas para la delimitación de perímetros de protección en materiales kársticos así como el establecimiento de zonas de especial protección en éstos no se tiene en consideración de manera generalizada. En el caso de España tampoco se tienen en cuenta estos aspectos en las legislaciones aplicables, pero sí han sido recogidos en diversos trabajos (Moreno Merino *et al.*, 1991) como necesarios para la correcta delimitación de las zonas de que ha de constar el perímetro de protección.

Así en diversos países, entre los que se encuentran Francia, Irlanda, Italia, Dinamarca, Estados Unidos, Quebec en Canadá y Australia, no se consideran en absoluto las diferencias en la delimitación de perímetros de protección entre los acuíferos kársticos y aquellos que presentan porosidad intergranular. Por el contrario sí se encuentran recogidas estas diferencias, al menos a la hora de establecer zonas de mayor tamaño y por tanto mayor protección, en las normas de:

- Alemania: con definición de zonas de mayor tamaño (cuadro 1), específicas para acuíferos kársticos en las tres zonas que se contemplan, I, II y III (A y B).
- Reino Unido: se establecen tres zonas (cuadro 3), siendo las dos primeras de mayor tamaño que las consideradas para el resto de materiales, y se definen tanto aguas arriba como aguas abajo de la captación.
- Holanda: establece (cuadro 5) una primera zona con el criterio del tiempo de tránsito, similar al aplicado para acuíferos con porosidad intergranular, calculado mediante los parámetros correspondientes a éstos materiales y una segunda zona, combinación de la segunda y tercera habituales,

con restricciones similares a las aplicables a ésta última.

- Portugal: (cuadro 7) se establecen distancias mínimas en caso de que la captación se encuentre en materiales kársticos y máximas con un radio calculado con los parámetros del acuífero kárstico.
- Suiza: considera, entre otros factores, el desarrollo de la red kárstica para la estimación de la vulnerabilidad que define la extensión de las zonas S2 y S3.

Las *zonas de protección especial*, a establecer en caso de comunicaciones preferentes con el acuífero captado, se consideran únicamente en Francia (perímetros satélites con restricciones similares a las dos primeras zonas), en el Reino Unido (zonas no acuíferas que pueden transmitir contaminación a la captación) y en Portugal (zonas especiales con conexión hidráulica directa o a través de conductos kársticos o fisuras con el acuífero).

Además en varios de los países cuya legislación y/o normativa ha sido analizada (Irlanda, Suiza y provincia de Quebec en Canadá) se considera, para el dimensionamiento y establecimiento de los perímetros de protección, la utilización de diferentes métodos de análisis de la vulnerabilidad del acuífero adecuados a las características de estos acuíferos.

Así, en la delimitación de los perímetros de protección en medios kársticos, no asimilables a aquellos que presentan porosidad intergranular, ha de emplearse metodologías específicas desarrolladas para el establecimiento de los mismos, índices de cálculo de la vulnerabilidad del acuífero, empleo de trazadores como herramienta complementaria o modelos matemáticos.

En los siguientes apartados se expondrán las características específicas y las metodologías aplicables en los estudios de delimitación de perímetros de protección en acuíferos kársticos: métodos de cartografía de la vulnerabilidad (específicos para su utilización en medios kársticos o aplicables a éstos aunque con limitaciones) y empleo de trazadores para la determinación de las áreas de alimentación de la captación.

7.1. Vulnerabilidad de las captaciones en medios kársticos

Los mapas de vulnerabilidad a la contaminación son instrumentos básicos para la toma de acciones preventivas, correctivas o correctivas, con respecto al uso y ocupación del suelo, además de la explotación de los

recursos hídricos subterráneos. Su objetivo es la subdivisión gráfica del área en clases o categorías (de manera más o menos subjetiva) según la capacidad que tiene el medio subsuperficial para proteger el agua subterránea de acuerdo con las necesidades y criterios de los usuarios finales del mapa.

El concepto de vulnerabilidad de acuíferos y las bases para la cartografía de vulnerabilidad ante la existencia de contaminantes fueron establecidos en la década de los sesenta (Albinet y Margat, 1970).

El concepto de vulnerabilidad de aguas subterráneas se basa en la suposición de que el medio físico puede propiciar cierto grado de protección contra impactos naturales y humanos, con respecto a los potenciales contaminantes introducidos en el medio subterráneo. Esta no se puede medir de manera directa pero se puede determinar utilizando datos geológicos e hidrogeológicos y mediante la sensibilidad del acuífero a la contaminación de origen antrópico, difusa o puntual.

El concepto original de vulnerabilidad ha evolucionado a lo largo del tiempo, pasando a incluir factores como grado de protección contra contaminantes por la capa suprayacente al acuífero y el potencial de depuración del agua contaminada en el acuífero, condiciones de flujo subterráneo, condiciones climáticas y riesgos de contaminación por el tipo de uso y ocupación del suelo.

En 1993, el Committee on Techniques for Assessing Groundwater Vulnerability of the National Research Council (USA), definió el término vulnerabilidad de acuíferos a los contaminantes, como: *“la tendencia o la probabilidad de que los contaminantes alcancen una posición específica en el sistema de aguas subterráneas, después de la introducción en algún lugar de la superficie”*.

De manera frecuente se suelen emplear las clases de vulnerabilidad que se presentan en la tabla 50 (Fos-

ter y Skinner, 1994, en Heredia Díaz, 1995) junto con su definición.

Vrba y Zaporozec, 1994, definen la vulnerabilidad del agua subterránea como *“una propiedad intrínseca del sistema de agua subterránea que depende de su sensibilidad a los impactos naturales y antrópicos”*. Dentro de la vulnerabilidad se pueden diferenciar dos conceptos, vulnerabilidad intrínseca y vulnerabilidad específica.

En la actualidad en la Unión Europea se está desarrollando la *Acción COST 620 “Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers”* en la que se definen, Daly et al., 2002 en Andreo et al., 2002:

- Vulnerabilidad intrínseca: susceptibilidad del agua subterránea a la contaminación generada por la actividad humana en función de las características geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas de un área pero independientemente de la naturaleza de los contaminantes.
- Vulnerabilidad específica: susceptibilidad del agua subterránea a un contaminante o grupo de contaminantes concreto en función de las características de éstos y sus relaciones con los componentes de la vulnerabilidad intrínseca.

Las técnicas aplicables a la cartografía de la vulnerabilidad se pueden agrupar, básicamente, en tres grupos (Heredia Díaz, 1995):

- Métodos hidrogeológicos: la estimación de la vulnerabilidad se basa en el conocimiento que se tiene de la vulnerabilidad en áreas ya estudiadas.
- Métodos paramétricos: basados en la selección de los parámetros del medio representativos para la evaluación de la vulnerabilidad, se definen intervalos discretos y jerarquizados dentro de la variación de éstos y se les asigna un grado relativo de sensibili-

Tabla 50: Significado práctico de las clases relativas de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos.

CLASES	DEFINICIÓN
Muy Alta	Vulnerable a la mayoría de los contaminantes del agua con impacto bastante rápido en muchas situaciones de contaminación
Alta	Vulnerable a muchos contaminantes (excepto los adsorbidos o rápidamente transformados), en muchas situaciones de contaminación
Moderada	Vulnerable a algunos contaminantes pero sólo cuando se vierten o se lixivian
Baja	Sólo vulnerable a contaminantes persistentes a largo plazo y cuando éstos se vierten o lixivian de forma continua y dispersa
Muy Baja	Presencia de lechos confinados sin ningún flujo subterráneo significativo

dad a la contaminación. Su resultado suele ser la cuantificación de la vulnerabilidad. Su acoplamiento a Sistemas de Información Geográfica es muy accesible e interesante. Se pueden diferenciar:

- Sistemas de matrices, SM, (métodos aplicados en Irlanda).
 - Sistemas de valoración, SV, (índice GOD).
 - Sistemas de valoración y ponderación de parámetros, MVPP, (índices DRASTIC, DRASTIC Agrícola y método EPIK).
- Métodos basados en modelos numéricos y relaciones analógicas de distinto grado de vulnerabilidad.

Los métodos descritos en los siguientes apartados corresponden, en su mayoría, a los métodos paramétricos de cartografía de la vulnerabilidad.

Para el análisis y evaluación de la vulnerabilidad, hay que considerar principalmente los siguientes aspectos:

7.1.1. Procesos kársticos

Los acuíferos kársticos presentan características geomorfológicas y fenómenos hidrológicos particulares. Los aspectos geomorfológicos incluyen la existencia de sumideros, ausencia de redes de drenaje superficiales y presencia de redes de drenaje kársticas debido a la disolución de la roca. Las características hidrológicas incluyen grandes manantiales cuyos hidrogramas presentan recargas en pico, recesión rápida y flujos de base bajos. La calidad del agua refleja variaciones químicas en función de las tasas de descarga.

A nivel de cuenca se han hecho balances (Montañas del Jura suizo) que indican que, de la lluvia eficaz entre el 50 y el 75 % se infiltra de manera rápida mientras que el resto se infiltra en bloques de baja permeabilidad que son los que alimentan el flujo de base del acuífero. La infiltración rápida se produce normalmente a través de puntos de infiltración localizados, como sumideros, que conectan directamente con la red kárstica así como con el epikarst. En los países mediterráneos como España se estima que la infiltración media se aproxima al 50% de la precipitación caída en los acuíferos kársticos (Soulis, 1984 en Pulido Bosch, 2001).

La Dirección de Hidrogeología y Aguas Subterráneas del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en colaboración con el Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga han propuesto una clasificación tipológica de los acuíferos carbonáticos de la

Cordillera Bética que considera criterios de carácter geológico, climático, hidrogeológico y geomorfológico. Establecen así tipos homogéneos para estimar su recarga, definiendo herramientas para delimitarla en función de sus diferentes características. Sus resultados indican una tasa de recarga que oscila entre el 30% y el 60%, detallándose ésta para cada acuífero así como la metodología empleada (IGME y Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga, 2002).

7.1.2. Consecuencias de los procesos kársticos en la vulnerabilidad del agua subterránea

En condiciones de flujo de base, el agua que fluye a través de los bloques de baja permeabilidad suministra la mayor parte del agua de descarga del manantial. Este agua pasa un tiempo relativamente largo en el acuífero y fluye preferentemente por zonas de baja permeabilidad. En periodos de niveles de agua altos, más de la mitad del agua que se infiltra fluye rápidamente en el acuífero por los conductos principales. Los procesos de filtración tienen una influencia limitada en este momento y el potencial de disolución de contaminantes es generalmente alto. La vulnerabilidad del agua subterránea por tanto depende de las condiciones de infiltración así como de la distribución espacial de la conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento que juegan un papel principal en los procesos de flujo y transporte.

La distribución espacial de los parámetros del acuífero y su influencia en la vulnerabilidad de la captación están ligadas a dos parámetros principales en el campo: la red kárstica y el epikarst. Las redes kársticas tienen geometrías complejas debido a las numerosas influencias posibles en la formación del acuífero. Pueden estar más o menos desarrolladas y subdivididas como resultado de su historia geológica, hidrogeológica, química, física y biológica.

Los pozos y manantiales en medios kársticos son, en principio, muy vulnerables si existen una red kárstica y un epikarst bien desarrollados que estén directamente ligados a ellos. Son menos vulnerables si el epikarst no se relaciona directamente con la red del karst, en general la captación es menos vulnerable si el acuífero no contiene ni una red kárstica ni un epikarst, se puede entonces considerar como un acuífero fisurado no kárstico. Por todo ello, las zonas de protección no se deben delimitar bajo un único criterio, de hecho la implementación y uso de un método multiparamétrico que tenga en cuenta los procesos kársticos es esencial.

7.1.3. El papel de la cubierta de protección y las condiciones de infiltración

La cubierta del acuífero es uno de los parámetros de protección natural tenidos en cuenta generalmente para la cartografía de vulnerabilidad. Se considera generalmente que tiene influencia en la atenuación (Zaporozec, 1985 en OFEFP, 1998), dependiendo principalmente del espesor, textura/estructura, contenido en materia orgánica y minerales arcillosos, capacidad de intercambio catiónico, contenido en agua y conductividad hidráulica.

Las condiciones de infiltración determinan el modo en que se produce la recarga. Puede ser concentrada, intermedia o difusa. En los dos últimos casos viene dada por las propiedades de la escorrentía superficial (pendiente, coeficiente de escorrentía) y por la presencia de zonas de infiltración preferencial. Las condiciones de infiltración pueden influenciar en

la vulnerabilidad de las aguas kársticas de tres maneras:

- *Infiltración de la precipitación concentrada en sumideros y sus corrientes de alimentación.* Representa una vulnerabilidad muy elevada para todo el curso de agua hasta el punto de infiltración (Figura 56a).
- *Infiltración a través de una cubierta residual (karst soterrado).* La vulnerabilidad de estas áreas depende esencialmente de la permeabilidad de la cubierta de protección y su espesor y por tanto de su capacidad de infiltración (Figura 56b).
- *Infiltración difusa en todo el área (karst expuesto).* La vulnerabilidad dependerá esencialmente en el tiempo de tránsito del agua hasta llegar a la red kárstica a través del epikarst o de bloques de baja permeabilidad (Figura 56c).

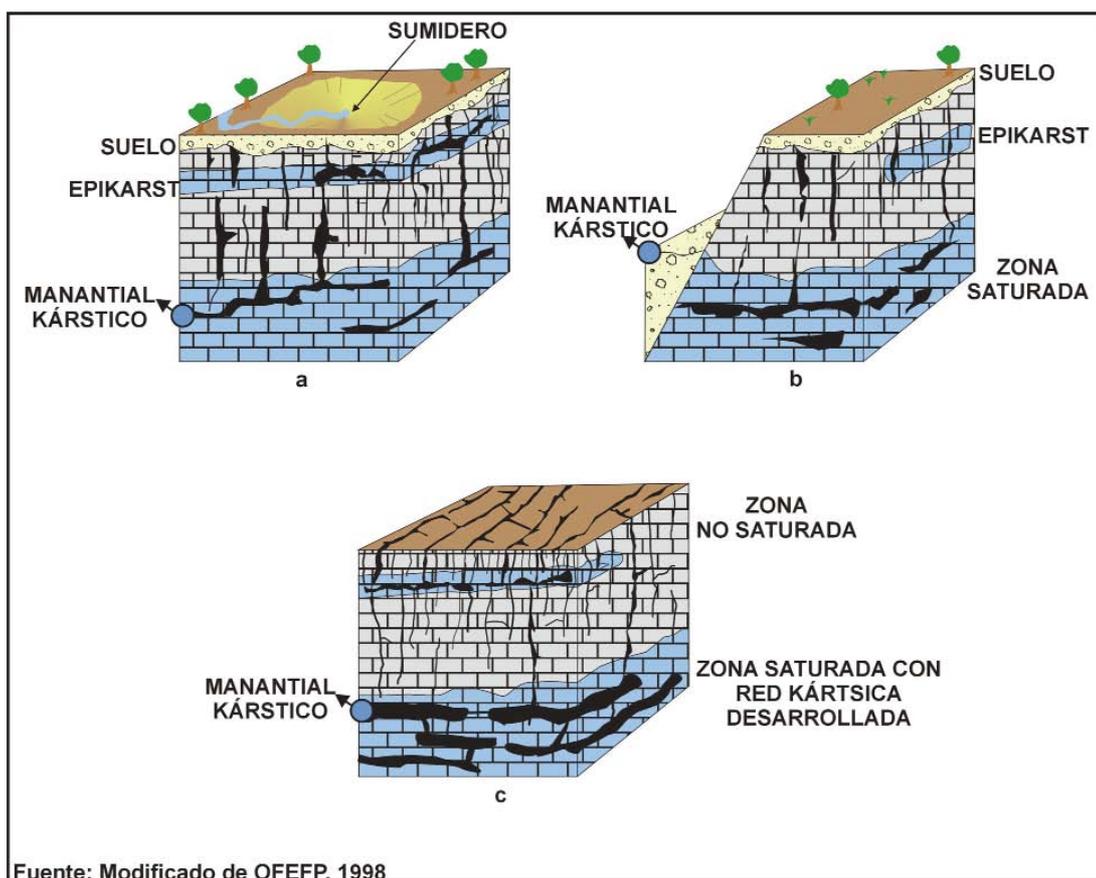


Figura 56: Algunos ejemplos de combinaciones de los principales factores de vulnerabilidad en un acuífero kárstico.

7.1.4. Características del epikarst

El Epikarst se define como una zona *altamente fisurada que corresponde a las formaciones descomprimidas y meteorizadas en las inmediaciones de la superficie del terreno* (Dodge, 1982 en OFEFP, 1998). Esta zona karstificada superior no es continua, puede ser de centimétrica a métrica y contener acuíferos colgados que pueden concentrar rápidamente el agua de infiltración que va hacia la red kárstica (Mangin, 1975 en OFEFP, 1998).

Se trata de una zona de alta conductividad hidráulica en los metros superiores de las formaciones carbonatadas directamente bajo el suelo. Se encuentra fracturada por la relajación de los esfuerzos tectónicos ligados a su emplazamiento y por tanto se favorece la alteración (Dodge, 1982 en OFEFP, 1998) y karstificación. Generalmente tiene un espesor de entre 0,5 y 2 metros (Bonacci, 1987 en OFEFP, 1998), pero puede llegar hasta 5 ó 10 m. Puede contener en su base acuíferos colgados temporales en los que la conductividad hidráulica es significativamente mayor que en los estratos inferiores. Esto permite al agua almacenada percolar a través de fisuras o drenar rápidamente a través de conductos verticales. El agua que fluye por esta zona tiene una componente horizontal preferente (a través de fracturas hacia conductos verticales) y una menor componente vertical debido a la infiltración en fisuras y flujo en conductos (Figura 57).

El epikarst se encuentra tanto en karst soterrados como expuestos, no necesariamente presenta extensión lateral, y puede existir debajo del suelo sin expresión morfológica en superficie.

7.2. Método EPIK

En los acuíferos kársticos la distribución de velocidades de flujo es altamente heterogénea, por lo que el riesgo de contaminación para el agua de abastecimiento no decrece de modo continuo con el aumento de la distancia a la captación, como sucede de manera general para acuíferos con porosidad intergranular. Además, las velocidades de flujo del agua en estos acuíferos varían notablemente con las condiciones atmosféricas. Por tanto el criterio de tiempo de tránsito, generalmente utilizado en la delimitación de perímetros en medios con porosidad intergranular o asimilables en su funcionamiento a los mismos, no es aplicable a los acuíferos kársticos.

La protección de las captaciones de abastecimiento urbano en acuíferos kársticos es una necesidad imperiosa en países en los que éstos tienen un papel importante en el abastecimiento de gran parte del país y las medidas de protección en los mismos, normalmente sin suficiente base hidrogeológica, han tenido un efecto limitado, por lo que no es raro que se produzca la contaminación del agua subterránea. Para remediar esta situación se ha desarrollado un método específico para este tipo de acuíferos (método EPIK), Office Fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP, 1998). El método no se basa en la evaluación de las velocidades de flujo, sino en la evaluación de cierto número de parámetros que caracterizan el grado de protección en diferentes partes del área de alimentación de la captación. Las zonas de protección se definen, de esta manera, en base a la vulnerabilidad del agua subterránea.

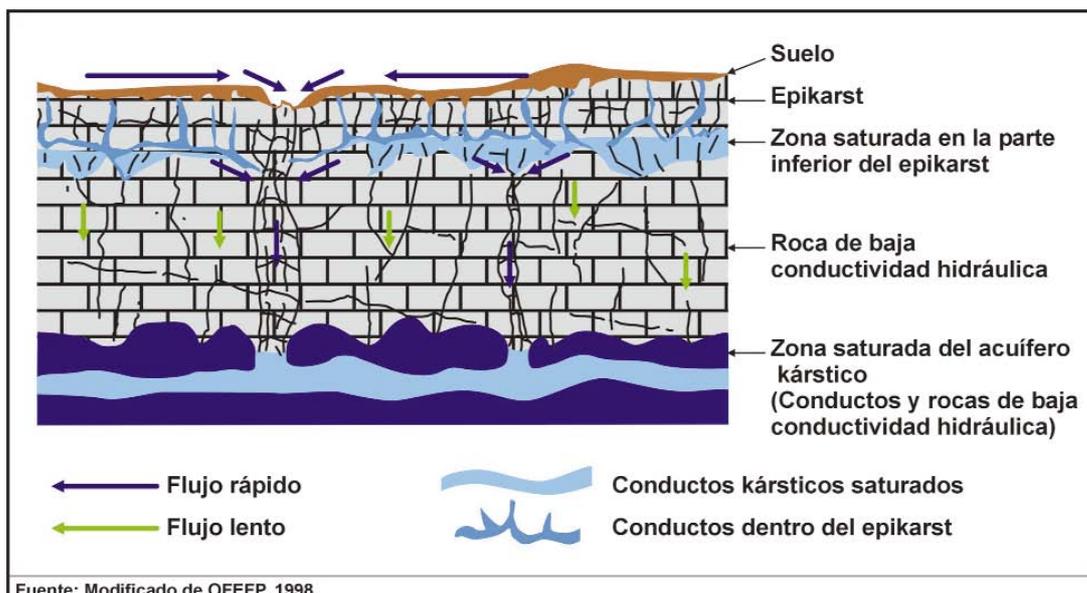


Figura 57: Representación esquemática de los procesos hidrogeológicos en el epikarst.

Se trata de un método de valoración y ponderación de parámetros (MVPP) que fue desarrollado por el Centro de Hidrogeología de la Universidad de Neuchâtel para la Agencia Suiza del Medio Ambiente, los Bosques y el Paisaje y con la colaboración del Servicio Hidrológico y Geológico Nacional de Suiza. La supervisión corrió a cargo de un grupo de trabajo de miembros de la Sociedad Suiza de Hidrogeología en colaboración con los anteriores.

EPIK (Doerfliger, 1996) es un método multiparamétrico, para la cartografía de vulnerabilidad del área de alimentación de un manantial o sondeo, que tiene en cuenta cuatro parámetros objetivos: desarrollo del Epikarst, ("E", la zona subsuperficial adyacente a la superficie, intensamente karstificada y con permeabilidad muy elevada), propiedades de la cubierta Protectora ("P"), condiciones de Infiltración ("I") que puede ser localizada o difusa y el desarrollo de la red Kárstica. ("K"). El método es independiente de los usos del suelo, presentes y futuros así como de consideraciones económicas.

El método se ha probado y ajustado en varios emplazamientos en Suiza, en diferentes ambientes geológicos y en los que debido a la agricultura se producen de manera regular problemas de contaminación, habiéndose valorado que permite una mejor protección de manantiales y pozos en ambientes kársticos, por lo que la OFEFP ha incorporado los resultados de estos estudios a la nueva Ordenanza de Protección del Agua de ese país, de 28 de octubre de 1998.

En los siguientes apartados se analizarán los diferentes aspectos que deben ser considerados, los datos y las etapas requeridos para la aplicación del método EPIK.

7.2.1. Principios y etapas en la aplicación del método multiparamétrico EPIK

El método EPIK, propuesto para evaluar la vulnerabilidad en ambientes kársticos, es un método que tiene en cuenta 4 parámetros: Epikarst, cubierta de Protección, condiciones de Infiltración y grado de desarrollo de la red Kárstica. Estos parámetros corresponden a aspectos específicos del régimen de flujo en un acuífero kárstico. El método indica la sensibilidad de un acuífero kárstico a las influencias naturales y antrópicas, determinándola de manera general y efectiva.

El método se lleva a cabo en tres etapas:

- Evaluación semicuantitativa y cartografía de cada uno de los cuatro parámetros

Se hace para cada unidad de área, después de la discretización en áreas elementales (de manera ideal dentro de una malla con cuadros de 20 metros de lado). Durante esta evaluación a cada parámetro se le asigna un rango de valores, desde uno a cuatro. Esta evaluación semicuantitativa de E, P, I y K se lleva a cabo con la ayuda de diferentes métodos de investigación, directos e indirectos, y se puede aplicar de manera global o local. Estos métodos incluyen ensayos de trazadores, geofísica, estudios geomorfológicos, análisis de hidrogramas de flujo, interpretación de fotografía aérea y perforación/excavación de los suelos de manera manual o mecánica.

- Cálculo del índice de protección F para cada punto del área

Se le asigna un valor a cada parámetro, ponderando el parámetro de acuerdo con su función protectora y se suman los valores obtenidos. Los mapas de los cuatro parámetros se han de superponer para obtener una representación cartográfica del índice F para el área completa. Dependiendo de las circunstancias, normalmente esta etapa se puede llevar a cabo de manera sencilla usando un Sistema de Información Geográfica.

- Delineación de las zonas de protección

Debido a la equivalencia entre el índice F y las zonas de protección, el mapa del índice de protección F puede ser transformado en un mapa representativo de las zonas de protección (S1, S2 y S3 en la legislación suiza, como ha sido detallado en el capítulo 2).

7.2.1.1. Evaluación de los parámetros E, P, I y K

Los aspectos a considerar en la evolución de cada parámetro (Doerfliger, 1996) son:

E - Epikarst

Su caracterización se basa en el estudio de las morfologías del terreno. En el apartado previo se comentó la dificultad en la caracterización de las zonas de epikarst, su desarrollo y conexión con las redes kársticas. Es particularmente difícil debido a que no existe un modelo específico de identificación de epikarst cubierto en el campo, ni siquiera mediante los métodos geofísicos actuales. El parámetro E se subdivide en tres categorías que indican vulnerabilidad decreciente:

- Categoría 1 (E₁)

Indica la situación de mayor vulnerabilidad. Se asocia a sumideros y depresiones con infiltración de agua, relieves de aspecto ruinoso y afloramientos intensamente fracturados (fotografía 14).

- Categoría 2 (E_2)

Zonas intermedias entre campos de dolinas y valles secos.

- Categoría 3 (E_3)

Incorpora el resto del área de alimentación, carente de los rasgos morfológicos ya mencionados.

La clasificación y/o evaluación de E en tres categorías, E_1 a E_3 , se hace principalmente mediante la cartografía de rasgos geomorfológicos. La mayor parte de la información necesaria se puede tomar de mapas topográficos a escalas 1:5.000, 1:10.000 ó incluso 1:25.000. Las fotografías aéreas también pueden servir como fuente de información complementaria. La verificación en el campo en el momento de cartografiar el resto de parámetros es imprescindible.

P – Cubierta de Protección

En este término se incluye el suelo (en sentido edáfico) así como otras formaciones geológicas que pueden estar por encima del acuífero kárstico, como depósitos cuaternarios (morrenas, limos, loess y rocas sueltas) o formaciones precuaternarias no kársticas (arcillas, areniscas, margas).

Los parámetros edáficos varían espacialmente, y no se obtienen fácilmente a partir de los suelos ni de los mapas (en el caso de que estos existan). Además las terminologías usadas por los científicos que se dedican a los suelos no se refieren a la función protectora de éstos (textura, contenido en materia orgánica o conductividad hidráulica).

Debido a razones de tipo económico no es posible cartografiar cada uno de estos parámetros aparte del resto con el objetivo de la delimitación de áreas de protección. Así, para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca, sólo se tiene en cuenta el espesor de la cubierta de protección (Doerfliger y Tâche, 1995 en OFEFP, 1998).

Las áreas de captación que contengan cubierta de protección se pueden identificar y separarse de las áreas que carecen de ella utilizando la información existente (mapas geológicos y monografías regionales). También se puede obtener información de la existencia de suelos mediante fotografías aéreas e imágenes de satélite, dependiendo de la resolución de éstas.



Morfologías kársticas con relieves ruinosos correspondientes a la categoría E_1 (14).

El espesor del suelo se puede medir directamente en el terreno utilizando una barrena manual para suelos. Si el área de captación no es excesivamente amplia el espesor del suelo se puede determinar utilizando una malla de muestreo regularmente espaciada. Si al área es grande ($> 15 \text{ km}^2$), el espaciado de la malla se hace más grande y es necesario aplicar el principio de equivalencia morfológica: para un punto particular, el espesor medido es asignado a todos los puntos en un cuadro de lados entre 100 y 200 m, suponiendo que las estas áreas tengan una morfología similar. Las excavaciones existentes, tales como las zanjas de drenaje pueden también ofrecer una importante información acerca del espesor de la cubierta.

Para la clasificación del parámetro P (Figura 58) se consideran dos casos, teniendo en cuenta si existen o no formaciones de baja conductividad hidráulica por debajo del suelo:

(A) **Suelo directamente sobre las formaciones calcáreas**, o sobre formaciones detríticas de grano grueso muy permeables (gravas o morrenas).

- Categoría 1 (P_1), representa una cubierta de 0 a 20 cm de suelo.

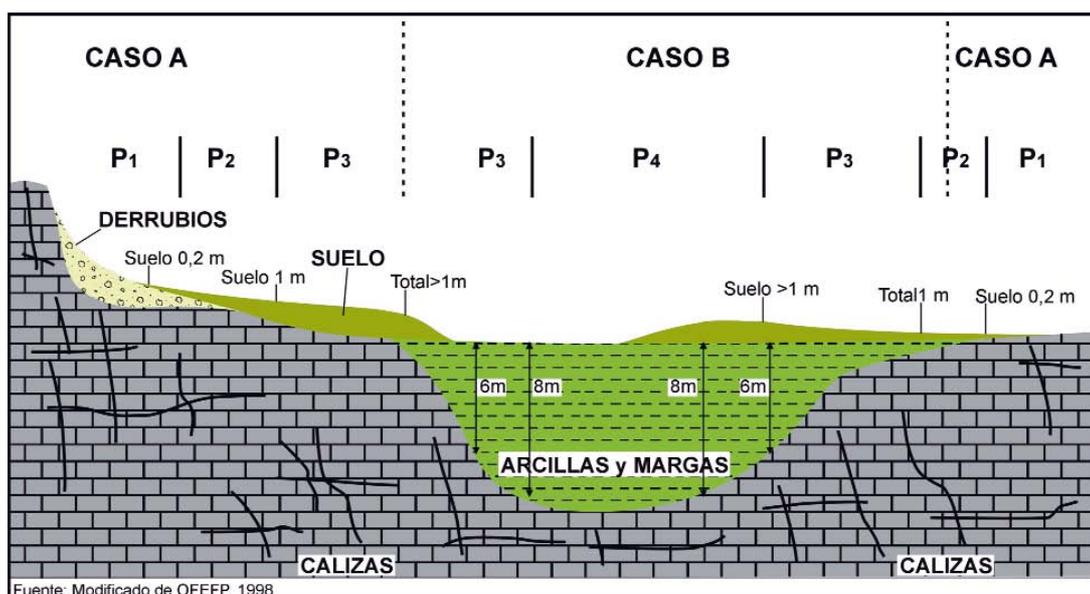


Figura 58: Ilustración de las diferentes coberturas de protección.

- Categoría 2 (P_2), representa una cubierta de 20 a 100 cm de suelo.
 - Categoría 3 (P_3), representa una cubierta de más de 100 cm de suelo.
- (B) **Suelo sobre formaciones geológicas de baja permeabilidad** (con al menos 20 cm de limos lacustres, arcillas o margas).
- Categoría 1 (P_1), se omite para formaciones de baja permeabilidad de menos de 20 cm, se considera que ofrecen una protección escasa. En este caso hay que referirse al caso A.
 - Categoría 2 (P_2), representa un espesor combinado del suelo con la formación de baja permeabilidad de entre 20 y 100 cm. Se considera que el suelo tiene un mejor efecto de protección que un espesor similar de la formación geológica de baja permeabilidad.
 - Categoría 3 (P_3), representa un espesor combinado de cubierta de protección de más de un metro. El suelo puede no existir, no obstante una fina capa de suelo puede aportar una importante protección si, comparativamente, la capa de baja permeabilidad es fina.
 - Categoría 4 (P_4), representa una cubierta de más de 8 m de formaciones de baja permeabilidad (muy limosas o arcillosas), o un suelo de más de un metro sobre más de seis metros de formaciones geológicas de baja permeabilidad. El espesor de las formaciones se determina mediante datos puntuales, por ejemplo sondeos.

I – Condiciones de Infiltración

La evaluación de las condiciones de infiltración se basa en la identificación de zonas de infiltración concentrada (sumideros o lechos de ríos temporales o perennes, zonas drenadas artificialmente) y la valoración de las zonas de *infiltración difusa*. Éstas últimas se caracterizan por un coeficiente de escorrentía que depende de la pendiente del terreno y del uso del suelo.

Basándose en una tabla de coeficientes de escorrentía como función de la pendiente y uso del terreno (bosque, pasto y tierra cultivable) establecida en Suiza (Sautier, 1984 en OFEFP, 1998), se estableció el límite entre coeficientes de escorrentía alta y baja en 0,22 para zonas de pastos y 0,34 para tierras cultivables (el coeficiente 0,34 es representativo de tierras cultivadas con surcos en la dirección de la pendiente). Para asignar categorías, estos valores se hicieron corresponder con pendientes del 25% y del 10% respectivamente. El parámetro I se valora de manera diferente para las áreas dentro y fuera del área de alimentación de los sumideros y corrientes asociadas; fuera de estas zonas las bases de las pendientes actúan como colectores de agua superficial.

Los datos necesarios para caracterizar las condiciones de infiltración se obtienen del estudio de las zonas de alimentación de los sumideros y cursos de agua mediante mapas topográficos. La delimitación de las pendientes críticas y bases de las pendientes se puede hacer manualmente mediante mapas topográficos. No obstante, si se dispone de un modelo numérico de altitud para el área del estudio, es más fácil la determinación de éstas zonas mediante el uso de un SIG.

Se distinguen cuatro categorías en la caracterización de I, que varían desde la más vulnerable I_1 hasta la menos vulnerable I_4 . Se consideran dos casos que corresponden al interior y exterior del área de alimentación de un curso de agua que alimenta un sumidero.

(A) **Dentro del área de alimentación de un sumidero y su curso de agua** (Figura 59)

- Categoría 1 (I_1), representa sumideros perennes y temporales así como las riberas y lechos de arroyos perennes y temporales que los recargan, arroyos que se infiltran y partes de la zona de alimentación drenadas artificialmente.
- Categoría 2 (I_2), representa las partes de la zona de alimentación de los sumideros o cursos de agua anteriormente señalados que no son drenados artificialmente y con elevado coeficiente de escorrentía, esto es, áreas en las que la pendiente es mayor del 10 % para zonas cultivables y mayor del 25 % en zonas de pastos y prados.
- Categoría 3 (I_3), representa las zonas del área de alimentación en las que no hay drenaje artificial y con un coeficiente de escorrentía bajo, es decir las áreas en las que la pendiente es menor del 10 % en zonas de cultivo y menor del 25 % en pastos y prados.

(B) **Fuera del área de alimentación de los sumideros y cursos de agua asociados** (Figura 60).

- Categoría 3 (I_3), representa las áreas en la base de las pendientes que recogen la escorrentía superficial, así como las pendientes que recargan estas zonas bajas (pendientes con un elevado coeficiente de escorrentía, mayor del 10 % en zonas de cultivo y mayor del 25 % en pastos y prados).
- Categoría 4 (I_4), representa el resto del área de alimentación.

K – Red Kárstica

La vulnerabilidad se evalúa en términos de la presencia o ausencia de una red kárstica y el grado de desarrollo de ésta. Para determinar la importancia de la red en relación al volumen de roca circundante de baja permeabilidad (fisurada o masiva) se tienen en cuenta diferentes indicadores.

El primer indicador es la *identificación directa* de los componentes de la red tales como cuevas, sumideros y sistemas de cuevas activos en el área de alimentación que se considera.

Si no existen indicadores de la red kárstica, se deben emplear *métodos indirectos*. Éstos se basan en el análisis de hidrogramas de flujo, interpretación de

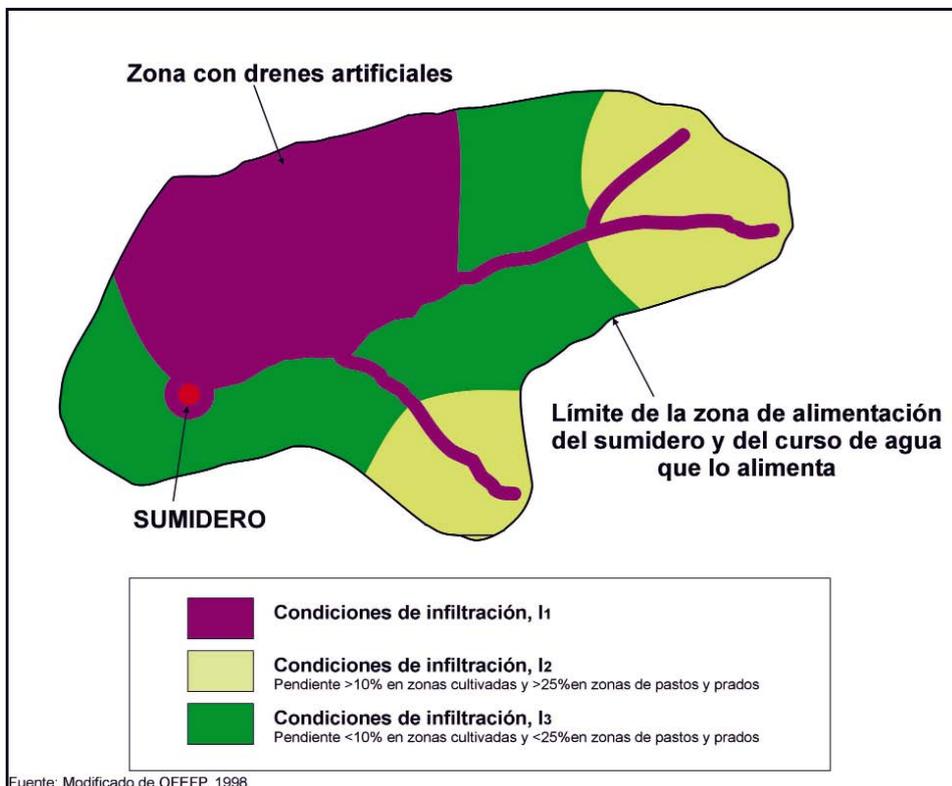


Figura 59: Condiciones de infiltración dentro del área de alimentación (caso A) de un sumidero y su curso de agua.

ensayos de trazadores y variabilidad de la calidad del agua.

- Los **hidrogramas de flujo** permiten interpretar el grado de desarrollo del acuífero kárstico y la estructura del acuífero. El tiempo de reacción de una captación a los acontecimientos de precipitación, determinado mediante un hidrograma es un indicador significativo para la caracterización del grado de desarrollo de la red kárstica. Si se observa una rápida recesión (una tasa de flujo significativa, al menos el doble del flujo de base, seguida por una rápida recesión) se puede suponer que existe una red kárstica. Se entiende por respuesta rápida, por ejemplo, una respuesta que se produce en un intervalo entre 6 y 12 horas (según el área de alimentación) tras una lluvia de una intensidad mayor de 15 mm. Esta regla no puede siempre ser aplicada si la evapotranspiración en la zona es importante.
- El tiempo de tránsito medio, que puede calcularse mediante la realización de **ensayos de trazadores**, es un indicador que permite establecer 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 en periodos de flujo elevado permiten asumir la existencia de una red kárstica.
- La variación de la **calidad del agua** en un manantial es un buen detector de la presencia o ausencia de red kárstica. Si la calidad del agua es bacteriológicamente estable tras precipitaciones de carácter fuerte, se infiere que la red kárstica se halla

escasamente desarrollada o está protegida por un medio con porosidad intergranular y el conjunto del sistema se debe de considerar como un sistema de rocas fisuradas. En caso de que esto no sea así se puede considerar la existencia de una red kárstica.

- Un indicador final viene dado por el **número de manantiales** presentes en el sistema kárstico. Un sistema bien desarrollado se caracteriza por la existencia de una única salida de descarga, mientras que un sistema pobremente desarrollado comúnmente tiene gran número de manantiales.

Al parámetro K se la asignan tres categorías, que en orden de vulnerabilidad decreciente son:

- Categoría 1 (K_1), para una red kárstica bien desarrollada, con conductos métricos a decimétricos con escasas obstrucciones y bien interconectados.
- Categoría 2 (K_2), para redes kársticas pobremente desarrolladas, con drenes o conductos bloqueados poco desarrollados y diámetro decimétrico o menor.
- Categoría 3 (K_3), para sistemas en los que la porosidad intergranular juega un papel en la filtración (el efecto protector puede ser verificado mediante un seguimiento continuado de la calidad del agua), así como para calizas fisuradas no karstificadas.

El parámetro K generalmente se aplica de manera global para todo el área de alimentación, sin embar-

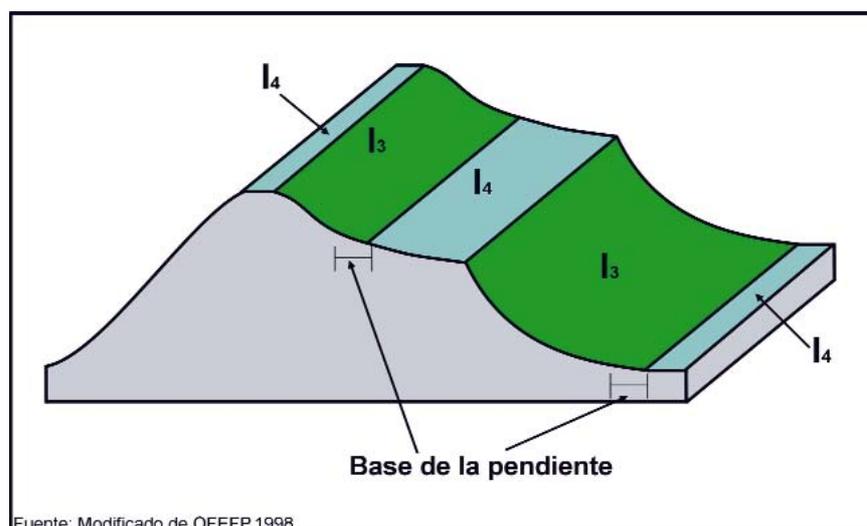


Figura 60: Condiciones de infiltración fuera del área de alimentación (caso B) de un sumidero y su curso de agua (pendientes suaves, pendientes pronunciadas y bases de las pendientes).

go se puede dividir en zonas más detalladas si el desarrollo de la red de karst puede ser caracterizado en detalle.

Sin la existencia de información espeleológica es difícil hacer la distinción entre K_1 y K_2 . Si se tiene al menos un hidrograma de flujo anual se puede aplicar el método de Mangin de clasificación de acuíferos kársticos. Éste se basa en la capacidad de regulación de los acuíferos, k , y en el parámetro de infiltración, i . El parámetro k se define como la relación entre el volumen dinámico máximo (calculado mediante la integración entre el comienzo de la recesión y el infinito) y el volumen total que fluye durante un ciclo hidrológico medio. El parámetro i (ver definición en figura 61) expresa la importancia en el retardo en el agua de infiltración que llega al punto de descarga. Se distinguen cinco clases. Las clases I, II y III se pueden asociar a la categoría K_1 , la clase IV a la categoría K_2 y la clase V con la categoría K_3 . Sin embargo es importante hacer notar que esta clasificación no es siempre inequívoca, mientras el parámetro k varía poco entre captaciones el parámetro i depende fuertemente de la lluvia caída que genera la descarga. La diferenciación entre K_1 y K_2 según este método no depende únicamente del sistema acuífero.

Resumen de la evaluación de los parámetros E, P, I y K.

En la tabla 51 se resumen las categorías de los cuatro parámetros EPIK y se esboza la evaluación de cada uno.

7.2.1.2. Cálculo del Índice de Protección F

Los cuatro parámetros valorados previamente permiten el cálculo de un índice de protección, F , para cada punto del área de alimentación. El cálculo se lleva a cabo mediante la ecuación:

$$F = \alpha \cdot E_i + \beta \cdot P_i + \gamma \cdot I_i + \delta \cdot K_i$$

en donde: F es el índice de protección, $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ son los coeficientes de ponderación para cada parámetro y E_i, P_i, I_i, K_i son los valores que toma cada parámetro.

Asignación de valores a las categorías

Para definir las categorías de la ecuación, se tienen que tomar en consideración diversos aspectos como:

- Una dolina con una cubierta gruesa de suelo ($E_1 + P_3$) representa una situación de mayor vulnerabilidad que un estrato de calizas masivas cubiertas por una capa fina de suelo.
- Un curso de agua superficial que fluye hacia un sumidero (I_1) representa una situación de alta vulnerabilidad, independientemente de la cubierta protectora.
- Un valle seco (E_2) representa una situación tan vulnerable como la base de una pendiente que actúa como colector de la escorrentía superficial.

Los valores que se utilizan para el cálculo del índice de protección son los mostrados en la tabla 52.

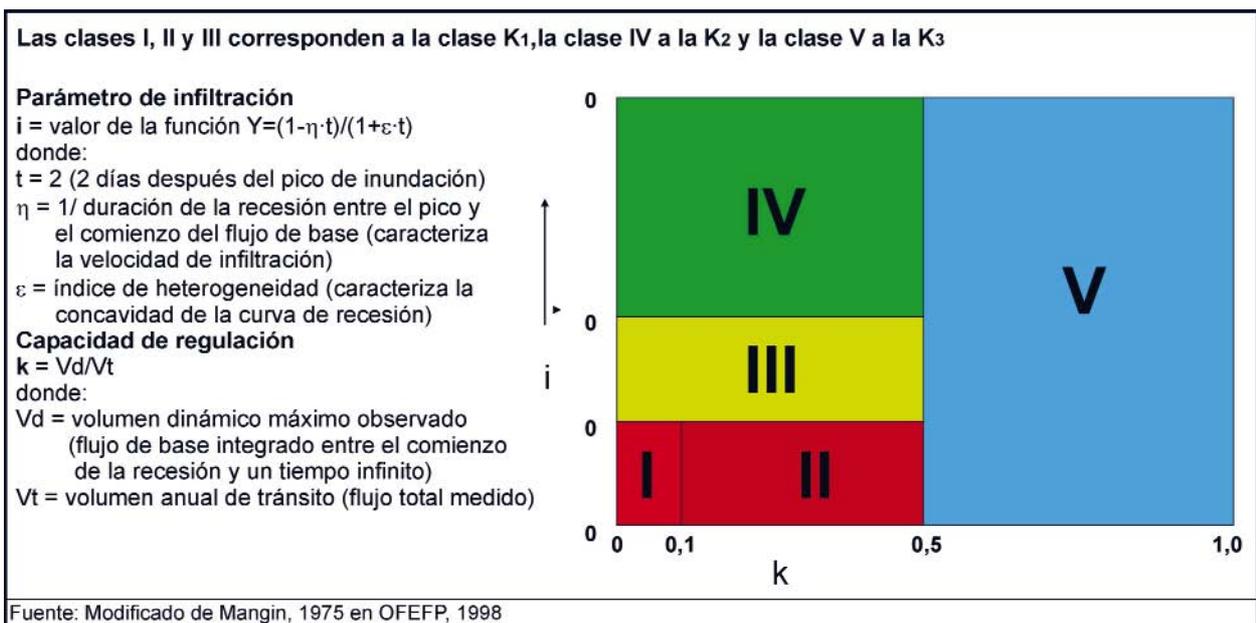


Figura 61: Clasificación de acuíferos kársticos.

Tabla 51: Subdivisión de los cuatro parámetros EPIK.

Morfología kárstica observada (correspondiente al epikarst). Morfología kárstica ausente.	E₁	Cuevas, sumideros, dolinas, lapiazes, relieves ruinosos, cuevas.	
	E₂	Zonas intermedias situadas en alineaciones de dolinas, uvalas, valles secos, cañones y poljes.	
	E₃	Resto del área de alimentación.	
Ausencia de cubierta de protección.		A. Suelo directamente sobre las formaciones calcáreas o formaciones detríticas con muy alta conductividad hidráulica*.	B. Suelo sobre más de 20 cm de formación geológica de baja conductividad hidráulica**.
	P₁	0 – 20 cm de suelo.	
	P₂	20 – 100 cm de suelo.	20 – 100 cm de suelo y formaciones de baja conductividad hidráulica.
	P₃	> 1 m de suelo.	> 1 m de suelo y formaciones de baja conductividad hidráulica.
	P₄		> 8 m de formaciones de baja conductividad hidráulica o > 6 m de formaciones de baja conductividad hidráulica con > 1 m de suelo (medidas puntuales necesarias).
Importante cubierta de protección.			
Infiltración concentrada.	I₁	Sumideros perennes o temporales – riberas y lechos de cursos de agua perennes o temporales que alimentan a los sumideros, con infiltración de agua superficial – zonas del área de alimentación del curso de agua con drenaje artificial.	
	I₂	Zonas del área de alimentación del curso de agua que no son drenadas artificialmente y en las que la pendiente es mayor del 10 % para zonas de cultivo y del 25 % para pastos y prados.	
	I₃	Zonas del área de alimentación del curso de agua que no son drenadas artificialmente y en las que la pendiente es menor del 10 % para zonas de cultivo y del 25 % para pastos y prados. Fuera del área de alimentación de los cursos de agua: las bases de las pendientes y pendientes pronunciadas (pendiente mayor del 10 % para zonas de cultivo y del 25 % para pastos y prados) en las que se filtra el agua de escorrentía.	
Infiltración difusa.	I₄	Resto del área de alimentación	
Red kárstica bien desarrollada.	K₁	Red kárstica bien desarrollada, con conductos decimétricos a métricos con escaso relleno y bien conectados.	
Red kárstica poco desarrollada.	K₂	Red kárstica pobremente desarrollada, con conductos o drenes de tamaño decimétrico o menor pobremente interconectados o rellenos.	
Acuífero mixto o fisurado.	K₃	Zona de descarga en medio con porosidad intergranular con una posible influencia de protección – acuífero fisurado no kárstico.	

* Ejemplos: gravas, morrenas glaciares laterales

** Ejemplos: limos, arcillas

Tabla 52: Valores de las categorías E, P, I, K.

E ₁	E ₂	E ₃	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	K ₁	K ₂	K ₃
1	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3

Los valores más bajos indican la situación más vulnerable.

Coefficientes de ponderación

Los parámetros E (epikarst) e I (condiciones de infiltración) son considerados como los más importantes, son los que más contribuyen al factor de protección, F, y tienen un coeficiente elevado (α y $\gamma = 3$). El parámetro P (cubierta de protección) tiene menor influencia en el índice de protección y un menor

peso ($\beta = 1$). El parámetro K (desarrollo de la red kárstica) tiene un peso intermedio ($\delta = 2$). Los coeficientes de ponderación para todos los parámetros se muestran en la tabla 53.

Tabla 53: Coeficientes de ponderación asignados a los parámetros E, P, I, K.

Parámetro	E	P	I	K
Coefficiente de ponderación	α	β	γ	δ
Peso relativo	3	1	3	2

Índice de protección

Las posibles soluciones diferentes ofrecen valores de protección F que varían entre 9 (máxima vulnerabili-

dad) y 34 (mínima vulnerabilidad) para el índice. Mediante el conocimiento del valor de F para cada punto del área de alimentación de la captación, es posible representar este índice de manera cartográfica. Un índice de protección elevado representa una protección elevada y una baja vulnerabilidad. En la tabla 54 se muestran los diferentes valores de F y se agrupan en tres clases como una función de su relación con las zonas de protección S1 (restricciones absolutas), S2 (restricciones máximas) y S3 (restricciones moderadas), definidas en la legislación suiza como se indicó en el capítulo 2. Las situaciones que no es posible encontrar en el campo se sitúan en una categoría adicional. Corresponden a la combinación de $I_1 + E_1 + P_{3,4}$ (un sumidero en una dolina con una gruesa cubierta de suelo).

Las agrupaciones de P_4 y E_1 son escasas o difíciles de detectar. Las de E_1 e I_4 (lapiáz/cuesta fuera del área de alimentación de un sumidero o pequeño arroyo) son inusuales. Las agrupaciones más comunes son las de E_3 o E_2 con I_4 , I_3 o I_2 .

7.2.1.3. Delineación de las zonas de protección

La equivalencia entre el índice F y las zonas de protección fue objeto de un estudio intensivo durante el desarrollo del método en las zonas piloto utilizadas. Las cuestiones que han determinado esta equivalencia son las siguientes:

- Los sumideros y, en donde sea aplicable, los cursos de agua que los alimentan (I_1) se deben clasificar como S1.
- Las dolinas, lapiaces y cuevas (E_1) deberían ser en general cartografiados como S1, pero donde exista una cubierta de suelo potente y en el caso de que se encuentren fuera del área de alimentación de un sumidero, se deberían de cartografiar como S2.
- Los valles secos deberían, como regla general, ser clasificados dentro de la zona S2.
- Las áreas en que el índice de protección es mayor de 25 deberían ser clasificadas dentro de la zona S3.
- Las áreas con un valor del índice de protección mayor de 25 y que presentan una cubierta protectora significativa (P_4 , verificada mediante métodos apropiados de investigación) deberían ser clasificadas fuera de las zonas de protección S (dentro de la categoría "resto del área de alimentación").

Durante el desarrollo del método, su aplicación y comparación de estos parámetros a diferentes ejemplos mostraron que los límites del índice F estaban alrededor de la zona S1 (F entre 9 y 19 para una red kárstica bien desarrollada, K_1 , y entre 11 y 21 para una red pobremente desarrollada, K_2) y alrededor de 25 para la zona S2 (F entre 20 y 24 para K_1 y entre

Tabla 54: Valores del índice de protección, F.

$K_1 = 1$	$I_1 = 1$			$I_2 = 2$			$I_3 = 3$			$I_4 = 4$		
	$E_1 = 1$	$E_2 = 3$	$E_3 = 4$	$E_1 = 1$	$E_2 = 3$	$E_3 = 4$	$E_1 = 1$	$E_2 = 3$	$E_3 = 4$	$E_1 = 1$	$E_2 = 3$	$E_3 = 4$
$P_1 = 1$	9	15	18	12	18	21	15	21	24	18	24	27
$P_2 = 2$	10	16	19	13	19	22	16	22	25	19	25	28
$P_3 = 3$		17	20	14	20	23	17	23	26	20	26	29
$P_4 = 4$		18	21	15	21	24	18	24	27	21	27	30
$K_2 = 2$	$I_1 = 1$			$I_2 = 2$			$I_3 = 3$			$I_4 = 4$		
	$E_1 = 1$	$E_2 = 3$	$E_3 = 4$	$E_1 = 1$	$E_2 = 3$	$E_3 = 4$	$E_1 = 1$	$E_2 = 3$	$E_3 = 4$	$E_1 = 1$	$E_2 = 3$	$E_3 = 4$
$P_1 = 1$	11	17	19	14	20	23	17	23	26	20	26	29
$P_2 = 2$	12	18	20	15	21	24	18	24	27	21	27	30
$P_3 = 3$		19	21	16	22	25	19	25	28	22	28	31
$P_4 = 4$		20	22	17	23	26	20	26	29	23	29	32
$K_3 = 3$	$I_1 = 1$			$I_2 = 2$			$I_3 = 3$			$I_4 = 4$		
	$E_1 = 1$	$E_2 = 3$	$E_3 = 4$	$E_1 = 1$	$E_2 = 3$	$E_3 = 4$	$E_1 = 1$	$E_2 = 3$	$E_3 = 4$	$E_1 = 1$	$E_2 = 3$	$E_3 = 4$
$P_1 = 1$	13	19	22	16	22	25	19	25	28	22	28	31
$P_2 = 2$	14	20	23	17	23	26	20	26	29	23	29	32
$P_3 = 3$		21	24	18	24	27	21	27	30	24	30	33
$P_4 = 4$		22	25	19	25	28	22	28	31	25	31	34



Situación inexistente en el campo
 Valores del índice de protección correspondientes a la zona de protección S1
 Valores del índice de protección correspondientes a la zona de protección S2
 Valores del índice de protección correspondientes a la zona de protección S3
 Condiciones aplicables al resto del área de alimentación

22 y 26 para K_2). Los valores de F para S3 varían entre 26 y 31 y los del *resto del área de alimentación* entre 26 y 34 (con la presencia adicional de las categorías P_4 e $I_{3,4}$).

Para una definición estricta del método ver las relaciones de la tabla 55, que presenta también una clasificación en términos de vulnerabilidad (desde muy alta hasta baja).

Tabla 55: Relación de equivalencia entre el índice de protección, F, y las zonas de protección del agua subterránea, S.

Vulnerabilidad	Índice de protección	Zona de protección S
Muy alta	F entre 9 y 19	S1
Alta	F entre 20 y 25	S2
Moderada	F mayor de 25	S3
Baja	F mayor de 25, con la presencia de las categorías $P_4 + I_{3,4}$	Resto del área de alimentación

7.2.1.4. Ajuste del método y verificación

Los valores de las categorías y los coeficientes de ponderación, así como los valores limitantes del índice de protección, se establecieron de manera experimental. Las áreas de estudio se localizan en la Montañas del Jura Plegadas (St. Imier), las Montañas del Jura Tabulares (Bure), los Prealpes Medios (St. Gingolph) y los Alpes Helvéticos (Lenk).

Los resultados han sido comprobados en dichos emplazamientos, en parte mediante ensayos de trazadores e investigaciones geofísicas de detalle de áreas de baja a alta vulnerabilidad. El objetivo de estas comprobaciones fue el verificar que los valores de las categorías escogidas y los coeficientes de ponderación están definidos de manera adecuada, así como los límites para la equivalencia entre el grado de vulnerabilidad y las zonas de protección. Los resultados indicaron que los valores propuestos son coherentes y precisos. El sistema es aplicable en general a las zonas en que se ha probado (en Suiza).

En la práctica no parece necesario llevar a cabo en cada lugar verificaciones de la vulnerabilidad usando métodos complementarios (geofísica y trazadores). Sin embargo si el índice de protección pareciera inapropiado en alguna situación geológica o hidrogeológica, el geólogo o hidrogeólogo puede justificar estas investigaciones de verificación.

Trabajos posteriores (Muguerza, 2001) enmarcados dentro de la acción COST 620, "Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers", han puesto en duda la efectividad de la

aplicación del método EPIK para la delimitación de las zonas que han de componer los perímetros de protección, debido a los problemas que se plantean al aplicarlo en zonas de características diferentes a aquéllas para las que fue desarrollado. Éstos según su análisis son los siguientes:

- El método de ponderación es contradictorio.
- No se considera el efecto de *bypass* en los sumideros.
- Las condiciones previas para la aplicación del método no siempre se cumplen.
- No está definido para todas las situaciones hidrogeológicas.
- Los asentamientos humanos no se consideran.
- La transformación del mapa de vulnerabilidad en zonas de protección es considerada dudosa.
- El epikarst no tiene que ser necesariamente activo aunque esté presente.

A continuación se desarrollarán, de manera resumida, dos de las propuestas de cartografía de la vulnerabilidad desarrolladas dentro de la mencionada Acción COST 620, no desarrollados específicamente para la delimitación de perímetros de protección sino para el desarrollo de un método de cartografía de la vulnerabilidad flexible y aplicable a todos los ambientes hidrogeológicos, incluyendo todos los acuíferos kársticos a nivel del área de alimentación.

No obstante, la combinación de estos métodos con el tiempo de tránsito del agua y los contaminantes dentro de la zona saturada puede ayudar a la delimitación de las zonas de protección de los perímetros de protección de captaciones de abastecimiento.

7.3. Método PI

El método PI ha sido desarrollado en el Departamento de Geología Aplicada de la Universidad de Karlsruhe, Alemania, (Goldscheider *et al.*, 2000) y probado en el karst de Engen. Se trata de un método desarrollado dentro de la Acción COST 620 y que utiliza un modelo convencional:

Fuente → Trayectoria → Objetivo

Siendo la fuente el punto de liberación potencial del contaminante, el objetivo el agua que se ha de proteger y la trayectoria todo el camino que ha de recorrer el contaminante hasta llegar al agua.

Este método es una aproximación, apoyada en Sistemas de Información Geográfica, para la cartografía de la vulnerabilidad en todo tipo de acuíferos pero especialmente en los kársticos.

El método considera (Figura 62) para el cálculo del factor de protección, PI, los siguientes parámetros:

- Factor P, que describe la efectividad de la cubierta protectora, calculada principalmente a partir del espesor y conductividad hidráulica de los estratos situados entre la superficie del terreno y la superficie del agua subterránea, diferenciando cuatro tramos:
 - Suelo.
 - Subsuelo.
 - Sustrato no kárstico.
 - Sustrato kárstico.

Este factor se calcula mediante la aplicación del método GLA (Hölting *et al.*, 1995) modificado (Figura 63) y se obtienen cinco clases diferentes, con valores del factor P entre 1, que indica un valor de protección extremadamente bajo, y 5, que indica la existencia de una cubierta protectora muy efectiva. La modificación básica del método PI con respecto al método GLA corresponde al factor F (fracturación), de modo que sea posible describir el desarrollo del epikarst y su influencia en la vulnerabilidad del agua.

En el cálculo de este factor, se considera siempre como profundidad del agua subterránea la del acuífero que se encuentre por encima, incluso si no es éste el que se desea proteger, debido a que cualquier contaminante deberá primero pasar a través de él.

- Factor I, que indica el grado en que la cubierta protectora es traspasada por concentraciones de flujo

superficiales, especialmente en el área de alimentación de los cursos de aguas superficiales.

No se trata de un factor definido hidrogeológicamente de manera precisa. Es una herramienta semicuantitativa para expresar la vulnerabilidad del agua subterránea producida por el traspaso de la cubierta protectora por flujos de agua superficiales y por flujos de agua laterales próximos a la superficie.

El cálculo del factor I se hace en tres pasos (Figura 63):

- Determinación de las propiedades del suelo, clasificándolos en seis tipos diferentes según la distancia al agua subterránea y la conductividad hidráulica del suelo saturado.
- Determinación del factor I', a partir del anterior y la pendiente, que estima la infiltración directa a partir de los flujos superficial y subsuperficial, controlada por las propiedades del suelo, la pendiente y la vegetación.
- Combinación del mapa de superficie del área de alimentación, que indica las áreas de alimentación de cursos de agua que se infiltran en sumideros y "zonas laterales de precaución" de 10 y 100 m a ambos lados de éstos, y el factor I'.

El factor I varía entre 0 ó 0,2, que indica un grado de traspaso de la cubierta muy alto, y 1,0, que indica un grado muy bajo.

El factor de protección PI final a partir del cual se elaborará el mapa de vulnerabilidad del acuífero se cal-

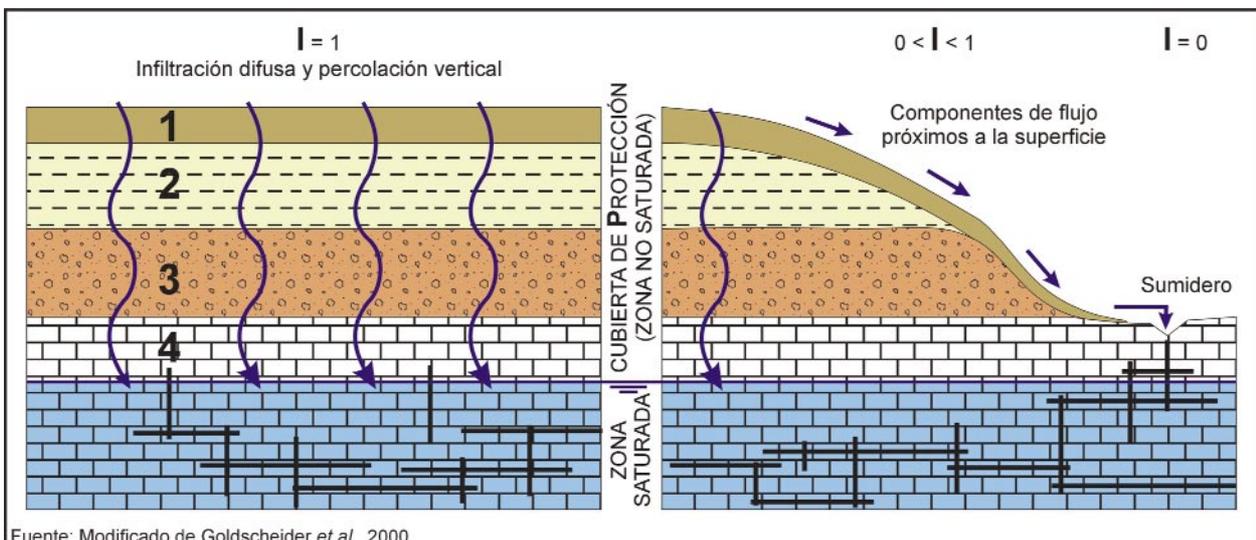


Figura 62: Ilustración del método PI (factor P y factor I).

cula mediante el producto de los factores P e I, obteniéndose valores entre 0 (vulnerabilidad muy alta) y 5 (vulnerabilidad muy baja).

En la Universidad del País Vasco se ha llevado a cabo un estudio de la Unidad Hidrogeológica de Albitzur, en Guipúzcoa, (Muguerza, 2001) dentro de la misma Acción COST 620 aplicando el método PI con modificaciones (denominándolo método europeo o método OC), así como el método EPIK que permite

establecer una comparación entre los resultados que proporcionan ambos.

De la misma manera los Grupos de Hidrogeología de la Universidad de Málaga y de la Universidad de Karlsruhe han aplicado los métodos PI y COP para obtener la cartografía de vulnerabilidad intrínseca de la Sierra de Líbar realizando un estudio comparativo entre ambos (Andreo *et al.*, en prensa).

Cálculo del factor P

Suelo (T)

Capacidad de campo (mm) hasta 1 m de profundidad	T
> 250	750
> 200 - 250	500
> 140 - 200	250
> 90 - 140	125
> 50 - 90	50
0 - 50	10

Recarga (R)

Recarga (mm/año)	R
0 - 100	1,75
> 100 - 200	1,50
> 200 - 300	1,25
> 300 - 400	1,00
> 400	0,75

Subsuelo (S)

Tipo de subsuelo (distribución del tamaño de grano)	S
Arcillas	500
Arcillas limosas orgánicas poco plásticas	400
Arcillas ligeramente arenosas	350
Arcillas limosas, limos orgánicos arcillosos poco plásticos	320
Limos orgánicos arcillosos	300
Arcillas muy limosas, arcillas arenosas	270
Limos muy orgánicos	250
Limos orgánicos ligeramente arcillosos, limos orgánicos arcillosos poco plásticos	240
Limos muy arcillosos poco plásticos, limos poco plásticos	220
Arcillas muy arenosas, limos orgánicos arenosos poco plásticos, limos orgánicos ligeramente arenosos, limos orgánicos poco plásticos, limos arcillosos poco plásticos	200
Limos orgánicos arenosos, limos poco plásticos ligeramente orgánicos	180
Limos ligeramente arcillosos poco plásticos, limos arenosos ligeramente orgánicos poco plásticos, limos orgánicos muy arenosos	160

Tipo de subsuelo (distribución del tamaño de grano)
Arenas muy arcillosas, arenas arcillosas, arenas limosas orgánicas
Limos arenosos poco plásticos, arenas orgánicas muy limosas
Arenas orgánicas, arenas limosas poco plásticas
Arenas ligeramente arcillosas, arenas limosas, gravas arenosas
Arenas ligeramente orgánicas, gravas arenosas ligeramente plásticas
Arenas ligeramente plásticas, arenas ligeramente plásticas con
Arenas
Arenas con gravas, gravas arenosas
Gravas, gravas con brechas
Material volcánico (pirocástico) sin litificar
Turba
Sapropel

Litología (L)

Litología	L
Lutitas, pizarras, margas	20
Areniscas, cuarcitas, rocas volcánicas, plutónicas y metamórficas	15
Areniscas y rocas volcánicas porosas	10
Conglomerados, brechas, calizas, dolomías, evaporitas	5

Fracturación (F)

Fracturación
No fracturado
Ligeramente fracturado
Moderadamente fracturado, ligeramente karstificado o formas kársticas totalmente tapadas
Moderadamente kárstico o formas kársticas tapadas en su mayor parte
Muy fracturado o muy karstificado y desnudo
Epikarst muy desarrollado
No conocido

Espesor de cada estrato en m (M)

Sustrato (B)

$$B=L \cdot F$$

(Presión Arterial) (A) 1500 pur

$$P_{Ts} = \left[T + \left(\sum_{i=1}^m S_i \cdot M_i + \sum_{j=1}^n B_j \cdot M_j \right) \right] \cdot R + A$$

(* No considerado en otros trabajos)

Valor P _{TS}	Efectividad de la cubierta de protección	Factor P
0 - 10	Muy baja	1
> 10 - 100	Baja	2
> 100 - 1000	Media	3
> 1000 - 10000	Alta	4
> 10000	Muy alta	5

MAPA P

Figura 63: Diagrama para el cálculo del índice de vulnerabilidad PI.

Cálculo del factor I

1er paso: Determinación de las propiedades del suelo

Conductividad hidráulica saturada	Profundidad al agua subterránea		
	< 30 cm	30 - 100 cm	> 30 cm
> 10 ⁻⁴	Tipo D	Tipo C	Tipo A
10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁴		Tipo B	
10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁵		Tipo E	
> 10 ⁻⁶		Tipo F	

2º paso: Determinación del Factor I'

Terrenos Forestales

Propiedades del suelo	Pendiente		
	< 3,5 %	3.5 - 27 %	> 27%
Tipo A	1,0	1,0	1,0
Tipo B	1,0	0,8	0,6
Tipo C	1,0	0,6	0,4
Tipo D	0,8	0,6	0,4
Tipo E	1,0	0,6	0,4
Tipo F	0,8	0,4	0,2

Terrenos de Prados y Pastos

Propiedades del suelo	Pendiente		
	< 3,5 %	3.5 - 27 %	> 27%
Tipo A	1,0	1,0	0,8
Tipo B	1,0	0,6	0,4
Tipo C	1,0	0,4	0,2
Tipo D	0,6	0,4	0,2
Tipo E	0,8	0,4	0,2
Tipo F	0,6	0,2	0,0

Poblaciones I'=0,8

3er paso: Determinación del Factor I *

Mapa de la cuenca vertiente	Factor I'					
	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Sumidero, curso superficial que se infiltra (mas 10 m a cada lado)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
100 m a cada lado de los cursos superficiales que se infiltran	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Cuenca de los cursos superficiales que se infiltran	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,0
Resto del área	0,4	0,6	0,8	1,0	1,0	1,0

MAPA I

(* Factor determinado de manera diferente en Muguerza, 2001)

FACTOR DE PROTECCIÓN

$$PI = P \cdot I$$

Vulnerabilidad del acuífero superior	Factor π
Extrema	0 - 1
Alta	> 1 - 2
Moderada	> 2 - 3
Baja	> 3 - 4
Muy baja	> 4 - 5

	S
icas	140
	120
	90
cillosas	750
ásticas	60
gravas	50
	25
	10
	5
	200
	400
	300

F
25,0
4,0
1,0
0,5
0,3
0,0
1,0

siana
ntos)*

o en el cálculo del Factor P
s (Muguerza, 2001)

7.4. Método COP

El Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga, dentro de la Acción COST 620, "Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers", ha desarrollado el método COP de cartografía de la vulnerabilidad en medios kársticos según las premisas establecidas en dicha acción para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos.

El método COP (Vías et al., 2002) se basa en la obtención del índice COP en función de la multiplicación de tres factores, que son los siguientes:

- **C**, Concentración de flujo;
- **O**, Estratos suprayacentes;
- **P**, Precipitación.

El cálculo se lleva a cabo a través de una serie de etapas intermedias para cada uno de los tres parámetros (el desarrollo completo se muestra en la figura 64).

El factor **O** corresponde a la capacidad que presentan las capas que conforman la zona no saturada para filtrar los contaminantes o de protección del acuífero frente a éstos. El factor **C** se relaciona con las condiciones que controlan, en la superficie, los flujos de agua hacia zonas de infiltración rápida en las que la capacidad de atenuación de los posibles contaminantes es más reducida. El factor **P** informa sobre la influencia de la precipitación en el transporte de contaminantes hacia la zona saturada.

El método se basa en la evaluación inicial de O, el parámetro que define la protección natural del acuífero, y éste es posteriormente corregido mediante los factores C y P.

El parámetro C es específico de los medios kársticos y se le asignan valores entre 0, en el caso en que la capacidad de protección del acuífero sea nula, y 1, en el caso en que ésta no disminuya. El factor P toma valores entre 0,5 y 1.

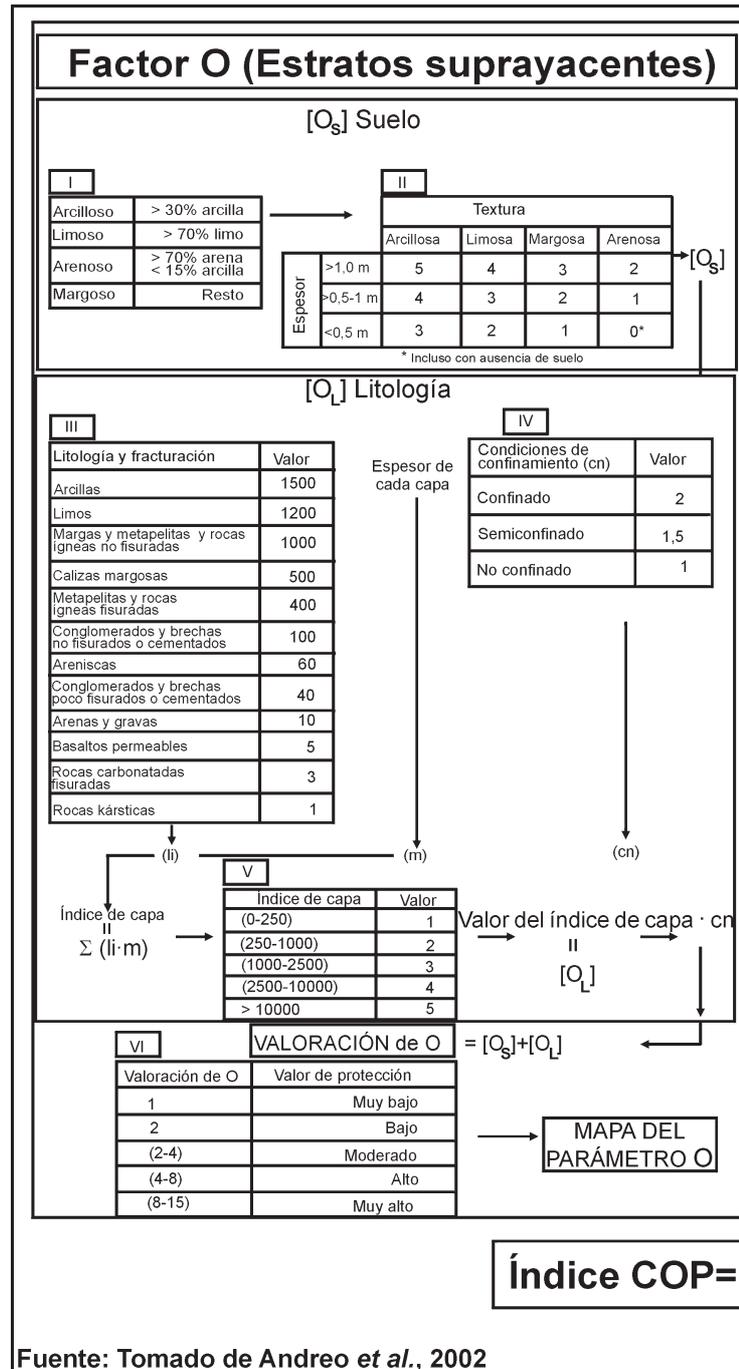


Figura 64: Diagrama para el cálculo del índice de vulnerabilidad COP.

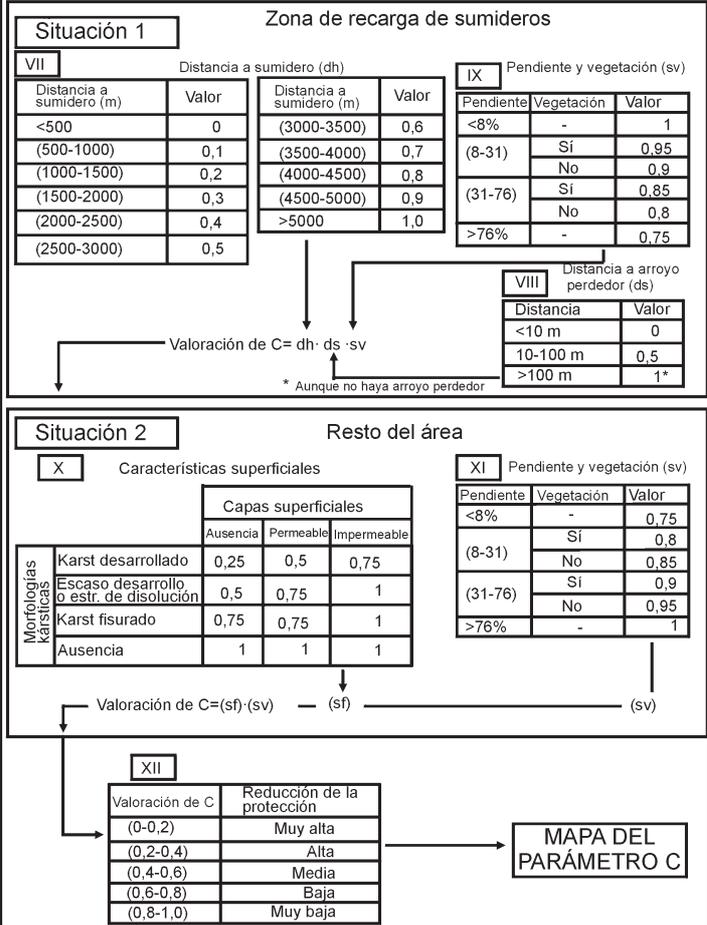
7.5. Empleo de otros índices de vulnerabilidad. Consideraciones acerca de su idoneidad

7.5.1. Índice DRASTIC

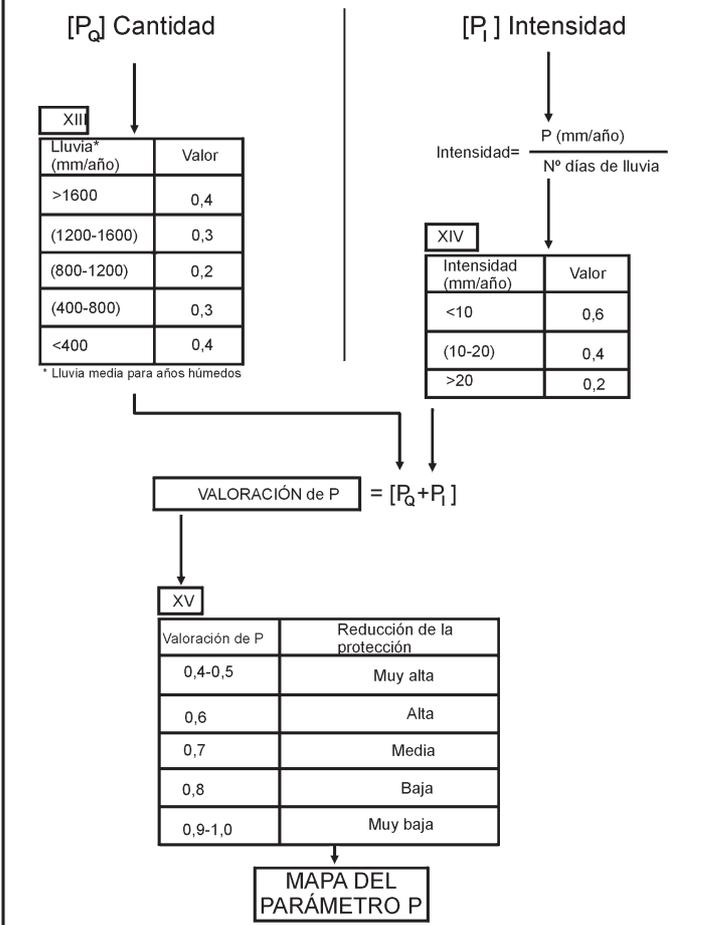
Desarrollado por Aller et al., en 1987, para su aplicación en medios de porosidad intergranular, se trata de un método paramétrico, de ponderación y ordenación (método del tipo MVPP), para la evaluación

de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos ante la contaminación, en terrenos con gran variedad de elementos a valorar. Ha sido utilizado principalmente en los Estados Unidos y Canadá, para evaluación de vulnerabilidad regional de acuíferos. Este método, no se desarrolló, al contrario que el EPIK, específicamente para el diseño de zonas de protección ni para medios de tipo kárstico, aunque ha sido utilizado como tal en diversos estudios (Vías et al., 2001), y de hecho considera en la valoración del

Factor C (Concentración de flujo)



Factor P (Precipitación)



XVI

Índice COP	Clasificación de vulnerabilidad
(0-0,5)	Muy baja
(0,5-1)	Baja
(1-2)	Media
(2-4)	Alta
(4-15)	Muy alta

Valor C · Valor O · Valor P → **MAPA del ÍNDICE COP**

parámetro A la posibilidad de existencia de rocas carbonatadas karstificadas como constituyentes del acuífero.

Para su aplicación se asume la presencia de un contaminante que se incorpora a la zona saturada a través del agua de recarga, y debido a la movilidad de ésta, desde la superficie del terreno. La superficie mínima del área en la que es aplicable el método es de 0.4 km².

Los parámetros, que se consideran en la elaboración del índice DRASTIC para un área determinada y que toman valores entre 1 y 10, son los siguientes:

- **D**, *Depth to water*: Profundidad del nivel freático bajo la superficie del terreno.
- **R**, *Net Recharge*: Recarga que recibe el acuífero.
- **A**, *Aquifer media*: Litología y estructura del medio acuífero.
- **S**, *Soil media*: Tipo de suelo.

- **T**, *Topography*: Topografía del terreno.
- **I**, *Impact of the vadose zone media*: Naturaleza de la zona no saturada.
- **C**, *Hydraulic Conductivity of the aquifer*: Conductividad hidráulica.

Además, el grado de vulnerabilidad de cada ambiente hidrogeológico viene definido por un índice de ponderación, entre 1 y 5 (Tabla 56), dentro del que se diferencian dos series, una para el "índice DRASTIC general" y otra para el "índice DRASTIC agrícola" (pesticidas). La primera serie busca relacionar la vulnerabilidad a los factores hidrogeológicos y morfológicos. La segunda busca reflejar el uso de productos agroquímicos en áreas agrícolas. Estas dos series no pueden ser comparadas entre sí.

Para el cálculo del índice de vulnerabilidad DRASTIC a partir de los siete parámetros mencionados se utiliza la ecuación:

$$\text{Índice DRASTIC} = D_R \cdot D_W + R_R \cdot R_W + A_R \cdot A_W + S_R \cdot S_W + T_R \cdot T_W + I_R \cdot I_W + C_R \cdot C_W$$

en la que se considera:

R: valor del parámetro considerado.

W: índice de ponderación del parámetro.

Los índices DRASTIC varían en un intervalo entre 23 y 230 para el índice general y entre 26 y 260 para el agrícola. La vulnerabilidad aumenta a medida que aumenta el valor del índice, aunque los valores más frecuentes se sitúan en el rango entre 50 y 200.

Este método, al contrario que otros, no establece una clasificación del índice final de vulnerabilidad en diferentes categorías desde baja hasta alta vulnerabilidad.

La valoración que se efectúa de los diferentes parámetros considerados en el índice es la siguiente:

D -Profundidad del agua

Este parámetro tiene influencia en el espesor del material que necesita ser recorrido hasta alcanzar el acuífero y el tiempo de tránsito empleado para ello así como en la posibilidad de que se produzca la oxidación de los contaminantes en contacto con la atmósfera. De manera general se considera que a mayor profundidad menor es la vulnerabilidad del agua subterránea, así para este parámetro se toman los siguientes valores para distintas profundidades:

RANGO (m)	VALOR
< 1,5	10
1,5 – 4,5	9
4,5 – 9	7
9 – 15	5
15 – 22	3
22 – 30	2
30	1

R -Recarga neta

La recarga que se produce en la zona de estudio influye en la cantidad de agua disponible para el transporte de los contaminantes y en la cantidad de agua disponible para su dispersión y dilución. Se acepta, de manera general, que a mayor recarga mayor será la vulnerabilidad. Los valores que se asignan en el método para la recarga neta anual son los siguientes:

RANGO (mm de recarga)	VALOR
0 – 51	1
51 – 102	3
102 – 178	6
178 – 254	8
> 254	9

A-Naturaleza del acuífero

Interviene en el movimiento tanto del agua como del contaminante, el tiempo disponible para la actua-

Tabla 56: Índices de ponderación para los parámetros usados en el método DRASTIC.

ÍNDICE DE PONDERACIÓN		
PARÁMETRO	DRASTIC	DRASTIC Agrícola
D profundidad del agua	5	5
R recarga neta	4	4
A naturaleza del acuífero	3	3
S tipo de suelo	2	5
T topografía de las pendientes	1	3
I impacto de la zona no saturada	5	4
C conductividad hidráulica	3	2

ción de los procesos de atenuación de los contaminantes y en la superficie con que puede estar en contacto el contaminante. De manera general, a mayor tamaño de grano y grado de fracturación de la roca acuífera mayor será la conductividad hidráulica y por tanto de la vulnerabilidad. Los valores que se le asignan a este parámetro son:

DESCRIPCIÓN	RANGO de VALORES	VALOR TÍPICO
A Esquistos masivos	1 – 3	2
B Rocas ígneas/metamórficas	2 – 5	3
C Rocas ígneas/metamórficas alteradas	3 – 5	4
D Alternancias de areniscas, arcillas y calizas	5 – 9	6
E Areniscas masivas	4 - 9	6
F Calizas masivas	4 – 9	7
G Arenas, gravas y conglomerados	4 – 9	8
H Basalto	2 – 10	9
I Calizas karstificadas	9 – 10	10

S-Tipo de suelo

Este parámetro es importante en la cantidad de agua infiltrada que llega al acuífero y en el movimiento del contaminante en la vertical a través de la zona no saturada.

Cada suelo presenta una vulnerabilidad diferente a la contaminación, que dependerá del tipo de arcilla que lo conforma, su capacidad de hinchamiento, el tamaño de grano que presenta y la materia orgánica presente en el suelo. De manera aproximada a menor capacidad de hinchamiento y tamaño de grano menor será su vulnerabilidad. Los valores que se le asignan a este parámetro son según su naturaleza:

NATURALEZA del SUELO	VALOR
Arcilla no expansiva y desagregada	1
Suelo orgánico	2
Marga arcillosa	3
Marga limosa	4
Marga	5
Marga arenosa	6
Arcilla expansiva y/o agregada	7
Turba	8
Arena	9
Grava	10
Delgado o ausente	10

T- Topografía

La topografía de la zona de estudio tiene incidencia en el arrastre del contaminante por la escorrentía superficial o infiltración y en el desarrollo del suelo.

En ocasiones se puede inferir el nivel del agua a partir de la topografía. Como regla general, cuanto mayor sea la pendiente de la zona la vulnerabilidad será menor.

RANGO (% pendiente)	VALOR
0 – 2	10
2 – 6	9
6 – 12	5
12 – 18	3
> 18 %	1

I- Impacto de la zona no saturada

La zona no saturada interviene en los procesos de atenuación de los contaminantes, ya sea producida por biodegradación, por volatilización, o por reacciones químicas, en el transporte del contaminante y su tiempo de permanencia en la zona y en el desarrollo del suelo.

El valor del parámetro I refleja el tamaño de grano, el grado de fracturación, y la clasificación granulométrica entre otras características. Los valores que se le asignan son:

DESCRIPCIÓN	RANGO de VALORES	VALOR TÍPICO
A Arcilla, limo	1 – 3	2
B Esquistos /pizarras	2 – 5	3
C Calizas	3 – 5	4
D Areniscas	5 – 9	6
E Alternancia de calizas, areniscas y arcillas	4 – 9	6
F Arenas y gravas con contenido en arcillas	4 – 9	7
G Rocas metamórficas/Igneas	4 – 9	8
H Arenas y gravas	2 – 10	9
I Basaltos	9 – 10	10
J Calizas karstificadas	8 – 10	10

C- Conductividad hidráulica

Condiciona la velocidad del agua y por tanto la del contaminante así como la renovación del agua en el interior del acuífero, siendo la vulnerabilidad más elevada cuanto mayor es la conductividad hidráulica.

RANGO (m/día)	VALOR
< 4,1	1
4 – 12	2
12 – 28,5	4
28,5 – 40,7	6
40,5 – 81,5	8
> 81,5	10

7.5.2. Índice SINTACS

Desarrollado en Italia (Civita, 1994) a partir de las experiencias realizadas con DRASTIC con el objetivo de corregir la falta de flexibilidad de éste al evaluar la vulnerabilidad para escenarios diversos y para la definición de mapas de vulnerabilidad a escalas más reducidas, en que se presentan sistemas hidrogeológicos muy diversos. Se diferencia del anterior en el peso que se le asigna a cada parámetro y en que toma en consideración el efecto de dilución de la recarga. Es, por tanto, también un método de valoración y ponderación de parámetros (MVPP), y como en el caso anterior su desarrollo estuvo enfocado a medios diferentes a los kársticos aunque también se ha utilizado en ellos (Heredia Díaz, 1995).

El acrónimo corresponde a los mismos parámetros que en el método DRASTIC:

- **S**, profundidad del agua.
- **I**, infiltración efectiva.
- **N**, efecto atenuante de la zona no saturada.
- **T**, tipo de suelo.
- **A**, características hidrogeológicas del acuífero.
- **C**, conductividad hidráulica.
- **S**, pendiente topográfica media.

El área de estudio se ha de dividir en elementos finitos cuadrangulares, entre 250 y 1000 m de lado.

Al igual que en el caso anterior, se le asigna un valor entre 0 y 10 a cada parámetro, y se considera la posibilidad de existencia de zonas karstificadas para la asignación de los valores a los parámetros N (efecto atenuante de la zona no saturada) y A (características hidrogeológicas del acuífero). A estos parámetros se les asignan valores de 8 a 10 y de 9 a 10 respectivamente en zonas con karst desarrollado.

El índice de vulnerabilidad viene dado por el sumatorio de los valores de los parámetros, P_j , multiplicados por sus respectivos índices de ponderación, W_j , y dará un valor final a cada celda entre 26 y 260.

$$I_{SINTACS} = \sum_{j=1}^7 P_j \cdot W_j$$

7.5.3. Índice GOD

El método GOD (Foster, 1.987), para evaluación de vulnerabilidad intrínseca de acuíferos, es un método paramétrico, práctico y simple, donde el grado de vulnerabilidad es resultado del producto de los valores atribuidos a los tres factores considerados y descritos a continuación (Figura 65).

- **G**, *Groundwater occurrence*. Tipo de acuífero que puede ser inexistente, surgente, confinado, semi-confinado cubierto o libre. Este parámetro presenta una valoración entre 0 y 1.

- **O**, *Overall aquifer*. Corresponde a la naturaleza del acuífero mediante la caracterización de los estratos existentes por encima de la zona saturada, a través del análisis del grado de consolidación y de la litología. La valoración de este parámetro esta comprendida entre 0,4 y 1,0.

- **D**, *Depth to groundwater*. Profundidad del agua subterránea que se corresponde con la profundidad del nivel freático, en el caso de acuífero libre, o con el techo del acuífero, en acuíferos confinados.

Su valor está comprendido entre 0,4 y 1,0

El producto de esos tres factores da la medida relativa de la vulnerabilidad del acuífero, como se muestra en la figura 65.

$$\text{Índice GOD} = G \cdot O \cdot D$$

En este método, la evaluación de la vulnerabilidad del acuífero se considera en un rango de variación del índice final calculado entre 0 y 1. El menor valor de vulnerabilidad es 0,0016 en el caso de existencia de un acuífero y 0 si no existe. El valor 1 representa la vulnerabilidad más elevada.

Se definen los siguiente grados de vulnerabilidad, según el valor obtenido:

ÍNDICE GOD	GRADO DE VULNERABILIDAD	
0	NULO	
0 – 0,1	INSIGNIFICANTE	Sin acuífero o muy poco vulnerable
0,1 – 0,3	BAJO	Acuífero con baja vulnerabilidad
0,3 – 0,5	MODERADO	Acuífero con vulnerabilidad moderada
0,5 – 0,7	ALTO	Acuífero con vulnerabilidad alta
0,7 – 1,0	EXTREMO	Acuífero con vulnerabilidad extrema

7.5.4. Métodos aplicados en Irlanda

En Irlanda, la cartografía de vulnerabilidad se integra dentro de un esquema detallado de protección del agua subterránea (Goldscheider *et al.*, 2000), que considera en un primer momento (Figura 66):

- Mapas de acuíferos: que reflejan la importancia del recurso y características hidrogeológicas.

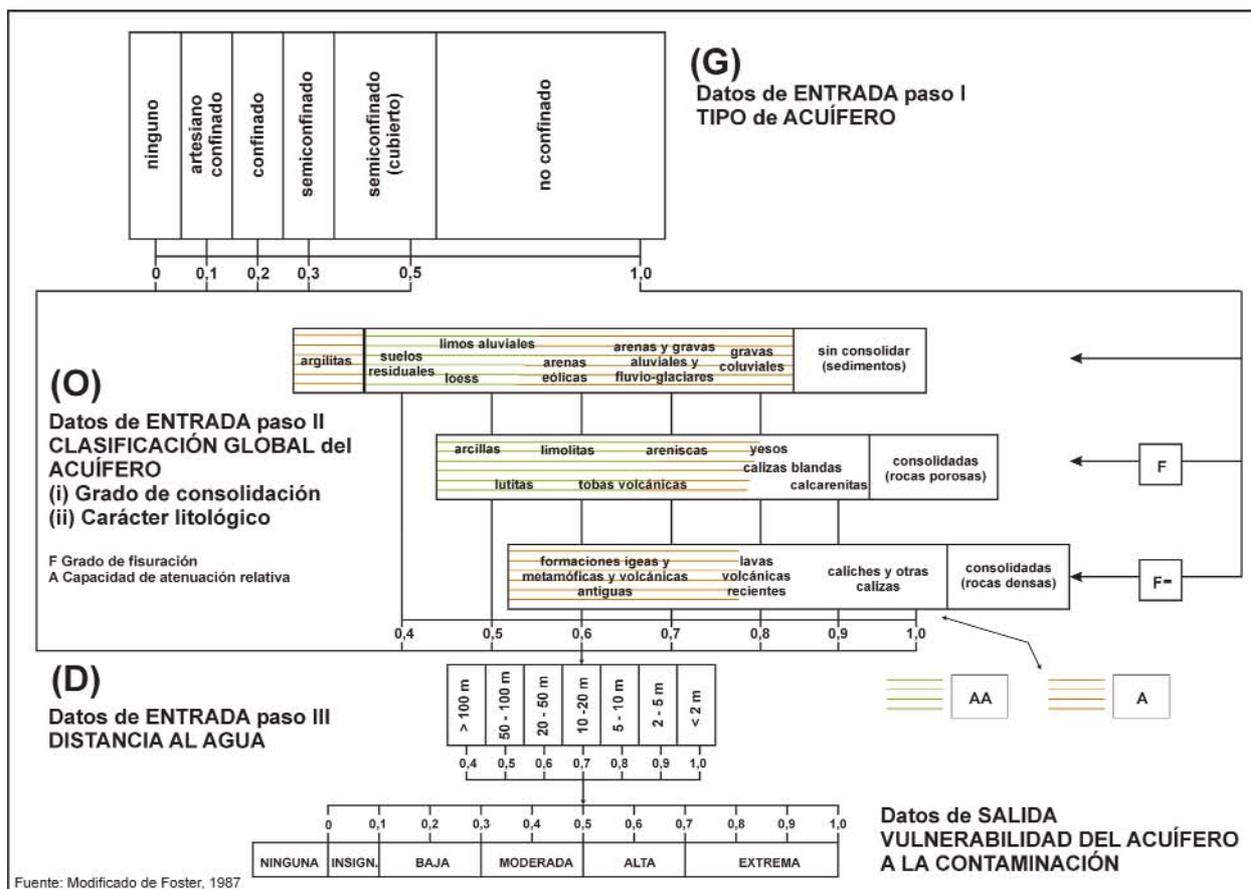


Figura 65: Cálculo del índice GOD para la evaluación de la vulnerabilidad del acuífero.

- Mapas de vulnerabilidad: basados en el espesor y conductividad hidráulica del subsuelo. Considera el flujo vertical del agua y del contaminante. En el caso de existencia de morfologías kársticas, como dolinas, se le asigna vulnerabilidad extrema.
 - Áreas de protección de las captaciones: en este caso se considera el flujo horizontal en la zona saturada. Se consideran dos áreas, la interior correspondiente a un tiempo de tránsito de 100 días y la exterior la zona de alimentación de la captación completa.
- Utilizando los criterios anteriores se llega a la determinación de las zonas de protección del recurso y las zonas de protección de las captaciones, que marcarán una zonación superficial. Actualmente se están desarrollando matrices de evaluación de riesgos de contaminación, en base a la vulnerabilidad específica para diferentes contaminantes (ver capítulo 2), en las "reacciones" frente a la actividad contaminante considerada. Estas "reacciones" pueden ser de aceptación de la actividad, no aceptación o condicionamientos.

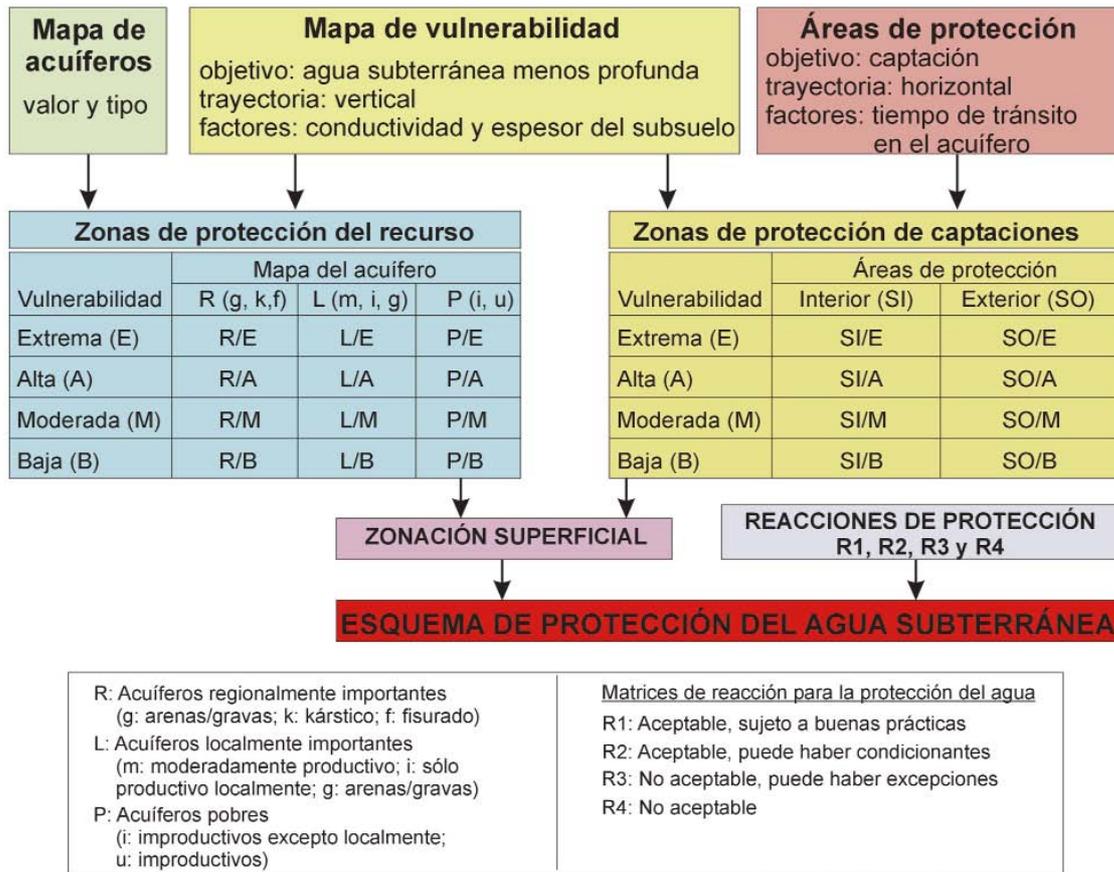


Figura 66: Desarrollo de los esquemas de protección de aguas subterráneas en Irlanda.

7.6. Análisis de la precisión obtenida al emplear diferentes métodos de vulnerabilidad

Debido al desarrollo de un variado número de índices de vulnerabilidad (específicos para acuíferos kársticos o generales), se han realizado en los últimos años numerosos trabajos de cartografía de vulnerabilidad intrínseca mediante diversos métodos en una misma zona (Muguerza Perelló, 2001; Vías *et al.*, 2001) a fin de evaluar la eficacia de los diferentes métodos. Además, se han realizado también trabajos de síntesis de los diferentes métodos de cartografía de la vulnerabilidad y sus principales características (Hirata, 1999), destinados a facilitar la selección del método óptimo para el trabajo que se desarrolla.

A continuación se expondrá una síntesis de las ventajas e inconvenientes encontradas en los diferentes métodos analizados en los apartados 7.1 a 7.4, que se presentan en estos trabajos. Son las siguientes:

– El mayor problema en la aplicación de cualquiera de los métodos considerados es la dificultad e

incertidumbre en la valoración de la contribución real de cada uno de los factores y del tiempo durante el cual el potencial contaminante puede continuar llegando al agua subterránea desde el punto superficial de liberación del mismo (Zekster, 2001).

– La clasificación de la vulnerabilidad de las zonas es más precisa en aquellos métodos en los que se tienen en consideración los usos del suelo (Kimmeier *et al.*, 2001) y la existencia de las redes hidrográficas superficiales.

– Únicamente el método EPIK ha sido desarrollado específicamente para la delimitación de zonas de protección de captaciones de abastecimiento (OFEFP, 1998), tomando en consideración la legislación existente en Suiza. El resto de métodos de análisis y cartografía de la vulnerabilidad intrínseca han sido desarrollados para la protección del conjunto del sistema del agua subterránea, mediante la evaluación de diferentes factores que influyen en la protección existente previa a la llegada del contaminante a la zona saturada.

– En algunos casos (Vías *et al.*, 2001) no existen variaciones en exceso significativas en los resulta-

dos que se obtienen mediante la aplicación de diferentes métodos. Esto es debido a la importancia que en ellos se le otorga a la litología, mayor que la otorgada a la profundidad del agua subterránea, y a la influencia de los intervalos de clasificación considerados. Sí se han encontrado diferencias acusadas en la aplicación en proyectos piloto, entre el método PI (llamado también OC o Europeo) en materiales kársticos y el método EPIK (Muguerza, 2001).

- La valoración de la vulnerabilidad para cada zona presenta siempre una componente de subjetividad, que es más acentuada en el método DRASTIC y menor en los índices EPIK y GOD debido a que en estos se hace una elección más selectiva de las variables y existe una reducción en los rangos de valoración de éstos (Vías *et al.*, 2001).
- El método EPIK ofrece como resultado un único mapa para el conjunto de las condiciones climáticas de la zona de estudio (Vías *et al.*, 2001), ya que no tiene en cuenta las variaciones temporales del sistema de agua subterránea (piezometría, precipitaciones).
- El método EPIK ofrece un buen rendimiento para la delimitación de las zonas de protección, aunque la escala de trabajo ha de ser menor de 1:25.000, mientras que en otros métodos es suficiente con escalas del orden de 1:50.000 o mayores (Vías *et al.*, 2001).
- En el caso del método PI (OC ó método europeo) la consideración de diferencias dentro de las mismas litologías (existencia de sumideros, dolinas y cursos de agua que desaparecen) hace factible la división de las zona en rangos de vulnerabilidad más detallada. Este método hace que las dudas existentes en la aplicación del método EPIK queden solventadas. Esto se debe a la toma en consideración de todos los factores con la misma importancia, de la existencia del efecto *bypass* (traspaso) en las zonas superficiales, de los casos en que la escorrentía superficial se infiltra en karst y de los asentamientos e infraestructuras (Muguerza, 2001).
- Los métodos desarrollados dentro de la Acción COST 620 han demostrado una mayor sensibilidad para la evaluación de la vulnerabilidad, pero presentan como inconveniente, para la delimitación de las zonas de protección a ser incluidas en los perímetros de protección de captaciones, la falta de consideración del tiempo de tránsito dentro de la zona saturada. La inclusión de éste en el desarrollo de método de análisis y cartografía de la vulnerabilidad intrínseca, es uno de los aspectos en los que actualmente se está trabajando dentro de esta acción europea (Muguerza, 2001).

7.7. Empleo de trazadores

Los trazadores son herramientas fundamentales para descubrir y predecir la velocidad y trayectoria de dispersión de los contaminantes en el agua. Estos datos son esenciales para el desarrollo de estrategias de protección de captaciones y pueden ser esenciales para la calibración de modelos de flujo y movimiento de contaminantes. Económicamente se trata de un método rentable y muchas veces es el único apto para la obtención de los datos necesarios para planificar las zonas de los perímetros de protección del agua subterránea.

Los ensayos de trazadores se pueden llevar a cabo mediante introducción de los trazadores en el sistema que se está investigando, utilizando trazadores artificiales, o mediante la determinación de algún constituyente natural del agua u otras propiedades de ésta, utilizando trazadores “naturales”.

7.7.1. Trazadores artificiales

Es el método más extendido y antiguo de trazado. Consiste en la introducción de una sustancia en el sistema hídrico que pueda ser identificada y reconocida en otro lugar.

Estas sustancias, para ser realmente eficaces deberían:

- Estar ausentes en las aguas naturales o en bajas concentraciones.
- Tener alta sensibilidad analítica, principalmente cuantitativa.
- Ser inócuas para el hombre, los animales y las plantas.
- Ser fácilmente solubles en el agua y con buenas propiedades de dispersión.
- Ser resistentes a ataques químicos, biológicos o físicos, estables durante reacciones de oxidación, reducción, ácidas y básicas en el medio, así como no degradables y resistentes a la luz y a la temperatura.
- No presentar sorción ni intercambio iónico con el medio en el que fluyen.
- Ser económicas en lo que se refiere a su compra, manejo y análisis.

No existe el trazador ideal, la mayor parte son algo reactivos (con el suelo, la roca o el agua) y pueden sufrir reacciones de sorción o de intercambio iónico al igual que los contaminantes. Además las velocidades de flujo de los trazadores no son necesariamente las mismas que las de los contaminantes, en flujo difuso suelen ser mayores las de los trazadores y en flujo a través de conductos la diferencia es menor.

7.7.2. Trazadores naturales

El grupo más importante de los trazadores naturales son los constituyentes químicos del agua, así como su contenido isotópico, aunque los trazadores "no intencionados" introducidos en el medio por el hombre se incluyen también en esta categoría. De todos ellos se pueden obtener resultados importantes. Dentro de éstos se incluyen los focos de contaminación existentes.

7.7.3. Ensayos de trazado

Se puede realizar el ensayo de trazado con gran variedad de sustancias o materiales. En las tablas 58 a 62 se muestra una síntesis de los trazadores artificiales y naturales mencionados en la bibliografía con posibilidad de utilizarse como trazadores de aguas subterráneas y por lo tanto aplicables a los estudios de delimitación de perímetros de protección (especialmente en medios kársticos y fisurados), señalando algunas de sus características más importantes. Los ensayos con colorantes son ampliamente utilizados en estudios hidrogeológicos, por lo que es interesante resaltar algunas características y recomendaciones para los ensayos con los mismos (ver figura 67), que en muchos casos son aplicables al resto de trazadores.

En general los colorantes son más baratos y en conjunto eficaces debido a su solubilidad en el agua, destacando los fluorescentes como Fluoresceína, Eosina, Rodamina WT, Sulforodamina B y los abri-llantadores ópticos C.I. 22 y 28 (excepto el 22 están reseñados en las tablas), por ser más fácilmente reconocibles y por su menor adsorción.

Los trazadores fluorescentes representan una herramienta fundamental para la determinación de la dirección de flujo del agua subterránea, su movimiento y otras características, y por tanto para la delimitación de perímetros de protección, debido a su detectabilidad, inocuidad para el hombre y el medio ambiente y asequibilidad económica. Además el muestreo se puede realizar por adsorción en detectores pasivos.

En general un ensayo bien diseñado reducirá bastante el área de impactos potenciales, e indicará zonas en las que han de llevar a cabo medidas de protección. Para ello se ha de situar correctamente el punto de inyección, utilizar el trazador correcto en cantidad adecuada y considerar los niveles de fondo existentes, situar correctamente la toma de muestras continuada, muestrear las aguas superficiales, y planificar correctamente la duración del ensayo, no se debe limitar a la primera aparición del trazador en un único punto. Es imprescindible la instrumentación analítica adecuada.

Si el número de puntos de muestreo es escaso o el tiempo de muestreo corto se pueden omitir puntos a los que llegue el flujo e incluso se excluye la posibilidad de conocer si capas suprayacentes, con diferentes características hidrogeológicas han almacenado parte del trazador que podrá ser liberado durante un largo periodo de tiempo.

La situación ideal para hacer la inyección en un ensayo de trazado sería una corriente superficial perenne que se infiltre en la zona a investigar. Si no, se puede llevar a cabo en otros sumideros, corrientes superficiales intermitentes o sondeos.



Figura 67: Realización de ensayos de trazado mediante inyección de colorantes.

Un error común es considerar que estos trazadores teñirán fuertemente el agua en los puntos de captación interfiriendo con los usos del agua y las normativas existentes y produciendo molestias a los usuarios. El uso de colorantes en el agua subterránea como trazadores es, de manera general, una práctica segura.

El muestreo debería llevarse a cabo en todos los puntos de captación existentes dentro de un radio fijado entre 8 y 25 km en medio kárstico (Quinlan, 1989), desde el punto de inyección, correspondiente a un potencial contaminante, que se tome en consideración. El arco que se debe abarcar para el muestreo depende de que se asuma o no un flujo más o menos radial, dependiendo de: la estratigrafía, la estructura geológica, la geomorfología y la evaluación de diversas hipótesis de flujo. Los ensayos bien diseñados suelen incluir toma de muestras en aguas superficiales de descarga de los acuíferos.

El conocimiento de los niveles de fondo existentes es imprescindible debido a la posible existencia de compuestos con una fluorescencia en las mismas longitudes de onda que los colorantes usados y porque pueden existir pequeñas concentraciones previas de los propios colorantes (sobre todo en zonas urbanas e industriales).

Las técnicas de análisis actuales ha reducido de manera considerable las interferencias con los niveles de fondo y además han reducido la cantidad necesaria para la detección positiva de los colorantes entre uno y dos órdenes de magnitud. No obstante para que los ensayos de trazado sean creíbles se necesita usar una cantidad adecuada de trazador, que varía de manera considerable dependiendo del entorno hidrogeológico.

Una de las ventajas en el uso de colorantes fluorescentes es que proporcionan datos claros acerca de la dirección de flujo y del caudal de agua subterránea que fluye (velocidad de flujo), así como la identificación de los momentos de la primera aparición, picos de concentración o la curva de recuperación completa.

Se pueden realizar tres tipos de ensayos de trazado con colorantes:

Trazado cualitativo.

Normalmente es suficiente para reconocer la conexión hidráulica entre dos puntos y se trata de la técnica más asequible económicamente. Se puede hacer mediante:

– Observación visual de la “pluma de colorante”,

normalmente requiere una cantidad excesiva de trazador y existe la posibilidad no detectar la aparición del trazador en el punto de control.

– Detección pasiva, con detectores pasivos (“fluocaptadores”) como carbono activado o algodón y observación a simple vista de éstos o mediante luz ultravioleta.

Trazado semi-cuantitativo.

Mediante la utilización de detectores pasivos y análisis instrumental del colorante (fluorímetro de filtro, espectrofluorímetro). Es muy complicado cuantificar de manera precisa las cantidades de concentraciones variables del colorante que pasan por un punto en un tiempo determinado.

Trazado cuantitativo.

Utilizando análisis instrumental del agua en muestras puntuales o continuo con medida continua de la descarga (caudal). El análisis instrumental permite una mejor determinación de la velocidad de flujo, curvas características de llegada del trazador y su retardo, dispersividad del acuífero y cálculo de la cantidad de trazador recuperado. Para situar puntos de control de la calidad, éstos serán mejores cuanto mayor sea la recuperación del trazador.

Cada uno de los tres tipos de ensayo es suficiente y satisfactorio para la determinación de la conexión hidráulica entre el punto de inyección y el de toma de muestras.

Los ensayos hay que hacerlos en condiciones de flujo de base, flujo intermedio y flujo de inundación. En condiciones de flujo de base los ensayos son difíciles debido al tiempo necesario y a que no todos los conductos (en medios kársticos y fisurados) están saturados. Con flujo de inundación la dilución es mucho mayor, y se complican los accesos a los puntos así como la colocación de los tomamuestras. Los ensayos con flujo moderado son los más eficaces y rápidos para conocer el funcionamiento del sistema.

7.7.4. Interpretación de los ensayos con colorantes

Se llevan a cabo mediante la interpretación de las curvas de concentración-tiempo de llegada del trazador a los puntos de muestreo, o curvas de concentración (ver figura 68). Los tiempos, t_1 , t_2 y t_3 , son muy importantes en la evaluación de los ensayos.

El momento t_0 es el momento de inyección. Cuando la inyección no es puntual, t_0 es el momento de comienzo de la inyección.



Figura 68: Curva de concentración-tiempo para un ensayo con trazadores artificiales.

Tabla 57: Datos que se pueden calcular en un ensayo de trazadores con colorantes.

Tiempo	Concentración	Velocidad de flujo
t_0 Inyección	-	-
t_1 Primera detección	Límite de detección (c_E)	Velocidad máxima de flujo (v_{a1})
t_2 Concentración máxima	Concentración máxima (c_{max})	Velocidad de flujo dominante ($v_{a dom}$)
t_3 Tiempo de vida media	Carga media (c_m)	Velocidad de flujo (media) (v_a)
t_4 Última detección	Límite de detección (c_E)	-

t_1 es el momento de primera detección del trazador. La primera prueba de aparición del trazador depende de la sensibilidad analítica y por tanto no es idéntica a la primera aparición real del trazador. Dado que el aumento de concentración se produce de manera bastante rápida al principio, t_1 puede ser extrapolado. Este tiempo t_1 es el tiempo que necesitan las partículas de trazador que toman el camino más corto. La velocidad se puede calcular utilizando la longitud de la trayectoria de flujo. Debido a la posible confusión con la velocidad real en el máximo de concentración generalmente se denomina velocidad "más rápida" (v_{a1}).

El momento de concentración máxima (c_{max}) es t_2 . En general es fácilmente reconocible, sin embargo a veces debe ser interpolado. Depende del método analítico y de su sensibilidad. Se puede dar más de un máximo de concentración, debido a cambios en las condiciones hidráulicas o por separación de las

trayectorias de flujo. El máximo de la curva de concentración se localiza en t_2 .

El tiempo de vida media es t_3 , que se determina a partir de la curva de concentración. Normalmente, se alcanza cuando la concentración está entre dos tercios y la mitad de su máximo. La vida media se define como el tiempo en el que la mitad del trazador ha reaparecido en los puntos de muestreo. Se deben tener en cuenta los posibles cambios en el volumen de flujo. Otros términos que se calculan son la velocidad media, v_a , y su correspondiente concentración (c_m), también llamada "centro de concentración" o "carga media".

El momento de la última detección es t_4 . Al igual que con la primera detección, este término depende en gran medida de la sensibilidad analítica. En muchos casos el trazador puede reaparecer en el acuífero y los puntos de observación tras fuertes lluvias.

Tabla 58: Relación de colorantes que se pueden utilizar como trazadores y sus características.

COLORANTES								
	Grupo	Nombre / índice de color (C.I.)	Fórmula	Color/Forma sólido y disolución	Color fluorescencia/intensidad	Dependencia del pH	Sensibilidad a la luz	
COLORANTES FLUORESCENTES	Xantenos (Fluorescencia de verde a roja)	Uranina (C.I. 45 350 Amarillo ácido 73)	(Fluoresceína sódica) Fluoresceína	$C_{20}H_{10}Na_2O_5$ $C_{20}H_{11}O_5$	Cristales rojos alargados. Solubles en alcohol y éter	Verde (Alta)	Si. Intensidad máxima con pH > 8,5	Acusada
		Eosina (C.I. 45 380 Rojo ácido 87))		$C_{20}H_9Br_2Na_2O_6$			Escasa	Alta
		Rodamina	Rodamina B (C.I. 45 170 Violeta básico 10)	$C_{28}H_{31}ClN_2O_3$	Agujas verde oscuro. Rojo fuerte en disolución	Rojo-naranja	Leve	Escasa
			Sulfurodamina B (C.I. 45 100 Rojo ácido 52)	$C_{27}H_{29}N_2NaO_7S_2$		No	No	
			Aminorodamina G (C.I. 45 220 Rojo ácido 50)	$C_{28}H_{31}N_2NaO_7S_2$		Baja	Baja	
			Rodamina WT (C.I. Rojo ácido 388)	$C_{29}H_{31}N_2NaO_5$		Escasa	Estable	
		Otros	Rodamina 6G (C.I. 45 160 Rojo básico 1)	$C_{28}H_{31}ClN_2O_3$				
			Rodamina 3G (C.I. 45 210 Rojo básico 3)	$C_{28}H_{31}ClN_2O_3$				
			Eritrosina (C.I. 45 430 Rojo ácido 51)	$C_{28}H_{31}I_4Na_2O_5$		Baja		
			Rosa Bengali (C.I. Rojo ácido 94)	$C_{22}H_{21}Cl_3I_3Na_2O_5$				
	Dimetilfluoresceína Dietilfluoresceína Sulfofluoresceína							
	Piranina (C.I. 59 040 Verde disolvente 7)			$C_{16}H_{11}Na_3O_{10}S_5$			Alta	
	Otros colorantes fluorescentes (de azul a verde)	Naftionato sódico		$C_{10}H_7NNaO_5S$	Polvo gris rosáceo, azul violeta en disolución (no se ve al muestrear)	1/4 de la de la uranina, entre 4 < pH < 9		
		Amino 3G ácido		$C_{10}H_9NO_5S_2$		Decae con pH<5		
		Lanaperil Amarillo Rápido (C.I. 18 835)		$C_{22}H_{21}ON_3NaO_5S_5$	Polvo naranja rojizo	Constante en amplio rango de pH		
		Amidoflavina (C.I. Amarillo ácido 215)			Polvo amarillo limón	< 1% de la uranina		
		Lisamina (C.I. 56 205 Amarillo ácido 7)		$C_{19}H_{17}N_3NaO_5S$	Polvo naranja			
		Amarillo Directo 96		$C_{44}H_{37}N_4Na_3O_{13}S_6$	Color naranja		Si	
	Abrillantadores: ópticos	Características Generales			Polvo o fluidos viscosos	Violeta a azul		
		Tinopal CBS-X (C.I. Abrillantador fluorescente 351)		$C_{28}H_{28}Na_3O_5S_5$	Polvo granular amarillo pálido			
		Tinopal ABP líquido		$C_{30}H_{30}O_{16}N_{12}Na_4S_4$		Aumenta al iluminar la disolución		
		Leucofor (C.I. Abrillantador fluorescente 49)						
Fotina CU (C.I. Abrillantador fluorescente 15)								
Abrillantador fluorescente 28 (C.I. Abrillantador fluorescente 28)			$C_{10}H_{12}N_{12}Na_2O_{10}S_2$				Estable	
Hostalux								
COLORANTES NO FLUORESCENTES		Índigo, anilina roja, verde malaquita, anilina violeta, rojo congo, auramina y fucsina				Estables	Estables	

Fuente: Modificado de Käs, 1998.

(En amarillo los más comúnmente utilizados para ensayos de trazado).

Tabla 58 (cont.): Relación de colorantes que se pueden utilizar como trazadores y sus características.

COLORANTES (Continuación)								
COLORANTES	Grupo	Nombre		Sorción	Recomendado en (o usado en)	Desaconsejado en	Otras características	
	COLORANTES FLUORESCENTES	Xantenos	Uranina	Fluoresceína sódica	Sí, muy baja. Buena movilidad en poros. Sufre retardo respecto a otros.	Útil en casi todos los ambientes	Medio ácido (forma catiónica no fluorescente)	Límite de detección: 0,0002 µg/L Se destruye con oxidantes (O ₂ , Cl ₂ O y O ₃)
Fluoresceína								
Eosina				Baja	Ensayos múltiples de larga duración y recorrido	Aguas superficiales	Límite de detección 0,00010 µg/L *	
Rodamina			Rodamina B	Elevada (no tanto en kársticos)	Ensayos de larga duración y acuíferos kársticos	Acuíferos con porosidad intergranular y en aguas superficiales con sólidos en suspensión		
			Sulfurodamina B		Ensayos con uranina		Límite de detección 0,0090 µg/L *	
			Aminorodamina G		Ensayos múltiples			
Otros			Rodamina WT		Específico como trazador. Karst, dep. glaciales, vertidos y zona no saturada		Límite de detección 0,0070 µg/L *	
			Rodamina 6G	Alta			Coste elevado, tóxico y posiblemente carcinógeno	
			Rodamina 3G	Alta			Raramente usado, coste elevado	
			Eritrosina		Sustituto de uranina			
		Rosa Bengalí			No usado como trazador			
Otros colorantes fluorescentes		Piranina			Subsuelos ácidos	Ensayos con uranina, problemas en análisis		
			Naftionato sódico		Escasa	Conjuntamente con uranina, eosina y rodaminas		
			Amino 3G ácido	No			No hay ensayos de campo conocidos	
		Lanaperl amarillo rápido		Marcada	Karst?			
				Amidoflavina		Karst?		
		Lisamina				Ríos tropicales (niveles de fondo elevados)		
		Amarillo directo 96	Baja	Karst, grandes distancias, se recoge con algodón				
Abrillantadores ópticos		Características generales			Karst (precipitación por el Ca)	Zonas con niveles de fondo elevados y sólidos en suspensión	Límites de detección próximos a 0,1 µg/L	
		Tinopal CBS-X				Medios ácidos		
	Tinopal ABP líquido							
	Leucofor		Sí (según cual)					
	Fotina CU		Sí con materia orgánica		Karst?			
	Abrillantador fluorescente 28				Karst, ensayos largos			
	Hostalux				Karst, con uranina			
COLORANTES NO FLUORESCENTES	Índigo, anilina roja, verde malaquita, anilina violeta, rojo congo, auramina y fucsina		Sí (usados para caracterización de fracturas)		Acuíferos con superficie relativa pequeña y distancias cortas (auxiliar). Zona no saturada	Aguas superficiales de baja calidad		

Fuente: Modificado de Käs, 1998.

* Fuente: Alley, 1997.

Tabla 59: Relación de sales que se pueden utilizar como trazadores y sus características.

SALES								
Nombre	Compuesto utilizado	Se analiza	Reacciones (sorción, intercambio iónico...)	Niveles de fondo naturales	Observaciones para el ensayo	Análisis	Toxicidad	Otras características
Cloruro sódico	NaCl	Na ⁺ y Cl ⁻	Intercambio iónico y sorción. Se puede perder gran parte del Na ⁺ , endurecimiento del agua	Siempre presentes (necesario conocerlos)	Concentración máxima de 3 g/L. No hacer en aguas superficiales.	Titulación y método gravimétrico para Cl Emisión de llama para Na ⁺ Electrodos sensibles y medida de conductividad		Se necesitan grandes cantidades.
Litio	LiCl (ó LiBr)	Li ⁺	Escaso intercambio iónico, radio muy pequeño Reacción exotérmica al disolverse	0,1 _g/L en karst. En orden creciente fisurados y kársticos; con porosidad intergranular; aguas minerales, lixiviado y residuales	Se necesita pureza técnica (99%). Atención al calor que se desprende. Recipientes de vidrio marrón.	Fotometría de llama o ICP	Poca	En acuíferos con porosidad intergranular, hasta 200 m. En acuíferos kársticos distancia de km. Necesarios los niveles de fondo.
Cloruro potásico	KCl	K ⁺	Tendencia al intercambio iónico del K ⁺ (sobre todo con materia orgánica).	Menores que los de Na ⁺	En acuíferos con porosidad intergranular sólo con grano grueso. Gran dependencia de la solubilidad con la temperatura.	Emisión de llama (también con espectrofotometría atómica de absorción o electrodos sensibles)	No en concentración para ensayo de trazado.	Utilizado en kársticos, junto con colorantes
Bórax	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O	Ácido bórico (H ₃ BO ₃ ó HBO ₃)	Mínimo intercambio iónico y sorción (sólo algo en minerales arcillosos).	< 150 _g/L sin impacto antrópico (depende del acuífero)	Baja solubilidad del ácido bórico.	Colorimetría, con alta sensibilidad y complicado. ICP, igual de sensible. Análisis fluorimétrico.	No produce riesgos.	
Estroncio	SrCl ₂	Sr ²⁺			Análisis antes de 48 horas para evitar la precipitación	Espectroscopia de emisión de llama o de absorción atómica. ICP	No es tóxico, similar al Ca	Regulado como trazador en muchos sitios.
Cesio	CsCl ₂	Cs ⁺	Alta sorción con porosidad intergranular					Ensayos con resultados negativos
Amonio	NH ₄ Cl	NH ₄ ⁺	Alta sorción y oxidación.			Mediante electrodos sensibles.	Tóxico para peces en pH alcalinos	Para suplir a la uranina por ser incoloro.
Dicromato	Cr ₂ O ₇ Na ₂ ó Cr ₂ O ₇ Na ₂	Cr ₂ O ₇ ²⁻		No existe en las aguas naturales.	Se reduce fácilmente a cromo trivalente, hay que reducirlo de nuevo.	Fotometría (tinción de amarillo intenso). Colorimetría exacta.	Tóxico.	Se utiliza en canales par medidas de descarga.
Nitrato	NO ₃ Na	NO ₃ ⁻						Sustituto de la uranina en subsuelos ácidos.
Nitrito		NO ₂ ⁻	Inestable con el oxígeno.			Análisis con Ácido sulfanílico y Naftanilamina.		Para medida de descarga en canales
Tiosulfato	S ₂ O ₃ Na ₂	S ₂ O ₃ ²⁻	Inestable en aguas ricas en oxígeno.			Titulación.		Medida de escorrentía
Sales de Manganeso	SO ₄ Mn	Mn ₂₊				Oxidación con persulfato o permanganato y titulación.		Usado en medidas de descarga.
Sales de níquel	Ni(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	Ni				Colorimetría		Medidas de descarga
Sales de zinc	ZnCl ₂	Zn ²⁺				Polarografía, colorimetría o espectrometría de absorción atómica.	Tóxico para los peces.	Se ha usado en karst.
Molibdato	Heptamolibdato de amonio	Mo ₇ O ₂₄ ⁶⁻	No reacciona con el terreno.	Escaso, 0,1 _g/L.		Polarografía.		Usado en karst.
Tiocianato	SCN ⁻	SCN ⁻						Reemergencia de aguas da inundación.
Bromuro	BrNa, BrK ó BrNH ₃	Br	No tiende a la sorción ni reacciona con microorganismos.	Trazas.		¿Métodos químicos o análisis de activación? Cromatografía iónica, análisis de dilución de isótopos y electrodos sensibles.	Sustancias cancerígenas con compuestos de depuración.	Los análisis son costosos y complejos.
Yoduro	I ⁻	I ⁻	Transformaciones a yodato, se incorpora a organismos.		Recomendado para cortos tiempos y distancias sin contaminación orgánica.	Cromatografía iónica, electrodos sensibles y espectrometría de masas.		

Fuente: Modificado de Käs, 1998.

Tabla 60: Otros trazadores y sus características.

SURFACTANTES, AROMAS Y OTROS					
		Ensayos de trazado	Análisis	Aplicación	Toxicidad
Surfactantes Sustancias químicas que reducen la tensión superficial de los líquidos y sirven como agente humectante o detergente. Los aniónicos sirven para trazado cualitativo o cuantitativo. Pueden ser "blandos" o "duros" (mejores como trazadores, menos biodegradables).		Para ensayos largos son preferibles los "duros" por su estabilidad. Hay que tener en cuenta los niveles de fondo, debidos a detergentes. Hay que evitar las turbulencias. Se utilizan como trazadores de apoyo. No cabe esperar adsorción.	Cualitativo mediante la aparición de espuma. Semi-cuantitativo mediante la medida de la altura de la espuma (difiere según la dureza del agua). Análisis colorimétrico con azul de metileno, cuantitativo Análisis fluorimétrico, límite de detección de 1 µg/L, también cuantitativo.	En terrenos kársticos, distancias de más de 12 km. Algún ensayo en acuíferos con porosidad intergranular.	No se conoce toxicidad de los alquilbencenos en animales de sangre caliente. Se recomiendan límites en las aguas de bebida.
Aromas		Se utilizan limonina isopentilacetato e isobornilacetato. Se deben emulsionar por su escasa solubilidad. Dan fuertes olores: limón, orquídeas y pino respectivamente.	Determinación organoléptica cualitativa. Determinación mediante cromatografía de gases cuantitativa, hasta niveles de detección organoléptica.	Usado en acuíferos kársticos.	Se trata de productos inócuos para los organismos o débilmente dañinos para la calidad del agua. La limonina es inflamable e irritante.
Otras sustancias químicas	Fenoles		Cualitativo (reacción con hipoclorito de calcio) y cuantitativo mediante colorimetría.		Acuíferos detríticos, negativos a veces por la distancia.
	Carbohidratos	Uso de dextrosa.	Cuantitativo mediante el análisis fluorimétrico.		
	Sust. químicas. perfluor	Se usan sulfohexafluoruro (SF ₆) y compuestos perfluor hidrocarbonados.	Cromatografía con detectores de captura de electrones, límite de detección muy bajo.		
	Ácido benzóico.				En agua termal.
ISÓTOPOS RADIATIVOS Y ACTIVABLES					
Cuales se utilizan	Ensayos con trazadores	Análisis	Aplicaciones		
Isótopos radiactivos naturales: ³ H, ⁵¹ Cr, ¹¹⁴ In, ⁵⁸ Co, ⁶⁰ Co, ⁸² Br, ¹³¹ I, ²⁴ Na, ¹⁹⁸ Au. Isótopos de activación: Bromo, Indio, Disprosio, Tecnecio, Europio.	Se debe considerar la vida media del trazador y la técnica de detección (se detecta mejor la radiación gamma, y en el tritio también la beta). Normalmente aniones para evitar adsorción (⁸² Br y aniones complejos con quelatos). Hay excepciones como el ¹³¹ I. Medidas en laboratorio, excepto en investigaciones locales (entre 2 pozos). Hay que tener en cuenta la sorción e intercambio iónico (superficie de contacto, roca).	Medida de la radiación normalmente la radiación γ , aunque en el caso del tritio se puede utilizar también la β . Los naturales se miden en la muestra según se recoge, los activables necesitan una activación del elemento a medir (normalmente mediante irradiación con neutrones) que producirá isótopos radiactivos.	En aguas superficiales. En aguas subterráneas: Acuíferos kársticos. Acuíferos con porosidad intergranular, con superficies no excesivas para evitar la sorción.		

Fuente: Modificado de Kääs, 1998.

Tabla 61: Relación de trazadores de dispersión y sus características.

ESPORAS			
Tipos	Coloración de las esporas	Ensayos de trazado	Aplicación
Se trata en todos los casos de esporas del tipo <i>Lycopodium cavatum</i> que pueden ser: Esporas naturales (no se usan en la actualidad). Esporas teñidas simples: Con colorantes no fluorescentes. Con colorantes fluorescentes.	El colorante debe: Ser rápido, bien adherido, resistente y estable en el agua. Tener intensidad de tinción. Preservar la integridad de la espora. Ser inócuo.	La toma de muestras se hace mediante "mallas de esporas". No se hace un análisis cuantitativo El exceso de esporas puede ser ventajoso, no son tóxicas. Mediante la tinción en diversos colores se pueden hacer ensayos múltiples Se usan colorantes fluorescentes para reducir el tiempo de análisis.	Se aplican en terrenos kársticos ya que de manera natural sólo aparecen en terrenos ácidos y pobres en carbonato. Se pueden tomar muestras en lugares de difícil acceso. Mejor que otros para determinar conexión hidráulica. Se han usado en terrenos kársticos y en conductos en basaltos, no se conocen ensayos en acuíferos con porosidad intergranular o fisurados o en aguas superficiales.
MICROESFERAS FLUORESCENTES			
Qué son	Ensayos de trazado	Aplicación	
Partículas esféricas microscópicas de plástico (poliestireno) teñidas con colorantes y eléctricamente neutras.	Sólo son validas las de superficie con carga neutra. Se toman muestras puntuales, no por acumulación (diferente de las esporas). Se recomienda tamaño de 1 µm para simular bacterias. Es necesario tomar precauciones en la preparación e inyección.	Se puede simular la dispersión de bacterias patógenas (mediante la elección adecuada del diámetro). Se utilizan como trazadores auxiliares. En acuíferos fisurados con escasa recuperación. Se han usado también en acuíferos con porosidad intergranular y sobre todo en kársticos.	
BACTERIAS			
Tipos	Propiedades necesarias para el ensayo	Aplicación	
<i>Serratia marcescens</i> <i>Escherichia coli</i> <i>Bacillus stearothermophilus</i> <i>Pseudomonas violacea</i> <i>Bacillus acidocaldarius</i> Otros microorganismos	Se necesita: Facilidad de crecimiento en cultivos grandes. Inocuidad y no presencia en el agua a trazar, así como carencia de movilidad propia y capacidad de reproducción en el agua. Ausencia de sorción. Vida lo más larga posible. Facilidad de distinción.	Son un buen soporte para la delimitación de áreas de protección de aguas subterráneas. Algunos aislados pueden sobrevivir más de 50 días, pero no es lo habitual (o mueren o quedan retenidos). En acuíferos fisurados se han hecho ensayos positivos, en medios con porosidad intergranular positivos y negativos, en kársticos se puede llegar a determinaciones semicuantitativas. También se usan en la zona no saturada. En aguas superficiales.	
FAGOS			
Qué son / utilidad	Propiedades necesarias para el ensayo	Aplicación	
Son virus bacteriales de entre 20 y 350 nm sin movilidad natural que se inyectan como soluciones coloidales para el trazado. Se utilizan para trazar debido a su inocuidad e invisibilidad, facilidad de análisis en placa Petri con agar, se pueden diferenciar mezclas de fagos en la misma muestra y los cultivos no son muy grandes.	Inocuidad. No presente en el agua a trazar ni interacción con otros microorganismos. No afectar al flujo, moverse con el agua y con sufrir adsorción, filtración o eliminación. Ser estable durante el tiempo adecuado. Las cantidades para los ensayos deben ser pequeñas y de fácil análisis. Bacteria anfitrión: ausente de las aguas, facilidad de crecimiento y multiplicación en el agua, inócuo, sin relaciones líticas con el fago.	En la zona no saturada como marcadores del flujo vertical de la infiltración. En acuíferos con porosidad intergranular, para delimitación de áreas de protección. Mejor en acuíferos de grano grueso. Interactúan con las partículas negativas. En acuíferos kársticos hay que considerar, la adsorción a las partículas coloidales y el flujo. Similar a trazadores químicos con menos dispersión. Menos usado en los fisurados. Aguas superficiales y aguas residuales.	
GEOBOMBAS			
Qué son	Cómo funcionan	Aplicación	
Esferas de plástico con la mitad llena de explosivo plástico, un detonador y un temporizador	Mediante la explosión se generan ondas sonoras que se registran mediante geófonos en superficie.	Con la utilización de varios se puede obtener un modelo tridimensional de la zona de flujo en zonas kársticas.	
OTRAS PARTÍCULAS DE DISPERSIÓN			
Serrín, astillas, láminas de plástico, pelotas, corchos, plásticos granulados, diatomeas, confeti, almidón, semillas, óxido de telurio, polvo de aluminio, levadura, anguilas marcadas			

Fuente: Modificado de Kääs, 1998.

Tabla 62: Relación de isótopos y otros trazadores ambientales y sus características.

ISÓTOPOS AMBIENTALES							
	Isótopos	Origen	Variaciones en la naturaleza	Reacciones	Vida media	Datación e interpretación	Análisis
En el agua	Deuterio (² H) Oxígeno 18 (¹⁸ O)	Agua de lluvia "marcada" espacial y temporalmente. Se mide en todo el mundo.	En los diferentes estados del agua (fraccionamiento) Existen diferencias estacionales y espaciales, también por la altitud y la precipitación caída. "Efecto continental".			Meses a años.	
	Tritio	Nivel natural > 10 TU. Ensayos de armas nucleares entre 1952 y 1963. Existen registros. También centrales nucleares.	Según los ensayos nucleares y estacionales Mayor en el hemisferio norte, con variaciones locales.			Meses a años.	
Gases nobles inertes	Helio 3 y Helio 4 (³ He, ⁴ He)	Manto y descomposición radiactiva de partículas α. ³ He por descomposición del ³ H y armas nucleares.		Cambios por procesos físicos en sistemas abiertos.			
	Argón 40 (⁴⁰ Ar)	En la atmósfera por neutrones secundarios de la radiación cósmica. En el subsuelo por reacciones nucleares inducidas en la roca acuífera (necesario análisis de U, Th, C y Ca)			269 años.	100 a 1000 años.	
	Kriptón 85 (⁸⁵ Kr)	Centrales nucleares.	Muy leves.				
Carbono	Carbono 13 y carbono 14 (¹³ C, ¹⁴ C)	¹³ C según plantas C ₃ o C ₄ . ¹⁴ C en la atmósfera por neutrones secundarios. Variaciones hasta un 200% por los ensayos nucleares.	Por armas nucleares		¹⁴ C = 5730 años.	1000 a decenas de miles de años. Complicada interpretación por múltiples reacciones.	
Cloro	Cloro 36 (³⁶ Cl)	En la atmósfera a partir del Ar. En rocas superficiales por radiación cósmica y profundas por los neutrones de la descomposición U/Th.	Por armas nucleares.	Escaso radio y poca sorción	3·10 ⁵ años	Cientos a miles de años. Único método para aguas de más de 50000 años.	
Azufre y nitrógeno	Azufre 34 y Nitrógeno 15 (³⁴ S y ¹⁵ N)	³⁴ S por reducción bacteriana, lluvia radiactiva. ¹⁵ N normalmente por los nitratos, antrópico.				Indican origen y evolución geoquímica del agua.	
SUSTANCIAS QUÍMICAS AMBIENTALES							
Mediante liberación progresiva	Uranina (cosméticos, baño y limpieza, no se descompone en las depuradoras)						
	Ácido bórico (detergentes de lavanderías, contenedores y paquetes de detergentes en vertederos y fertilizantes minerales)						
	Cloro (NaCl de deshielo de carreteras, sobreexplotación en zonas costeras, acumulación como derivado de explotación de otras sustancias)						
Por accidentes que dañan el agua subterránea							
ORGANISMOS AMBIENTALES							
Pólenes y bacterias fósiles que demuestran conexión con formaciones de rocas. Infiltración de colonias de bacterias desde aguas superficiales.							
EFECTOS FÍSICOS AMBIENTALES							
Temperatura: localización de zonas permeables y de infiltración de aguas superficiales.							

Fuente: Modificado de Kåas, 1998.

8. PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO URBANO EN MEDIOS FISURADOS. MÉTODOS Y CONSIDERACIONES ESPECÍFICAS

La delimitación de perímetros de protección en medios fracturados requiere en primer lugar evaluar si el medio se comporta hidráulicamente de un modo asimilable a un acuífero con porosidad intergranular a la escala de los perímetros de protección (con flujo laminar, homogeneidad del medio, aplicabilidad de la ley de Darcy a la escala del problema entre otros factores). Si es asimilable se aplicará la misma metodología y zonación definidas para los perímetros de protección en el capítulo 6. En el caso de no poder asimilarlo es necesario efectuar una metodología específica que contemple adecuadamente aspectos como heterogeneidad, anisotropía, flujo rápido y turbulento, las limitaciones respecto a la aplicabilidad de la ley de Darcy por el régimen turbulento y sus repercusiones en la zonación correspondiente.

En la figura 69 se esquematizan algunos aspectos que deben contemplarse en la delimitación de perímetros de protección en medios fisurados que implican modificación en las líneas de flujo respecto a las que se producirían en un medio con porosidad intergranular o asimilable al mismo.

En los acuíferos fracturados la conductividad hidráulica y la velocidad del agua pueden diferir en varios órdenes de magnitud dependiendo de la dirección, ya que pueden ser medios altamente anisotrópicos en tres dimensiones. En la figura 70 A se ilustra el efecto de esta anisotropía en un acuífero, que podría provocar un flujo cuya dirección no fuese perpendicular a las isopiezas, sino con un cierto ángulo respecto a éstas y su lógica repercusión en la zona de alimentación de las captaciones. Por su parte en la figura 70 B se muestra como la existencia de fracturas verticales pueden "cortocircuitar" sistemas de flujo regionales.

Para determinar si un medio fracturado se comporta como un medio con porosidad intergranular hay que analizar los siguientes aspectos (USEPA, 1991 a):

1. Interpretación de ensayos de bombeo.

Los tres aspectos a evaluar son:

– Los descensos en los pozos de observación que se incrementan linealmente con aumentos en el caudal en el pozo de bombeo son característicos de medios equivalentes a acuíferos con porosidad intergranular, no comportándose así en medios fracturados no asimilables (Figura 71 A).

Hickey, 1984, en USEPA, 1991 a, propone efectuar ensayos de bombeo escalonados de 1 hora de duración con incrementos sucesivos del caudal para obtener la gráfica que permita evaluar este factor.

– La gráfica de descensos respecto al tiempo de pozos para diferentes caudales presentarán forma "de curva continua" sin inflexiones en los medios asimilables a porosidad intergranular, en lugar de las inflexiones características de los medios no equivalentes (Figura 71 B).

– Las isolíneas que definen el cono de bombeo, obtenidas empleando diversos pozos de observación, son circulares o elípticas en medios equivalentes a acuíferos con porosidad intergranular, mientras que los conos de bombeo lineales o muy irregulares indican lo contrario (Figura 71 C).

2. Superficie del nivel piezométrico.

En los acuíferos fracturados asimilables a medios con porosidad intergranular las isopiezas son continuas y de formas suavizadas, sin áreas con cambios rápidos de nivel o niveles anómalos.

Por el contrario las formas escalonadas son características de medios con fracturas espaciadas, con grandes contrastes en los valores de conductividad hidráulica entre bloques y fracturas, no siendo asimilables a acuíferos con porosidad intergranular.

Hay que reseñar no obstante que aunque si existen esos escalonamientos indica claramente que

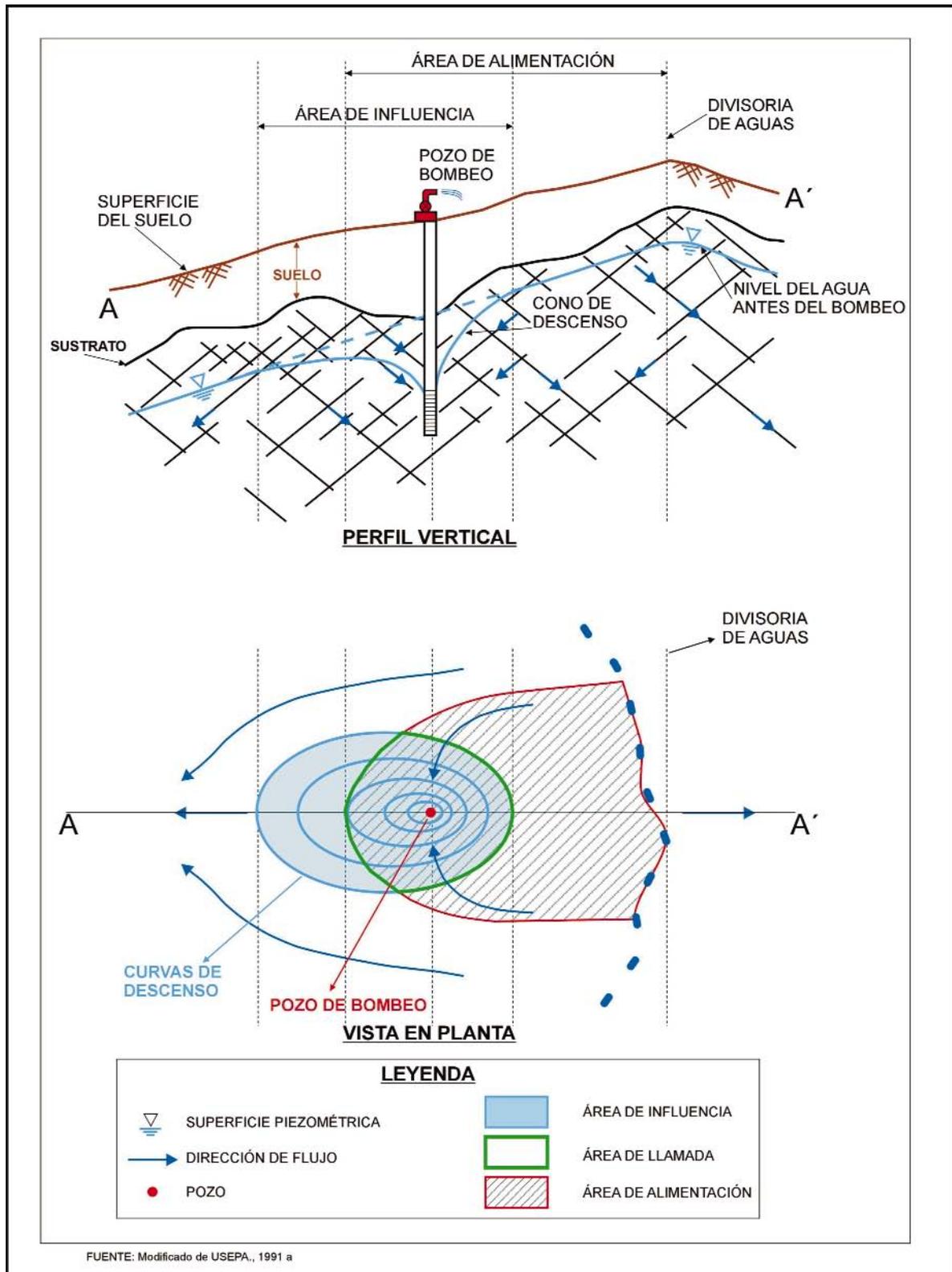


Figura 69: Esquema del área de alimentación y de influencia correspondiente a la delimitación de perímetros de protección en medios fisurados.

no es aceptable su asimilación la existencia de isopiezas suavizadas no prueba que se comporte como medio con porosidad intergranular, ya que para la detección de esas irregularidades en las

isopiezas podría ser necesario un espaciado entre pozos de observación menor, lo cual no es posible en muchas áreas en que se deben delimitar perímetros de protección.

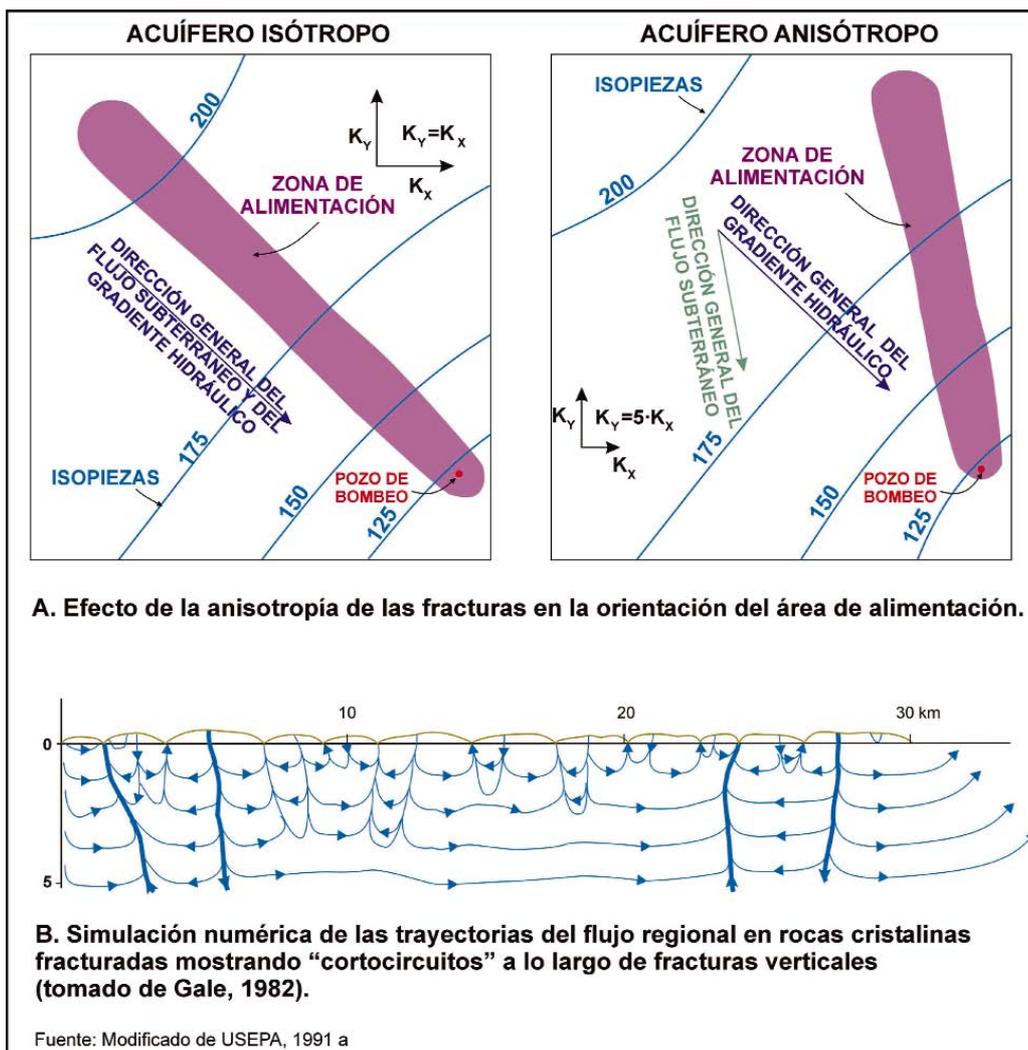


Figura 70: Efecto de las fracturas en el movimiento del agua.

Es importante además efectuar un análisis de los gradientes hidráulicos verticales ya que en sistemas fuertemente fracturados es muy frecuente que el nivel piezométrico varíe significativamente con la profundidad, debiéndose registrar a lo largo del tiempo en diferentes estaciones para detectar cambios.

3. Proporción de la fracturación respecto a la escala del perímetro.

Para los acuíferos equivalentes a medios con porosidad intergranular las fracturas verticales y horizontales observables deben ser numerosas y la escala de la fracturación mucho menor que la correspondiente al ámbito del perímetro de protección. Como primera aproximación la dimensión mínima del perímetro de protección debería ser al menos cien veces la correspondiente al espaciado medio de la fractura.

4. Distribución de la conductividad hidráulica.

En medios asimilables a porosidad intergranular la distribución de la conductividad hidráulica debería ser aproximadamente log normal, mientras que en aquellos medios donde su distribución sea fuertemente bimodal no será posible asimilarlos.

5. Variaciones en la hidrogeoquímica.

En acuíferos fracturados no asimilables a medios con porosidad intergranular pueden existir grandes variaciones de un punto a otro del acuífero, así como en el tiempo.

El agua que se mueve por conductos normalmente tiene menos tiempo de contacto con mineralizaciones y un total de sólidos disueltos menor, así como un índice de saturación mineral más bajo que la que circula en acuíferos con porosidad intergranular con mineralogía similar.

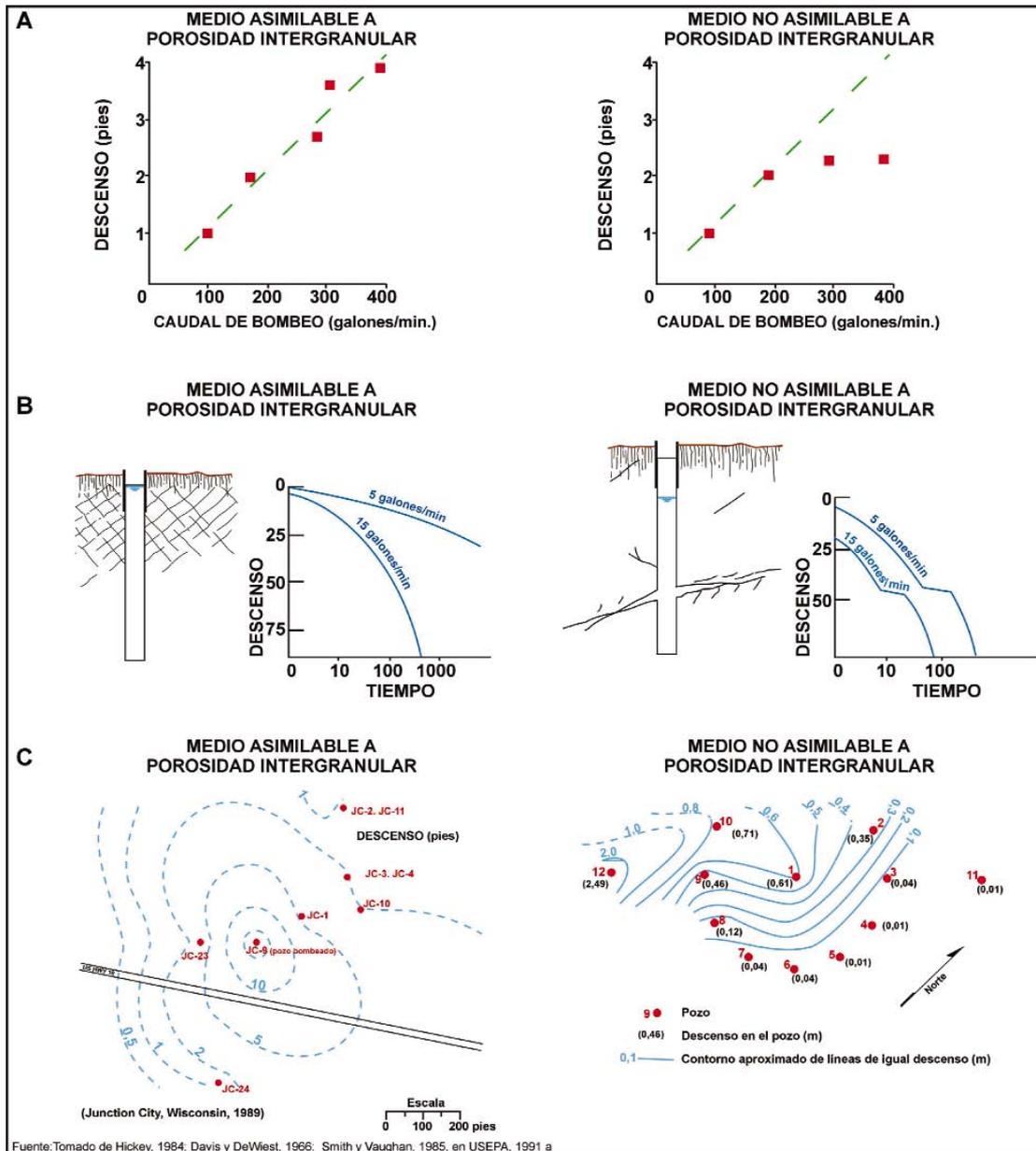


Figura 71: Respuestas de los ensayos de bombeo en medios asimilables o no asimilables a acuíferos con porosidad intergranular. A. Gráficos caudal/descenso. B. Curvas tiempo/descenso. C. Distribución areal del descenso.

En acuíferos asimilables a porosidad intergranular tiene normalmente valores de temperatura y de composición química relativamente uniforme en el tiempo y en diferentes lugares del acuífero como se indica en la figura 72.

Los valores altos de turbidez y de bacterias son más frecuentes en acuíferos con flujo por conductos. Si un pozo de bombeo nunca tiene valores significativos de turbidez ni de bacterias probablemente no está conectado a conductos importantes.

Por lo que respecta al establecimiento de zonas o consideraciones específicas para la delimitación de perímetros de protección en medios fisurados debe resaltarse que en los diversos países analizados, ver capítulo 2, solamente se contempla específicamente para los acuíferos fisurados en Portugal y Suiza.

En Portugal las dimensiones de las zonas en que se subdividen los perímetros de protección dependen de las características del acuífero, contemplando expresamente los medios "ígneos y metamórficos fisurados", a los que corresponden mayores dimen-

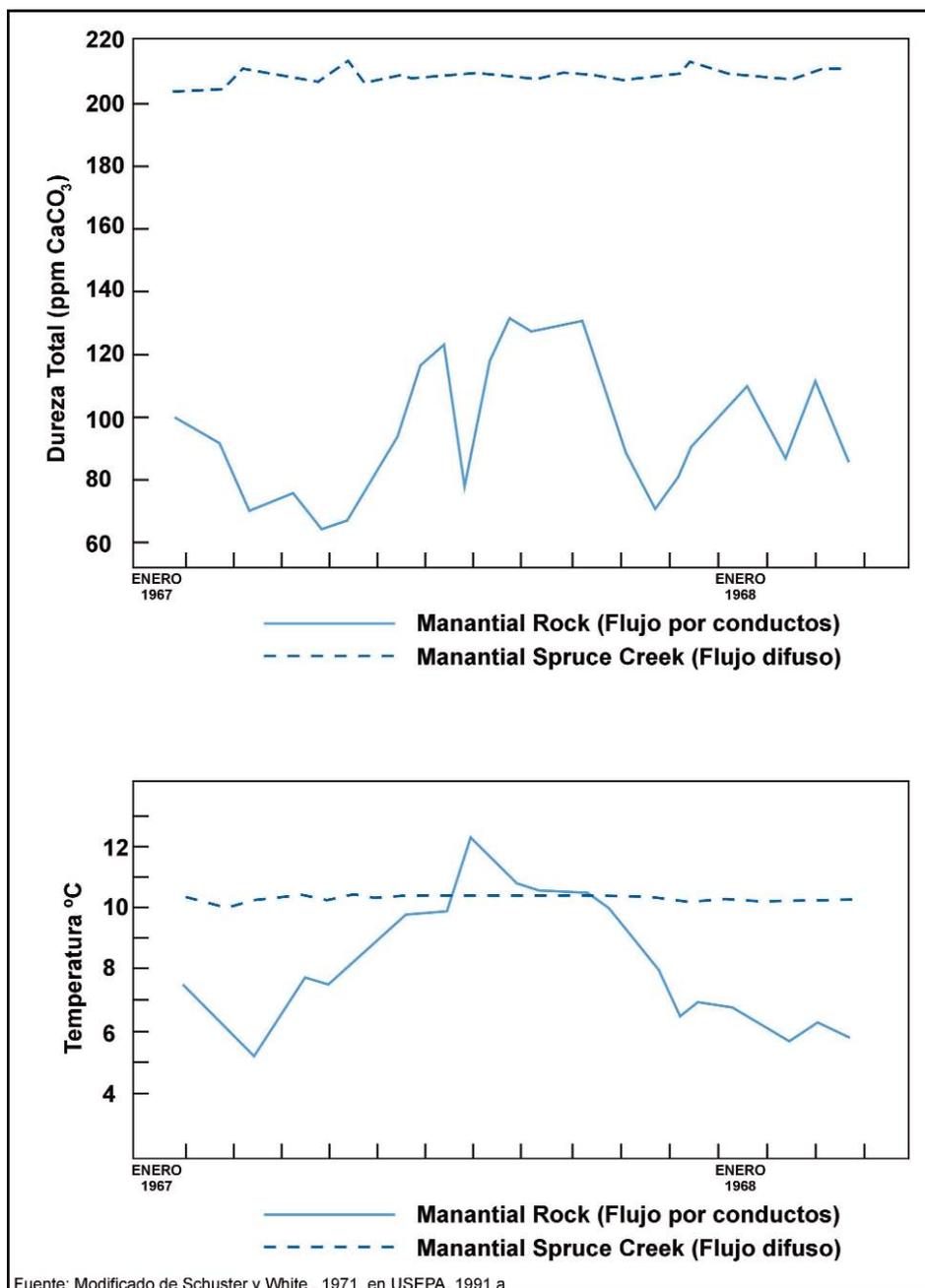


Figura 72: Ejemplos de variaciones hidroquímicas y de temperatura con el tiempo en acuíferos con flujo difuso y flujo por conductos.

siones que a los acuíferos libres en diferentes materiales y que a los acuíferos confinados, así como los "ígneos y metamórficos poco fisurados o alterados", considerando además el establecimiento de zonas especiales con conexión hidráulica directa a través de conductos kársticos o fracturas en el acuífero.

En Suiza se subdividen los perímetros de protección en acuíferos fisurados en tres zonas, como en los otros tipos de acuíferos, pero se consideran entre otros factores el desarrollo de la red de conductos y fisuras para la estimación de la vulnerabilidad que

define la extensión de las zonas S2 y S3, contempladas al subdividir los perímetros de protección en su legislación, de un modo semejante a lo considerado para los acuíferos kársticos, pero empleando metodologías e índices de vulnerabilidad específicos y diferentes en ambos casos.

En otros países se les da el mismo tratamiento que a los acuíferos kársticos. Así por ejemplo en Holanda se contempla para éstos únicamente dos zonas, agrupando las denominadas área de protección I, definida para un tiempo de tránsito de 10 años y el

área de protección II, con un tiempo de tránsito de 25 años, en una única zona (cuadro 5), con restricciones similares a las aplicables en ésta última.

En el caso de Alemania se les otorga el mismo tratamiento que a los kársticos siempre que el medio fisurado pueda considerarse como "asimilable a kárstico", con definición de zonas de mayor tamaño (cuadro 1).

En Francia pueden considerarse sus peculiaridades mediante la delimitación de perímetros satélite.

Además en varios de los países cuya normativa y estrategia de protección del recurso ha sido analizada en el capítulo 2 se considera para la delimitación de perímetros de protección diferentes métodos de análisis de la vulnerabilidad del acuífero adecuadas a las características de estos acuíferos, como es el caso de Irlanda además del ya mencionado anteriormente de Suiza.

En Estados Unidos, si bien no está definido el establecimiento de zonas específicas para delimitar perímetros de protección en acuíferos fisurados, se han desarrollado análisis metodológicos que contemplan particularidades en su protección (USEPA, 1991 a), con especial incidencia en la determinación de en qué casos puede considerarse que un acuífero fracturado se comporta como un medio con porosidad intergranular, cuya síntesis ha sido incluida al inicio de este capítulo.

En el caso de España no existen consideraciones específicas para la delimitación de perímetros de protección en acuíferos fisurados en la legislación aplicable, aunque han sido recogidos en diversos trabajos, dándoles un tratamiento semejante al propuesto para acuíferos kársticos (Moreno Merino et al., 1991).

A continuación se analizará en detalle la metodología desarrollada en Suiza para delimitación de perímetros de protección en captaciones en medios fisurados (Apartado 8.1), así como la síntesis de una metodología para delimitación de perímetros de protección en dichos medios basada en la definición de contornos de probabilidad (Apartado 8.2).

8.1. Metodología para la protección de captaciones en medios fisurados aplicada en Suiza

La metodología para la delimitación de perímetros de protección aplicada en Suiza considera que no es adecuado de manera general el asimilar el acuífero fisurado a un medio continuo equivalente, ya que en

los acuíferos fisurados, entre otros aspectos antes reseñados, las velocidades de flujo son heterogéneas, por lo que el dimensionamiento de las zonas en que se subdividen los perímetros de protección en base a las velocidades de flujo y por tanto el tiempo necesario para que el agua subterránea alcance la captación (empleado habitualmente en medios con porosidad intergranular o asimilables en su funcionamiento a los mismos) no es apropiado.

Por su parte el método EPIK (analizado en el apartado 7.2.), desarrollado para zonas de protección en medio kárstico, no es tampoco aplicable a medios fisurados no kársticos.

La gran importancia que tienen en numerosas regiones en Suiza los acuíferos fisurados en el suministro de agua potable para abastecimiento a la población y las particularidades de su protección, contempladas en la legislación de dicho país, como se analizó en el capítulo 2, que prevé que el dimensionamiento de zonas de protección se realice en base a la vulnerabilidad de la cuenca de alimentación de la captación, motivaron el desarrollo del método DISCO (Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage, OFEFP, 2002) específico para la delimitación de zonas de protección en acuíferos fisurados.

El desarrollo de la metodología, diseñada de manera específica para casos de *captación de manantiales* (al ser en Suiza poco frecuentes los sondeos), se ha llevado a cabo por el Centro de Hidrogeología de la Universidad de Neuchâtel en colaboración con la Sociedad Suiza de Hidrogeología y los servicios especializados de la Confederación Helvética. Incluye un inventario de las observaciones necesarias para la caracterización del funcionamiento de los acuíferos fisurados y una descripción de los métodos para delimitar las zonas de protección en los diferentes casos posibles como se analiza en los siguientes apartados.

8.1.1. Características de los medios fisurados

El modelo conceptual contemplado para analizar el funcionamiento de estos acuíferos es el siguiente:

- Presencia de una red de discontinuidades principales caracterizadas por conductividades hidráulicas elevadas. Tienen una función predominante de conducción. Sirven de drenes y alimentan las principales zonas de salida del agua.
- Resto del macizo, considerado relativamente homogéneo. Caracterizado por una porosidad intersticial o de fisuración débil que se traduce en una conductividad hidráulica mucho más baja que la anterior.

- La recarga del acuífero se efectúa a nivel de las discontinuidades principales y de las rocas menos permeables.
- El agua captada en el área de salida es una mezcla de agua joven (ligada a una red de estructuras permeables conectadas con la captación) y de agua de más edad (ligada a la alimentación de áreas menos permeables, lentamente drenada por las discontinuidades principales).

Los principales factores determinantes del funcionamiento de los acuíferos fisurados son:

Litología

- Presencia o no de planos de estratificación o esquistosidad (flujo a través de los límites de los paquetes).
- Presencia o no de una porosidad matricial (medios de doble porosidad).
- Mayor o menor presencia de minerales solubles u oxidables, junto con la mayor o menor consolidación de la roca (aumento de la posible abertura de las discontinuidades por disolución o erosión).
- Tipo de comportamiento mecánico de la roca: rígido y frágil o plástico (fracturación más o menos desarrollada y clivaje más o menos acentuado para diferentes rocas bajo una misma tectónica).

Tectónica

- Contexto tectónico (intensidad de la deformación, distribución de las discontinuidades, deformación dúctil/frágil).

Relieve

- Distribución de potenciales hidráulicos en el acuífero. En zonas de relieve abrupto son frecuentes gradientes particularmente altos que implican velocidades de flujo elevadas.
- Fenómenos de disolución y/o erosión mecánica. Estos fenómenos pueden llevar a un aumento de las conductividades hidráulicas a lo largo de las fisuras, particularmente en las direcciones de los gradientes hidráulicos.
- Ruptura y apertura de las redes de fracturas por las fuerzas gravitatorias. Pueden provocar un aumento de las conductividades hidráulicas en las primeras decenas de metros desde la superficie (hasta cientos de metros quizás).

Otros parámetros que tienen también influencia en el funcionamiento de los acuíferos fisurados son:

Influencia de las glaciaciones

- Presencia de depósitos fluvio-glaciales superpuestos al acuífero fisurado.
- Exfoliación (abertura de discontinuidades debida a descompresiones post-glaciares).

Relación con las aguas superficiales

- Alimentación directa de ciertas fisuras y posibilidad de su puesta en carga.

La explotación de los acuíferos en la zona donde se ha desarrollado el método propuesto (Plataforma suiza, Alpes y Prealpes) se hace mediante la captación de surgencias naturales mediante galerías y más raramente sondeos. Por este motivo en el desarrollo metodológico propuesto se hace hincapié en los manantiales y galerías sin abordarse específicamente las metodologías para sondeos.

La mayoría de los acuíferos fisurados explotados en Suiza se encuentran en zonas accidentadas, estando los riesgos de contaminación generalmente ligados a la ganadería, la agricultura de montaña y el turismo (básicamente contaminación biológica), aunque la infiltración de otras sustancias (como los hidrocarburos) representan también un factor de riesgo importante. En las zonas poco accidentadas los productos agrícolas e industriales representan también un peligro adicional.

En las captaciones de manantiales y galerías no se pueden obtener los parámetros mediante un ensayo de bombeo. Por esto es indispensable estudiar la estructura del acuífero y el comportamiento hidrológico de la captación (caudal y parámetros físico-químicos).

8.1.2. Metodología para la delimitación de las zonas de protección en medio fisurado

El estudio de numerosos acuíferos fisurados ha mostrado la existencia de funcionamientos hidrogeológicos muy dispares, por lo que no se puede proponer un único método para la delimitación de las zonas de protección. Una aproximación como la indicada en la figura 73 permite elegir el método más adecuado en base al análisis del funcionamiento hidrogeológico del área estudiada.

La metodología se desarrolla en tres etapas según la complejidad del caso a tratar:

- Toma de datos de base: análisis de la variación del caudal, temperatura y conductividad, definición del contexto hidrogeológico, límites de la cuenca de alimentación, características de la captación, vulnerabilidad y riesgos de contaminación de la misma.
- A continuación (para captaciones vulnerables) toma de datos complementarios para evaluar la heterogeneidad del acuífero (zonas de infiltración preferente, características de las discontinuidades, evolución de caudal, temperatura y conductividad en crecidas, así como ensayos de trazadores).
- Delimitación de las zonas de protección según el método adecuado.

8.1.2.1. Toma de datos de base. Evaluación de la vulnerabilidad de la captación

Sobre la base de los datos existentes y de informaciones complementarias se deben analizar los siguientes aspectos:

- Descripción de la situación, tipo y estado de la obra de captación.
- Caracterización del contexto geológico e hidrogeológico.

Distribución de las propiedades hidráulicas generales de las diferentes formaciones.

Inventario de las principales familias de discontinuidades a escala local (fracturas en afloramiento) y regional.

- Determinación de los límites de la cuenca de alimentación de la captación.

La determinación de la extensión de una cuenca de alimentación mediante el cálculo del balance anual se efectúa en cuatro etapas:

1. Determinación de la infiltración eficaz (I), en base a la estimación de la precipitación (P), evapotranspiración (ETP) y escorrentía (R):

$$I = P - ETR - R$$

2. Estimación del caudal anual de la captación (Q_{anual}).
3. Cálculo de la superficie aproximada de la superficie de la cuenca de alimentación:

$$S = \frac{Q_{\text{anual}}}{I}$$

4. Ajuste de los límites de la cuenca en función de las condiciones hidrogeológicas locales, analizando los datos existentes de ensayos de trazadores y considerando los siguientes aspectos: Topografía. Contraste de la superficie determi-

nada por el balance anual con la cuenca vertiente hidrológica.

Estructura geológica. Toma en consideración de la estructura geológica que determina la extensión de la cuenca hidrogeológica.

Presencia de otras surgencias. El incluir las surgencias situadas próximas a la captación permite:

- Fijar mejor los límites laterales, estimando groseramente la extensión de las cuencas de alimentación contiguas.
- Considerar los manantiales de aguas poco profundas que drenan el agua fuera de la cuenca de alimentación.

Contribución a sistemas de flujo más profundos. Parte del agua infiltrada en la cuenca de alimentación puede contribuir a alimentar sistemas de flujo más profundos si bien es difícil de cuantificar. Esto implica una subestimación de la superficie de la cuenca de alimentación calculada empleando el balance anual.

- Inventario de focos de contaminación, existentes y potenciales, en la cuenca de alimentación.
- Caracterización global de la vulnerabilidad de la captación. Se efectúa analizando los siguientes aspectos:

1. Caudal (Q), temperatura (T) y conductividad (C).

El comportamiento hidrogeológico de la captación debe ser evaluado en base a un número suficiente de medidas de Q, C y T (al menos diez) en un año hidrológico, con más medidas en periodos de fuertes precipitaciones (superiores a 15 ó 20 mm).

Su distribución en un año hidrológico permite por otra parte estimar el caudal medio y medir las fluctuaciones estacionales.

La reacción de una captación es fuertemente dependiente de las condiciones previas de humedad del suelo. Después de un largo periodo seco las precipitaciones fuertes se pueden traducir en una reacción muy débil del nivel de la captación, debido al déficit de agua. Igualmente lluvias similares en periodos húmedos pueden influenciar fuertemente los caudales, temperaturas y conductividades. Es indispensable tener medidas de un periodo de recarga significativo y garantizar la calidad y representatividad de las medidas, considerando para ello los siguientes aspectos:

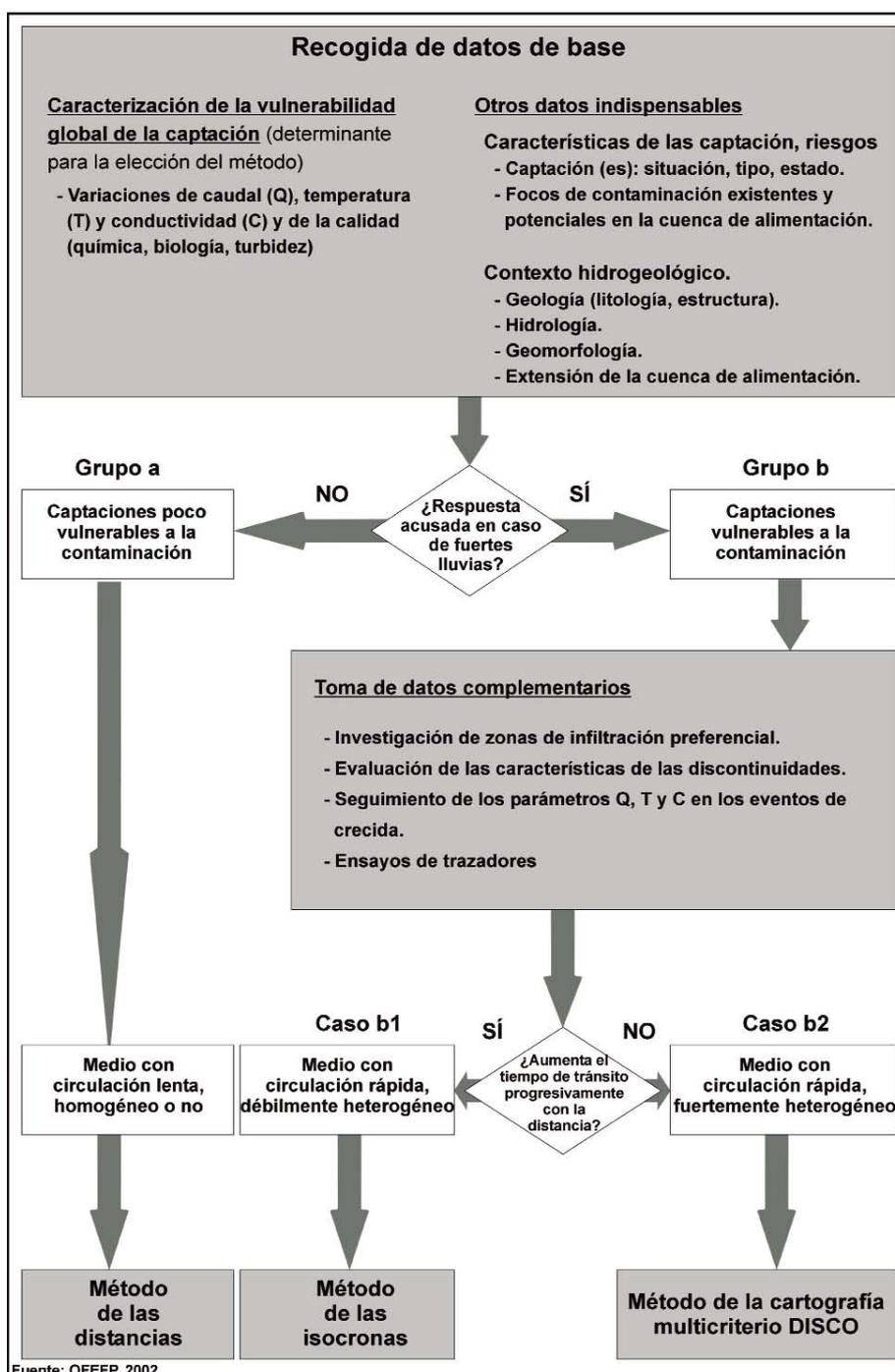


Figura 73: Metodología para la delimitación de zonas de protección en medio fisurado.

- Especificar el lugar de medida (captación, colector, depósito) y sus características. Son recomendables las medidas propias y cerca de la zona de surgencia.
 - Describir el método de determinación del caudal y una estimación de la incertidumbre asociada.
 - En las medidas de conductividad se deben indicar las características del equipo empleado y este debe ser calibrado.
 - Es imprescindible una breve descripción de las condiciones meteorológicas del día de muestreo y los días precedentes.
 - Se debe evaluar la fiabilidad de los datos, especialmente en el caso de que sean antiguos.
- Las medidas de caudal, conductividad y temperatura se deben representar en gráficos que contemplen también la pluviometría para facilitar su interpretación.

2. Calidad del agua

Se deben hacer un mínimo de tres medidas bacteriológicas para delimitar las zonas de protección. Las muestras deben tomarse en periodos en que los riesgos en la cuenca de alimentación sean altos (presencia de ganado, turismo) y tener en cuenta las condiciones meteorológicas (la probabilidad de contaminación biológica es mayor tras grandes lluvias).

El número y parámetros para analizar en los análisis químicos a efectuar depende en gran medida de las características de los focos de contaminación existentes. Así por ejemplo si hay agricultura intensiva se necesitan muchos análisis, sobre todo de nitratos y pesticidas. En zonas en las que la actividad agrícola se limita a la cría de ganado pueden ser suficientes dos análisis químicos de los iones mayoritarios, nitrato amonio y demanda de oxígeno.

Las medidas de turbidez pueden poner en evidencia la presencia de problemas siendo recomendable efectuar medidas específicas en periodos de crecida.

El análisis de los factores indicados permite dividir las captaciones (ver figura 73) en dos grupos:

- Grupo a: poco vulnerables

Se caracterizan por la estabilidad del caudal, de la conductividad y de la temperatura, incluso en caso de fuertes precipitaciones, la ausencia de problemas de calidad y la estabilidad de sus parámetros químicos. Esto permite concluir que las velocidades de flujo son lentas y los tiempos de residencia en el acuífero son altos. Las aguas permanecen el tiempo suficiente en el acuífero para depurarse antes de ser captadas.

Estos medios tienen una buena protección natural contra impactos naturales y antrópicos en la cuenca de alimentación, por lo que no se necesitan datos suplementarios para analizar su protección. Se pueden asimilar a un medio con porosidad intergranular para delimitar las zonas.

- Grupo b: vulnerables

Presentan fluctuación marcada de los caudales, conductividades y temperaturas en los casos de fuertes precipitaciones. Ésta se aso-

cia además a una degradación de la calidad desde el punto de vista bacteriológico y de la turbidez.

Están particularmente expuestas a la contaminación ya que una alta proporción de las aguas infiltradas transita rápido hacia la captación sin tiempo de ser filtrada y depurada de manera natural.

Los datos complementarios son imprescindibles para determinar qué partes de la cuenca de alimentación abastecen a la captación mediante circulación rápida y para evaluar el grado de heterogeneidad del acuífero.

Es necesario además considerar casos particulares entre los que cabe destacar los siguientes:

- Efecto pistón.

Un aumento rápido y neto de los caudales no está ligado de manera sistemática a la llegada de agua recientemente infiltrada, caracterizada por conductividades débiles. En el caso de un efecto pistón, el aumento de las cargas hidráulicas debido a lluvias abundantes moviliza aguas antiguas hacia la captación y por tanto el aumento de caudal no se acompaña de una bajada de las conductividades. Generalmente este efecto sí es seguido de una llegada de agua poco mineralizada (captación vulnerable). Según la estructura del acuífero puede suceder que sólo aguas antiguas contribuyan a la crecida (captación poco vulnerable).

- Captaciones vulnerables con débiles variaciones de caudal.

Se puede producir un aumento limitado de caudal acompañado de una degradación de la calidad del agua por:

- Existencia de un “*trop-plein*” o una zona de resurgencia temporal en periodos de aguas altas, en cuyo caso las variaciones de temperatura, calidad y conductividad son sensibles.
- Infiltración de una pequeña cantidad de agua de mala calidad a poca distancia de la captación. Se pueden mantener el caudal, la conductividad y la temperatura pero degradarse la calidad del agua.

8.1.2.2. Adquisición de datos complementarios para las captaciones vulnerables. Evaluación del grado de heterogeneidad del acuífero

Se analizan los siguientes aspectos:

- Investigación de las zonas de infiltración preferente

1. Análisis de la geología y la geomorfología del terreno.
2. Reconocimiento detallado del terreno coincidiendo con momentos de fuertes precipitaciones o nevadas (fenómenos de escorrentía y puntos de infiltración preferente).
3. Caracterización de la red hidrográfica (tramos fluviales con pérdidas).

– Características de las discontinuidades

Análisis de las fracturas en afloramiento (si es posible en galerías), evaluación de las características de los sistemas de discontinuidades (orientación, frecuencia, extensión, abertura, disolución, colmatación).

- Control de la variación de los parámetros caudal temperatura y conductividad en los eventos de crecida. Caracterización de los acuíferos por medio de hidrogramas.

El seguimiento de las variaciones de caudal, conductividad, temperatura y turbidez durante una crecida permite analizar las características del acuífero y su vulnerabilidad. Se han desarrollado diferentes métodos para evaluar la respuesta de los acuíferos kársticos, su estructura y funcionamiento. En medios fisurados se han hecho pocos trabajos, pero algunos de los métodos aplicados a los acuíferos kársticos pueden ser también válidos para estos.

1. Descomposición de un hidrograma en diversas fases

Se presenta a modo de ejemplo el esquema incluido en la figura 74. El aspecto de las diferentes curvas cambia de un acuífero o de un manantial a otro y según las condiciones hidrológicas. El efecto pistón (fases 1 y 2) no siempre se da. Las condiciones previas de humedad, las características de las precipitaciones influyen también en el hidrograma.

- Fases 1 y 2, efecto pistón: El aumento de los caudales no se acompaña de un cambio en los valores de la conductividad. El agua recientemente infiltrada no llega aún a la salida. La estabilidad de la temperatura y la turbidez confirma esta hipótesis. El agua antigua almacenada en el acuífero es movilizada hacia la salida por el aumento de la carga hidráulica. En la 1ª fase las características del agua se mantienen comparables a las del caudal de base previo. En la 2ª fase se observa un aumento de las conductividades, ligado a la movilización de aguas más mineralizadas de las zonas saturada y no saturada.
- Fase 3, las aguas recientemente infiltradas llegan a la salida: Se traduce por un pico negativo de la conductividad, una modificación de las temperaturas (positiva o negativa) así como un fuerte aumento de la turbidez. Las aguas infiltradas directamente en zonas de alta conducti-

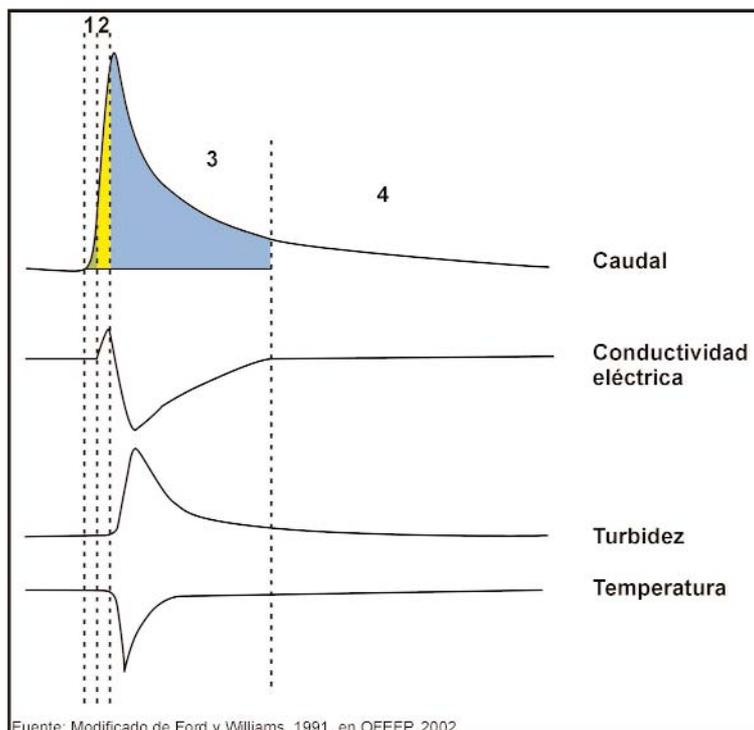


Figura 74: Descomposición de un hidrograma en diversas fases.

vidad hidráulica conectadas con la captación llegan rápidamente.

- Fase 4, la proporción de agua infiltrada recientemente disminuye progresivamente: Las aguas infiltradas durante la crecida contribuyen en escasa proporción al caudal y sus características químicas y térmicas se diferencian cada vez menos de las aguas antiguas por el contacto prolongado con el acuífero. Esta fase puede ser asimilada al caudal de base.

2. Descomposición de hidrogramas según el método de Maillet (1905)

La representación de la curva de recesión de un manantial con una escala semilogarítmica generalmente puede ser descompuesta en varios segmentos rectos. La curva de recesión corresponde a la sucesión de varias funciones exponenciales (Figura 75). Cada función exponencial se puede asimilar a un reservorio que se vacía más o menos rápido, caracterizado por una conductividad hidráulica más o menos elevada.

Los caudales iniciales de los reservorios considerados, marcados por Q_{0i} , los coeficientes de descenso α_i (pendiente de las rectas) y los tiempos t_i , correspondientes a la intersección de los segmentos, pueden ser calculados y permiten caracterizar los diferentes reservorios.

Este método permite la evaluación de la heterogeneidad del acuífero (a mayor diferencia de los coeficientes α mayor heterogeneidad de los acuíferos).

Los volúmenes que fluyen durante la decrecida, correspondientes a la superficie de los triángulos representados en la figura también se pueden calcular. Comparando éstos con una estimación grosera de los volúmenes infiltrados en la crecida (superficie de la cuenca de alimentación x precipitación eficaz) se puede calcular el porcentaje de aporte rápido. Cuanto más elevado sea éste y más rápido sea el vaciado de los reservorios más vulnerable se considerará el acuífero.

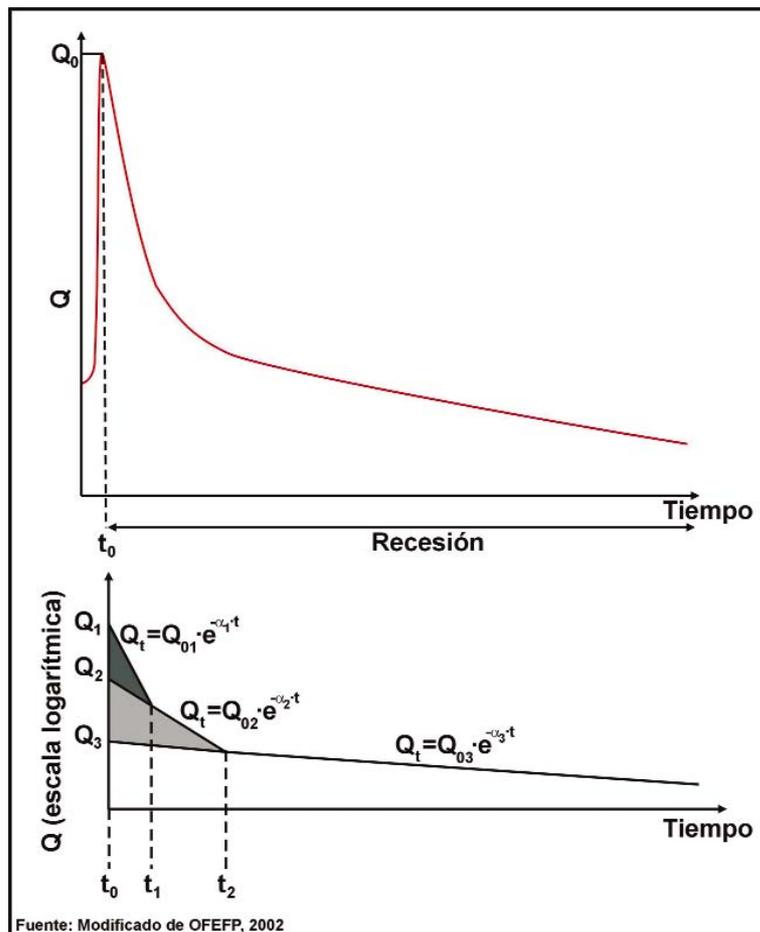


Figura 75: Ejemplo de un hidrograma en el que una curva de recesión puede ser descompuesta en tres funciones exponenciales.

– Ensayos de trazadores.

Permiten evaluar la velocidad de tránsito en el acuífero y verificar las hipótesis sobre las zonas de infiltración preferencial y la heterogeneidad del acuífero.

Al efectuar ensayos de trazadores en medio fisurado es conveniente contemplar los siguientes aspectos:

1. Lugar de inyección

En algunos casos, según el tipo de roca fisurada y su heterogeneidad, los resultados de los ensayos de trazado son altamente dependientes del punto de inyección. Es conveniente considerar los siguientes factores:

- Elección de una zona potencialmente permeable en base a criterios geomorfológicos, geológicos o geofísicos.
- Utilización de una superficie de inyección bastante extensa para optimizar las posibilidades de infiltración en las fracturas con conductividad hidráulica elevada.
- Realización de ensayos de infiltración en el lugar de inyección para asegurar que la zona elegida es suficientemente permeable.

2. Utilización de varios trazadores

El uso simultáneo de dos o tres trazadores diferentes permite aumentar las posibilidades de resultado positivo y facilita un mejor conocimiento de la organización de los flujos.

3. Condiciones hidrológicas

Las velocidades de flujo son menos elevadas en periodos de aguas bajas que en periodos de aguas altas. Es recomendable para determinar las velocidades de flujo la inyección de los trazadores en periodo de aguas relativamente altas cuando las condiciones son desfavorables para la calidad de las aguas.

4. Cantidad de trazador a inyectar

La recuperación de los trazadores en los medios fisurados es a menudo muy mala (porcentaje pequeño) y los picos se pueden prolongar durante un largo periodo (varias semanas) debido a una importante dispersión. Es por tanto importante inyectar una cantidad suficiente de trazador. Para un

mismo caudal que en medio kárstico o con porosidad intergranular se debe usar un volumen de trazador mucho mayor (por ejemplo 5 veces mayor).

5. Agua de inyección

El volumen inyectado debe ser suficiente para llevar el trazador hacia la zona saturada, pero no debe ser excesivamente grande con el fin de evitar la creación de gradientes hidráulicos desmesurados. Normalmente son suficientes entre dos y tres metros cúbicos para garantizar una buena penetración del trazador en la zona saturada.

6. Muestreo

Los riesgos de contaminación durante los ensayos de trazado se deben reducir al mínimo.

La toma de una muestra antes del ensayo de trazado es igualmente importante. Se aconseja tomar una muestra “en blanco” antes de organizar el ensayo de trazado para medir de manera eficaz el efecto residual de otros trazadores o la presencia de otra sustancia que pueda perturbar el análisis del trazador escogido.

La periodicidad de muestreo debe ser alta al comienzo y posteriormente se puede ir espaciando. Es indispensable un muestreo continuo durante el primer periodo de fuertes precipitaciones tras la inyección del trazador.

8.1.2.3. Delimitación de las zonas de protección para las captaciones vulnerables según el método adecuado al grado de heterogeneidad del acuífero

Sobre la base del análisis efectuado previamente, descrito en el apartado 8.1.2.2., se determina el origen de las contribuciones rápidas y puede ser evaluado el grado de heterogeneidad del acuífero. A partir de aquí se elige el método adecuado de delimitación de las zonas de protección contempladas en la legislación suiza que considera, como se detalló en el capítulo 2, las siguientes:

- Zona S1: destinada a evitar los daños en la captación y la contaminación del entorno inmediato.
- Zona S2: evita la contaminación microbiológica, la contaminación por excavaciones o trabajos subterráneos y que el flujo subterráneo sea perturbado por éstas.

- Zona S3: garantiza suficiente espacio y tiempo para establecer medidas sanitarias en el caso de que un foco de contaminación pueda amenazar a las aguas subterráneas (por ejemplo accidentes de vertido).

Se contemplan los siguientes supuestos:

– **Caso b1: medio fisurado débilmente heterogéneo a escala de la cuenca de alimentación de la captación.**

El tiempo de tránsito aumenta a medida que se aleja de la captación. La delimitación de las zonas se hace asimilando el acuífero a un medio equivalente continuo, aunque pueda ser heterogéneo a escala de metros o decenas de metros. La extensión de las zonas S se fija igual que en medios con porosidad intergranular tomando como base la evaluación de las velocidades medias mayores en el acuífero.

– **Caso b2: medio fuertemente heterogéneo a escala de la cuenca de alimentación de la captación.**

Una parte de los flujos va por una red de fracturas localmente muy permeables con posibilidades de conexiones rápidas (horas a días) entre la captación y otras zonas de la cuenca de alimentación. En este caso los tiempos de tránsito no aumentan necesariamente al alejarse de la captación. No es por tanto aceptable asimilar el acuífero a un medio continuo equivalente. En este caso es conveniente aplicar el método de cartografía multicriterio de la vulnerabilidad "DISCO" que permite el diseño de las zonas de protección teniendo en cuenta la fuerte heterogeneidad del medio.

Para la evaluación de la heterogeneidad de los acuíferos se tienen en cuenta los siguientes criterios:

Acuíferos débilmente heterogéneos: El tiempo de tránsito a lo largo de las fracturas más permeables aumenta de manera significativa con el alejamiento de la captación.

Acuíferos fuertemente heterogéneos: El tiempo de tránsito no aumenta de manera significativa en función del alejamiento. Son posibles las conexiones rápidas entre puntos de la cuenca de alimentación y la captación.

Datos que permiten diferenciar los dos tipos de acuíferos:

Discontinuidades y zonas de infiltración preferencial: la presencia de estas zonas, la disolución y erosión a

lo largo de las fracturas o la abertura importante de los sistemas hace suponer la existencia de una red de fracturas muy permeables (fuertemente heterogéneo).

Reacción de los caudales, las conductividades y la temperatura con las crecidas: Si una salida de agua se caracteriza por una reacción rápida de los caudales y conductividades a las lluvias fuertes hace suponer la existencia de una red de fracturas muy permeables que se vacían rápidamente (fuertemente heterogéneo). Si se caracterizan por una cierta inercia, variaciones menos intensas y decrecida relativamente lenta, se puede intuir una red de fracturas de permeabilidad moderada y/o relativamente mal conectada con la captación (débilmente heterogéneo).

Ensayos de trazadores:

Interpretación de las velocidades de tránsito: se considera muy heterogéneo aquel acuífero con velocidades del orden de 100 m/día o superiores o en el que la isocrona de 10 días se extiende más allá de la cuenca de alimentación y por tanto implica delimitar una zona S₂ desproporcionada.

Interpretación de las curvas de recuperación: si la tasa de recuperación es elevada y con un pico poco disperso temporalmente esto tiende a mostrar la existencia de una red de fracturas de alta permeabilidad (altamente heterogéneo). La dispersión del pico en el tiempo puede estar relacionada con la circulación a lo largo de grandes estructuras de permeabilidad moderada o de una red de fracturas numerosas interconectadas (débilmente heterogéneo).

8.1.3. Delimitación de zonas de protección en acuíferos fisurados asimilables a medios continuos equivalentes

Para su delimitación se consideran tres tipos de medios:

- Captaciones poco vulnerables (grupo a de la figura 73). Los casos en que se demuestra la ausencia de reacciones rápidas ante fuertes precipitaciones y que la calidad del agua sea constante.

Se establece la extensión de las zonas S de la siguiente manera:

- Zona S1: mínimo de 10 m en el entorno de la captación o aguas arriba de la obra (drenos, galerías). Si hay discontinuidades relacionadas con la captación se deben de incluir en la zona S1. Si existen fuertes pendientes con escorrentía superficial la zona se debe extender lo suficiente para evitar la infiltración de contaminantes hacia la captación.

- Zona S2: límite legal mínimo de 100 m con el límite de la zona S1 aguas arriba en la dirección general del flujo.
 - Zona S3: La distancia con los límites de S1 debe ser al menos el doble de la anterior.
- Medio débilmente heterogéneo a escala de la cuenca de alimentación (grupo b1 de la figura 73). Las captaciones presentan una reacción rápida a las precipitaciones fuertes (captaciones vulnerables) y el tiempo de tránsito aumenta progresivamente con la distancia a la captación. Se delimitan las zonas de protección como en medio con porosidad intergranular evaluando las velocidades de tránsito en el acuífero. Si se dispone de varios ensayos de trazado se usa la velocidad más elevada.
- En los acuíferos fisurados, incluso en los asimilados a medios con porosidad intergranular a escala de la cuenca de alimentación, los valores de conductividad hidráulica pueden ser muy heterogéneos a escala métrica o decamétrica, la determinación de los gradientes hidráulicos y de la conductividad hidráulica generalmente no es posible (escasa representatividad de los piezómetros, dificultad para ejecutar ensayos de bombeo). En estos casos los trazadores se convierten en el sistema más eficaz para evaluar la velocidad en el acuífero. Las velocidades, no obstante, dependen del lugar de inyección, por lo que es necesario elegir una zona de buena conductividad hidráulica y repartir el trazador en una zona suficientemente extensa.

Las zonas S se determinan de la siguiente manera:

- Zona S1: similar al caso precedente (grupo a).
- Zona S2: su límite corresponde a la isocrona de 10 días calculada sobre la base del ensayo de trazado, con un límite mínimo legal de 100 m aguas arriba de la captación.
- Zona S3: distancia entre S2 y S3 similar a la que hay entre S1 y S2.

Además de estos tres grupos indicados cabe además considerar los siguientes casos particulares:

- Donde los flujos superficiales o subterráneos (cursos de agua que se infiltran, escorrentía abundante, drenaje natural o artificial) son susceptibles de favorecer el transporte de los contaminantes hacia las zonas S1 y S2 delimitadas según esta metodología se proponen las medidas siguientes:
- En presencia de escorrentía difusa o de drenaje en el interior de la cuenca hidrológica de la captación se agrandarán los límites de estas zonas.
 - En presencia de cursos de agua que se infiltran será necesario proteger estos según la norma aplicada para las zonas Z (Apartado 2.10.).

- En caso de infiltración puntual de un curso de agua que contribuya a la alimentación de la captación por conexiones rápidas se evaluará la posibilidad de impermeabilizar su lecho.
- Si los datos geológicos, geomorfológicos, geofísicos o los ensayos de trazadores indican que una captación está en relación directa con una o varias facturas se deben tener en cuenta a la hora de delimitar las zonas S1 y S2.

8.1.4. Método de cartografía multicriterio "DISCO". Delimitación de las zonas de protección en acuíferos fisurados fuertemente heterogéneos

El método "DISCO" (discontinuidades, cobertera de protección) se aplica para medios fisurados fuertemente heterogéneos (caso b2 de la figura 73) en presencia de circulaciones muy rápidas por fisuras (100 m/día ó más). En este caso los tiempos de tránsito no aumentan de manera considerable con el alejamiento de la captación y es imposible asimilar el acuífero a un medio equivalente continuo e isótropo.

La realización de un elevado número de ensayos de trazadores permitiría la determinación directa de la vulnerabilidad en el conjunto de la cuenca de alimentación, pero al no ser en la práctica viable esta opción se considera preferible emplear algún método de cartografía multicriterio de la vulnerabilidad como el analizado en este apartado.

El método "DISCO" se basa en una evaluación de la vulnerabilidad intrínseca. Evalúa las características geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas del medio natural, pero es independiente de la naturaleza del contaminante. Su evaluación cartográfica, basada en la evaluación del medio natural, permite definir zonas más o menos sensibles a los impactos antrópicos y optimizar la gestión y protección del agua subterránea.

Para evaluar la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación considera tres parámetros:

- El parámetro "**dis**continuidades" tiene en consideración el tránsito de agua en el interior del acuífero entre un punto de infiltración en la cuenca y la captación.
- El parámetro "**co**bertura de protección" considera el efecto de protección de las formaciones suprayacentes al acuífero.
- El parámetro "**es**correntía" engloba los fenómenos de flujo en la superficie previos a la infiltración.

La aplicación del método "DISCO" se desarrolla en cuatro etapas (Figura 76) estas son:

Fase 1: Evaluación de los parámetros “discontinuidades” y “cobertera de protección”

– Parámetro “**DISCONTINUIDADES**”

La cartografía de este parámetro sirve para poner en evidencia los contrastes de conductividad hidráulica en el interior del acuífero y determinar si los diferentes tipos de estructuras permeables están en conexión rápida con la captación, para ello se emplean especialmente los ensayos de trazadores.

Se elabora la cartografía a escala de la cuenca de alimentación en base a los datos existentes (mapas geológicos y geomorfológicos), observación del terreno (geología, geomorfología), estudio de las fotos aéreas y si es necesario efectuando perfiles geofísicos.

Las propiedades de los diferentes tipos de discontinuidades se pueden evaluar mediante su análisis en campo (extensión, abertura, frecuencia, orientación, colmatación, zonas de infiltración preferencial) y mediante ensayos de trazadores.

Se definen cuatro clases del parámetro “discontinuidades” cuyos criterios de evaluación se indican en la tabla 63. La clase D₀ corresponde al caso más vulnerable. Si se demuestra que una discontinuidad o zona de alta permeabilidad no tiene conexión con la captación se asimilará a una zona de permeabilidad moderada, D₂.

– Parámetro “**COBERTERA DE PROTECCIÓN**”

La cartografía de este parámetro tiene como finalidad evaluar la función protectora de los suelos y de las formaciones geológicas suprayacentes al acuífero.

Se definen tres clases de suelos (Tabla 64) en función de una estimación de su permeabilidad y de

Tabla 63: Evaluación del parámetro “discontinuidades”.

Clase	Valor	Criterios de evaluación
D ₀	0	Discontinuidades y conexiones muy rápidas con la captación (del orden de una decena de horas) / sin fenómenos de atenuación significativos.
D ₁	1	Discontinuidades y conexiones rápidas con la captación (del orden de algún día)/ fenómenos de atenuación limitados.
D ₂	2	Conexiones relativamente lentas con la captación (del orden de una decena de días) / fenómenos de atenuación eficaces: zonas de conductividad hidráulica moderada o discontinuidades sin conexiones rápidas con la captación.
D ₃	3	Conexiones lentas con la captación (varias decenas de días) / fenómenos de atenuación muy eficaces: zonas caracterizadas por conductividades hidráulicas reducidas

su espesor. Esta clasificación se ha efectuado mediante las observaciones realizadas en el terreno (ensayos de infiltración, estudio de suelos), datos reflejados en la bibliografía, (relación entre composición, permeabilidad y poder depurador del suelo). Como simplificación no son tenidos en consideración otros parámetros tales como la cobertera vegetal (campos, praderas, bosques) y el contenido en materia orgánica de los suelos (que tienen notable influencia en la degradación de los contaminantes orgánicos y bacteriológicos).

Cuando existen formaciones geológicas de baja permeabilidad intercaladas entre el suelo y el acuífero, el índice determinado para los suelos debe ser modificado para tener en cuenta el efecto protector adicional de estas capas. Los sondeos permiten determinar el espesor de la capa de suelo y evaluar sus características. La cartografía de suelos se hace en base a un número suficiente de sondeos distribuidos por la cuenca de alimentación. Posteriormente estos datos puntuales son regionalizados considerando entre otros aspectos el análisis

Tabla 64: Evaluación del parámetro “cobertera de protección”.

a) Suelos				
Espesor (m)	Suelo muy permeable (arenas, bloques)	Suelo con permeabilidad moderada (limos)	Suelo poco permeable (limos, arcillas)	
0 – 0,2	P ₀	P ₀	P ₀	
0,2 – 0,5	P ₀	P ₀	P ₁	
0,5 – 1,0	P ₀	P ₁	P ₂	
> 1,0	P ₁	P ₁	P ₃	
b) Presencia de formaciones geológicas de baja permeabilidad (arcillas, limos, margas)				
Espesor (m)	Combinado con suelo P ₀	Combinado con suelo P ₁	Combinado con suelo P ₂	Combinado con suelo P ₃
< 1m	P ₁	P ₂	P ₃	P ₃
1 – 2m	P ₂	P ₃	P ₃	P ₄
> 2m	P ₃	P ₃	P ₄	P ₄

geomorfológico (en el terreno y mediante fotografía aérea).

Para determinar el espesor y naturaleza de las formaciones de baja permeabilidad se emplean los estudios geológicos, geomorfológicos, la información obtenida en sondeos, los trabajos de ingeniería civil (excavaciones, catas) así como la testificación geofísica.

Algunos ensayos de infiltración (como el ensayo de infiltración con doble anillo de Müntz o el ensayo de infiltración de Porchet con nivel variable) pueden permitir verificar de manera puntual la permeabilidad de la cobertera de protección.

Fase 2: Cálculo del factor de protección intermedio, F_{int}

El factor de protección intermedio (Tabla 65) permite determinar en cada punto de la cuenca de alimentación la facilidad con la que un contaminante se infiltrará en el suelo hacia la captación. Un factor de protección muy débil corresponderá a una vulnerabilidad muy elevada. Esto implica que un contaminante que se infiltre en un punto con un factor de protección muy débil llegará rápidamente a la captación, sin que los fenómenos de atenuación (filtración, auto-depuración, dilución) sean eficaces.

El cálculo del factor de protección intermedio F_{int} se efectúa de la siguiente manera:

$$F_{int} = (2 \cdot D) + (1 \cdot P)$$

en donde D es el valor del parámetro discontinuidades y P el valor del parámetro cobertera de protección.

Se considera que el parámetro D es más importante que el factor P . Las rocas permeables pueden presentar zonas de infiltración preferencial, como es el caso de las dolinas. La existencia de vías preferenciales en los suelos, ligadas a la presencia de madrigueras, raíces o frentes de desecación, producen también posibilidades de circulación rápida hacia el acuífero.

Fase 3: Determinación del factor de protección final, F

– Parámetro “ESCORRENTÍA”

La escorrentía de superficie (Tabla 66) 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). Es por tanto

Tabla 65: Valores del factor de protección intermedio ($F_{int} = 2 \cdot D + 1 \cdot P$).

	P_0	P_1	P_2	P_3	P_4
D_0	0	1	2	3	4
D_1	2	3	4	5	6
D_2	4	5	6	7	8
D_3	6	7	8	9	10
Valor	$F_{int} = 0, 1$		$F_{int} = 2, 3, 4$		$F_{int} = 5, 6, 7$
Protección	Muy baja		Baja		Media
Vulnerabilidad	Particularmente fuerte		Fuerte		Baja

Tabla 66: Determinación de la extensión de las superficies a considerar al contemplar el parámetro “escorrentía”.

a) Escorrentía difusa a lo largo de las pendientes :	
Cuenca vertiente local relativamente uniforme sin canales o sistemas de drenaje	
Pendiente:	Extensión de la cuenca vertiente a considerar:
2 – 10 %	10 m aguas arriba o en torno a la superficie vulnerable considerada
10 – 25 %	20 m aguas arriba de la superficie vulnerable considerada
> 25 %	30 m aguas arriba de la superficie vulnerable considerada
- En presencia de thalwegs, canales, caminos o drenes colectores de aguas de escorrentía, la extensión de la cuenca vertiente local a considerar debe contemplar éstos. - La extensión de las superficies a considerar debe ser fijada en base a las observaciones realizadas en campo esencialmente en los terrenos de pasto. De manera general la escorrentía es netamente inferior en las zonas de bosque por la existencia de un suelo más aireado de espesor reducido. En este caso se puede admitir la toma en consideración de cuencas de alimentación locales de extensión muy pequeña	
b) Cursos de agua permanentes o temporales con infiltración:	
Extensión a atribuir a una cuenca vertiente local	Lechos y riberas del curso de agua, cuenca vertiente local según los criterios especificados para la escorrentía

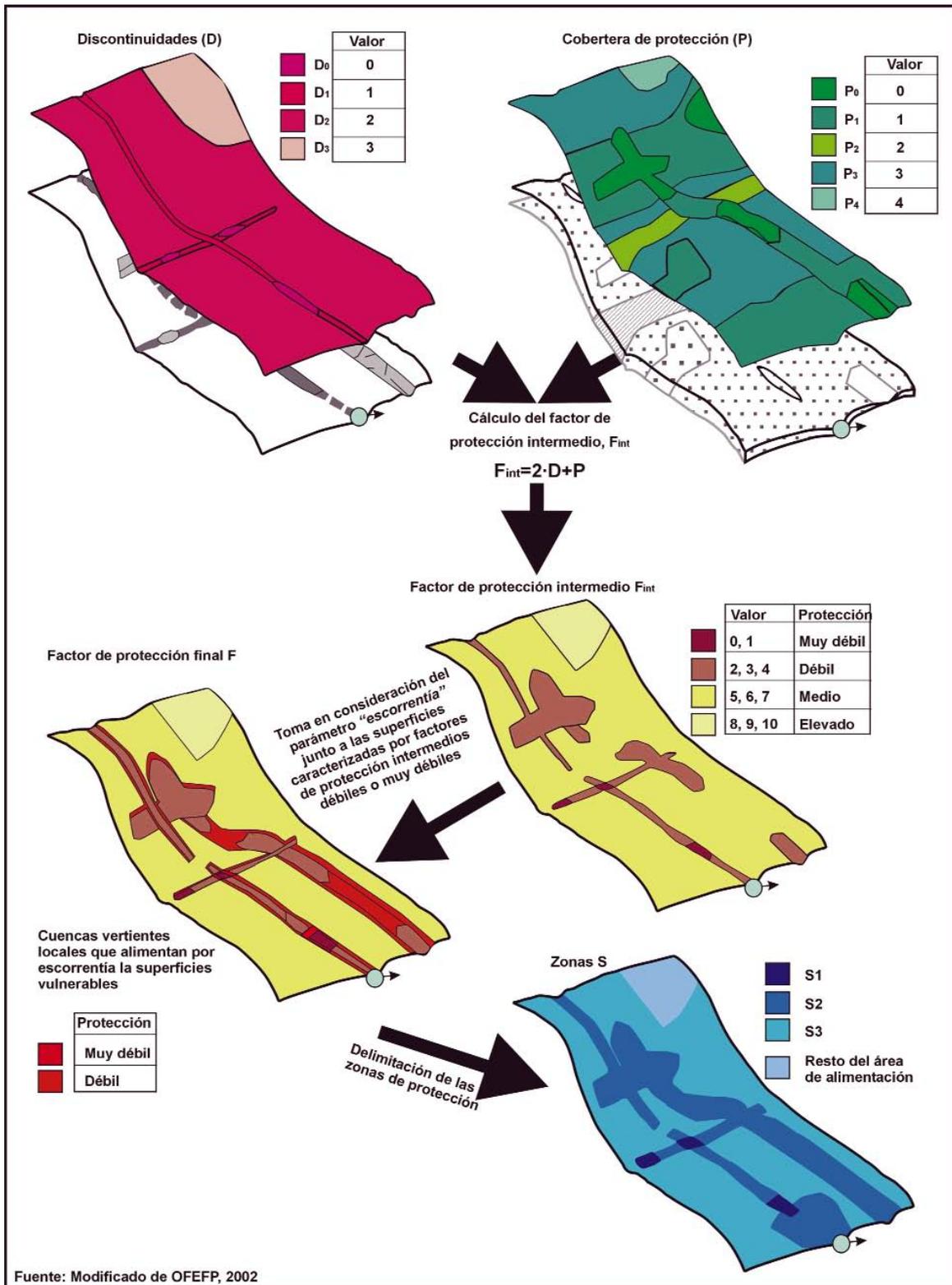


Figura 76: Delimitación de zonas de protección mediante el método de cartografía multicriterio DISCO.

imprescindible evaluar estos fenómenos al realizar una cartografía multicriterio.

Al contrario que con los otros parámetros cartografiados en el conjunto de la cuenca de alimentación, la escorrentía sólo se considera en las zonas en las que los parámetros “discontinuidades” y “cobertura de protección” combinados ofrecen un factor de protección intermedio que es bajo o muy bajo y en presencia de una escorrentía significativa. La cartografía de este factor permite la delimitación de las cuencas que alimentan las superficies más vulnerables.

Su aplicación implica que en las cuencas vertientes locales vulnerables se amplía el valor del factor de protección intermedio a estas superficies. Este nuevo valor, llamado F, reemplaza al valor del factor de protección intermedio anteriormente obtenido. Fuera de estas cuencas vertientes el valor de F será el mismo que el calculado de F_{int} .

Los tres factores que determinan la importancia de la escorrentía son la pendiente, la permeabilidad del suelo y las condiciones previas de humedad. Como medida de simplificación para la cartografía de este parámetro sólo se tienen en cuenta la pendiente y la red de drenaje superficial. Para cartografiar la escorrentía sobre las zonas con un factor de protección natural bajo o muy bajo, se utilizan mapas topográficos a gran escala (1:10.000 ó 1:5.000) y fotografías aéreas, complementándose con un reconocimiento detallado del terreno, sobre todo en periodos de precipitaciones fuertes.

Fase 4: Delimitación de las zonas de protección

Antes de delimitar las zonas de protección es necesario verificar si son fiables los datos del terreno utilizados para la cartografía en el conjunto de la cuenca de alimentación. En caso de incertidumbre contemplar la obtención de datos complementarios y si se ha realizado la cartografía con márgenes de seguridad. Además hay que analizar los resultados obtenidos para el factor de protección para evaluar su coherencia con el funcionamiento hidrodinámico del lugar, con el modelo conceptual “DISCO” y con la respuesta global del sistema.

La delimitación de las zonas de protección se realiza sobre la base de una relación de equivalencia entre el valor del factor F y las zonas S (Tabla 67).

La relación de equivalencia entre los factores de protección y las zonas S se ha definido sobre la base de su aplicación en estudios efectuados en diferentes zonas realizados en Suiza. En éstos los ensayos de trazadores e infiltración así como las investigaciones geofísicas permitieron verificar la idoneidad del método de determinación de los factores de protección y de delimitación de las zonas S.

Los valores definidos en la tabla 67 son aplicables de manera general a las condiciones de los medios fisurados fuertemente heterogéneos de Suiza, debiéndose evaluar para su empleo en otras regiones si resultan adecuadas a sus características geológicas e hidrogeológicas específicas. En el caso de una cuenca de alimentación grande (mayor de 1 km²) y cuando estos mapas son complejos es muy recomendable la utilización de un Sistema de Información Geográfico. En cuencas de alimentación de tamaño menor de 1 km² o en que los mapas no son tan complejos puede ser suficiente la utilización de un programa de diseño por ordenador (ej: corel draw, adobe illustrator), o incluso un tratamiento manual de los datos.

8.2. Metodología para la delimitación de perímetros de protección en medios fracturados basada en la definición de contornos de probabilidad para determinar el riesgo de impacto al medio ambiente

La delimitación de perímetros de protección empleando modelos numéricos para medios con porosidad intergranular para determinar el área de alimentación y tiempos de tránsito de partículas hasta la captación, simulando la componente advectiva de su transporte, no es adecuada para acuíferos fracturados. En estos medios no es posible efectuar las simplificaciones asumibles en acuíferos con porosidad intergranular y debido a la extrema heterogeneidad de los sistemas de fracturas cada una de éstas o de

Tabla 67: Relación de equivalencia entre el factor final (F) y las zonas de protección de las aguas subterráneas (S).

Factor de protección F	Vulnerabilidad	Zonas S
F muy bajo (0, 1)	Particularmente alta	S1
F bajo (2, 3, 4)	Alta	S2
F medio (5, 6, 7)	Media	S3
F alto (8, 9, 10)	Débil	Resto de la cuenca de alimentación

los parámetros característicos del acuífero puede tomar un amplio rango de valores. Esta variabilidad de los parámetros ha sido considerada en numerosos estudios empleando un análisis de incertidumbre determinístico. Éste contempla variar los parámetros del acuífero según sus valores para definir diferentes zonas: zona de predicción de mejor estimación (los cálculos o el modelo se realizan usando el valor más probable para cada parámetro), zona de predicción del peor caso (se emplea el mismo modelo utilizado para la mejor estimación pero empleando como valores los más conservativos posibles, de las medidas de campo reales existentes), por último la diferencia entre la mejor estimación y el peor caso indica la magnitud de la incertidumbre asociada.

La zona de incertidumbre obtenida mediante el procedimiento determinístico no tiene ningún nivel de confianza ligada a ella, por lo que en los acuíferos fracturados parece más adecuado efectuar un tratamiento riguroso de las incertidumbres asociadas a sus características aplicando una metodología específica para obtener zonas de protección basadas en probabilidad (Environment Agency, 2001 a y 2001 b). Para ilustrar ésta se sintetizará en este apartado una metodología propuesta y aplicada en diferentes acuíferos fracturados en el Reino Unido (Robinson y Barker, 2000; Robinson y Barker, 2001). En dicha metodología se emplean modelos estocásticos como herramienta para delimitar zonas de protección basadas en análisis de riesgo al medio ambiente, contemplando la incertidumbre en los parámetros simulados, lo que supone ventajas respecto al análisis de incertidumbre determinística.

Hay que resaltar en primer lugar que cualquier metodología fiable para determinar zonas de protección en medios fracturados se basa en tener datos apropiados (en calidad y cantidad) para aplicar el método de modelización seleccionado.

Para elaborar modelos de fracturación estocásticos se requiere como mínimo conocer de cada conjunto de fracturas la distribución de los siguientes parámetros:

- Densidad o espaciado.
- Orientación.
- Longitud.
- Apertura.

Los datos que existen normalmente en el entorno de las captaciones de abastecimiento comprenden: ensayos de bombeo (obteniéndose así datos de transmisividad, coeficiente de almacenamiento y cono de depresión), cartografía geológica, columna litológica y logs geofísicos en las captaciones. En algunas ocasiones se dispone además de testifica-

ción geofísica de zonas más amplias, ensayos de bombeo en secciones aisladas mediante obturadores y ensayos de trazadores. Es decir en muchos casos no se dispone de todos los parámetros y distribuciones requeridas para realizar un modelo estocástico.

Para suplir esa carencia se puede recurrir al análisis de fracturas aflorantes (que requiere poco tiempo y proporciona información sobre densidad, orientación y longitud de las fracturas), extrapolar datos entre diferentes regiones del mismo estilo estructural o inferirlos a partir de relaciones teóricas.

Las relaciones teóricas más empleadas son:

- Densidad de fracturas o espaciado:
 - En muchas rocas sedimentarias hay una relación lineal entre espesor de la capa (obtenida entre otros sistemas de la columna litológica y logs geofísicos) y el espaciado entre fracturas (Ladeira y Price, 1981).
 - Correlación entre densidad de fracturas y longitud de fractura (Robinson, 1984; Charlaix *et al.*, 1984).
 - Correlación entre espaciado de fracturas y características de la masa de roca contemplada en estudios geotécnicos (Priest y Hudson, 1976).
- Orientación:

La orientación de las fracturas depende del régimen de esfuerzos en su época de formación. En zonas donde la historia tectónica y orogénica es conocida se dispone de las direcciones de los esfuerzos en las diferentes épocas.
- Longitud de fracturas:
 - Correlación entre densidad de fracturas y longitud de fracturas, como se indicó anteriormente.
 - Correlación entre longitud de fracturas y apertura de las mismas (Hatton *et al.*, 1994).
- Apertura:

Correlación entre la longitud de fractura y su apertura.

Los estudios realizados referentes a estos parámetros indican (Robinson y Barker, 2001) que siguen una distribución estadística. Así la longitud, apertura y densidad siguen una distribución log normal y la orientación tiende a seguir una distribución elíptica.

Cabe concluir, por tanto, que empleando los sistemas anteriormente indicados es posible obtener los datos requeridos para aplicar un modelo de fractu-

ración estocástico, pero, por desgracia, el dominio que puede ser modelado usando éste, incluso en ordenadores personales potentes, es solamente válido para la zona de protección más próxima a la captación y no para las demás zonas, siendo imprescindible desarrollar métodos que incorporen el modelo de fracturas en otro que permita simular todo el ámbito del perímetro.

Hasta que ese modelo esté disponible hay que simular la heterogeneidad de los sistemas de flujo por fracturas pero dentro de la estructura de un modelo de porosidad intergranular tridimensional para poder aplicar la modelización estocástica a todo el perímetro de protección. Esto puede lograrse (Robinson y Barker, 2001) combinando un modelo de flujo tridimensional a través de fracturas, como el FRACMAN (Dershowitz *et al.*, 1998), y un modelo por porosidad intergranular, como el MODFLOW.

La metodología propuesta (Robinson y Barker, 2001) consta de cuatro etapas, ilustrándose con la aplicación por dichos autores a un acuífero en areniscas en Gloucester (Reino Unido):

Etapa 1. Obtención de los datos referentes a los parámetros característicos de las fracturas y su distribución:

Se emplean los estudios y procedimientos anteriormente detallados para obtener la información requerida.

Así, en el estudio indicado (que corresponde a un acuífero en areniscas con flujo a través de fracturas únicamente en los primeros 30 a 50 m, con flujo por porosidad intergranular despreciable), se efectuaron específicamente tres sondeos de monitorización con levantamiento de columna geológica, ensayos de testificación hidráulica en secciones aisladas por obturadores, logs geofísicos y ensayos de trazadores simultáneos a ensayos de bombeo, junto a la información ya existente, para definir su modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico.

Etapa 2. Modelización del flujo por fracturas:

En primer lugar se introduce y calibra la información referente al sistema de fracturas, para obtener una concordancia entre las características de la red de fracturas definida y los parámetros medidos de las mismas. Para ello puede emplearse el modelo FRACMAN (Dershowitz *et al.*, 1998) u otro similar. Los parámetros usados en la calibración en el ejemplo indicado fueron: la densidad de fracturas en el sondeo, y en la zona, apertura de fracturas, número de fracturas intersecta-

do en los sondeos, almacenamiento del conjunto del sistema, así como la transmisividad en los sondeos.

Con estos parámetros se efectúa una modelización del flujo para obtener la calibración empleando los datos de los ensayos de bombeo. Se muestra como ejemplo en la tabla 68 los parámetros considerados finalmente en el estudio indicado, que serían los empleados en las siguientes modelizaciones a realizar con el método propuesto.

Estos parámetros se emplean para obtener múltiples modelizaciones de este sistema de fracturas ya calibrado. Se aplica un gradiente hidráulico a través de cada uno de los bloques considerados en diferentes direcciones, calculándose el flujo de entrada y salida de cada bloque. Esto permite obtener una conductividad hidráulica efectiva del bloque usando la ley de Darcy para cada una de las diferentes direcciones consideradas. El proceso se repite hasta que la distribución de conductividades hidráulicas en cada dirección se estabilice.

Se varía entonces el tamaño del bloque de fracturas usado en la simulación, para asegurar que el tamaño empleado de éste puede considerarse un volumen elemental representativo (VER) de la roca, en el cual los valores de los tensores de conductividad hidráulica y porosidad se estabilizan.

Etapa 3. Simulación de flujo y de trayectorias de partículas:

Las distribuciones de los valores direccionales de conductividad hidráulica y porosidad se introducen en un modelo de flujo para medios con porosidad intergranular, como MODFLOW, con celdas del mismo tamaño o superior que la correspondiente al volumen elemental representativo, que se ha determinado en la etapa 2, introduciéndose los límites y condiciones de contorno (recarga, ríos y drenes entre otros). Se calibra entonces el modelo empleando parámetros no utilizados en las calibraciones de etapas previas, como por ejemplo la recarga.

Por último una vez concluida la calibración se simula la trayectoria de las partículas para múltiples realizaciones del modelo.

Etapa 4. Contornos de probabilidad de la trayectoria de las partículas:

Se analiza la trayectoria de las partículas definiéndose contornos de probabilidad para los diferentes tiempos de tránsito considerados al

Tabla 68: Parámetros resultantes tras la calibración efectuada en el estudio incluido como ejemplo (en Alton Court, Reino Unido) de los sistemas de fracturas considerados.

Parámetro	Número del conjunto de fracturas		
	Conjunto 1	Conjunto 2	Conjunto 3
Dirección (grados)	144,0	320,0	31,5
Buzamiento (grados)	24,6	67,5	8,3
Distribución	Fisher	Fisher	Fisher
Coef. de distribución-dispersión*	10	10	10
Tamaño (m)	10	10	10
Distribución de tamaño	Log normal	Log normal	Log normal
Desviación estándar	5	5	5
Dirección de alargamiento (grados)	0	0	0
Proporción de aspecto	1	1	1
% de finalización	0	0	0
Intensidad (m⁻¹)	0,505	0,376	0,157
Distribución de intensidad	Gamma	Gamma	Gamma
Coeficiente de distribución*	0.05	0,01	0,001
Correlación de transmisividad (T)*	Con tamaño	Con tamaño	Con tamaño
Exponente de correlación de T*	0,3	0,3	0,3
Factor de correlación de T*	$2,57 \cdot 10^{-6}$	$2,57 \cdot 10^{-6}$	$2,57 \cdot 10^{-6}$
Factor de desviación de T*	1	1	1
Correlación de almacenamiento (S)*	Con tamaño	Con tamaño	Con tamaño
Exponente de correlación de S*	0,3	0,3	0,3
Factor de correlación de S*	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$
Factor de desviación de S*	1	1	1
Correlación de espesor de fracturas*	No correlacionado	No correlacionado	No correlacionado
Espesor de fracturas (m)	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}

* Parámetros como se definen para el modelo FRACMAN (Dershowitz *et al.*, 1998)

Fuente : Modificado de Robinson y Barker, 2001

definir las zonas en que se subdividen los perímetros de protección.

En el estudio incluido como ejemplo se desarrolló un código para obtener los contornos de probabilidad empleados (50 días, 400 días y el total del área de alimentación).

Para crear los contornos de probabilidad en todo el dominio del modelo se emplea un modelo estocástico, capaz de efectuar simulación de trayectorias de partículas aguas arriba para múltiples escenarios y múltiples realizaciones de cada escenario, sobreimponiéndose una malla horizontal bidimensional en el área definida para dichas trayectorias.

Para los contornos de tiempo de tránsito considerados, 50 días y 400 días, se contabilizan las veces que cada partícula pasa a través de cada celda de la malla.

Muchas partículas pasarán a través de la mayoría de las celdas de la malla al ser múltiples escena-

rios y múltiples realizaciones de cada uno de ellos, definiéndose así una distribución de tiempos de tránsito para cada elemento. El análisis de su distribución permite definir la probabilidad de partículas que requieren un tiempo de tránsito para alcanzar la captación.

La aplicación de esta técnica al estudio empleado se indica en la figura 77.

Al calcular los contornos de probabilidad del área de alimentación de la captación la probabilidad de que una celda de la malla esté dentro de la misma se calcula como la proporción de realizaciones para las cuales ninguna partícula ha entrado. Las probabilidades se calculan de la misma forma que en la correspondiente a los tiempos de tránsito elegidos, por lo tanto las mayores probabilidades suceden a mayores distancias de la captación.

El contorno de probabilidad del 10 % estará más cerca a la captación de bombeo que el del 90 %. Por lo tanto cuanto mayor es la probabilidad

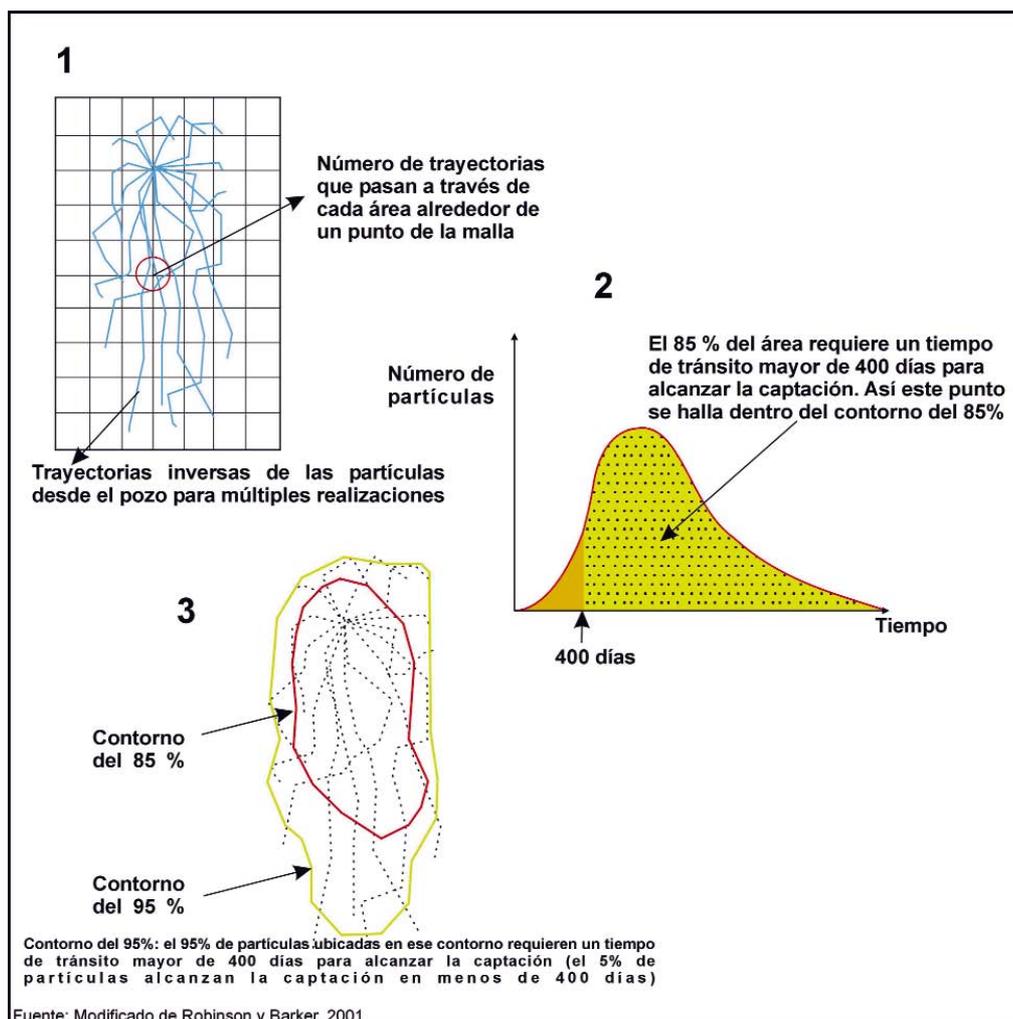


Figura 77: Técnica de desarrollo de los contornos de probabilidad para las zonas de protección de 400 días.

mayor es la confianza en que la zona de protección de la captación esté dentro del área delimitada.

Para proteger la captación en un alto grado deberían emplearse idealmente contornos de probabilidad elevados (por ejemplo 90-95 %) que abarcarán el área más grande alrededor de la captación. Sin embargo esto llevaría a definir zonas muy grandes, probablemente inasumibles respecto a las restricciones a la actividad del suelo que implica la aplicación de esta metodología al delimitar perímetros de protección.

Una alternativa podría ser la aplicación de diferentes probabilidades a las diferentes actividades según su riesgo potencial de contaminación del agua subterránea.

Las diferentes zonas empleadas (50 días, 400 días y el total del área de alimentación en el estudio indicado) deben representarse en mapas separados para evitar confusiones, puesto que es probable que por

ejemplo los contornos de baja probabilidad de la zona de 400 días se superpongan con los contornos de alta probabilidad de 50 días.

Cabe indicar, por último, como ya indican los autores proponentes de esta metodología (Robinson y Barker, 2001), que las zonas de protección delimitadas en acuíferos fracturados aplicando esta metodología se prevé que serán más grandes que las obtenidas mediante una aproximación a medios con porosidad intergranular, pero en cambio tendrían la ventaja de ser más defendibles ya que consideran las características del medio fracturado.

8.3. Método de Bolsenkötter

Se trata de una modificación del método de Rehse (Apartado 6.3.10) para el cálculo del poder depurador de los materiales, aplicable a los materiales fisurados.

El método de Rehse es aplicable a sistemas isótropos, en los cuales la circulación del agua se produce

a través de un medio con porosidad intergranular. Bolsenkötter ha completado el método de Rehse proponiendo otro similar para los medios fisurados.

El poder depurador de las rocas en medios fisurados es menor que en los medios con porosidad intergra-

nular y por ello aumenta las distancias necesarias para conseguir una depuración total. En este caso Bolsenkötter ha calculado unos nuevos índices que aparecen reflejados en la tabla 69, para ser utilizados con la misma metodología explicada en el apartado 6.3.10 para medios con porosidad intergranular.

Tabla 69: Poder depurador de las rocas (Bolsenkötter).

M	Descripción del material	H(m)	$I_a = 0,5/h$
1	Margas	10	0,05
2	Areniscas con capas arcillosas. Arcillas, micaesquistos y filitas	20	0,025
3	Basaltos y rocas volcánicas	30	0,017
4	Grauvacas, arcosas, areniscas arcillosas, limosas	50	0,01
5	Granito, granodiorita, diorita, sienita	70	0,007
6	Cuarcitas, areniscas con sílex	100	0,005
7	Calizas	200	0,0025

9. PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO URBANO EN ACUÍFEROS CONFINADOS. MÉTODOS Y CONSIDERACIONES ESPECÍFICAS

El análisis del marco legal y la estrategia de protección para las captaciones de abastecimiento empleado en otros países, desarrollado en el capítulo 2, indica que, al igual que sucede en la legislación hídrica española (analizada en el capítulo 3), en la mayoría de ellos (Alemania, Francia, Bélgica, Holanda, Italia, Dinamarca, Suiza, Canadá y Australia) no se contempla una zonación ni consideraciones específicas para la delimitación de perímetros de protección en acuíferos confinados.

El tratamiento específico para este tipo de acuíferos sólo está regulado en la legislación de Irlanda, Portugal y el Reino Unido.

En Irlanda se considera únicamente en las matrices de restricciones a cada actividad (como es el caso de la limitación de vertederos, al contemplar en algunas zonas "generalmente no aceptable a menos que se demuestre que el agua subterránea en el acuífero es confinada...").

En Portugal las dimensiones de las tres zonas en que se subdividen los perímetros de protección dependen de las características del acuífero, contemplando expresamente los "acuíferos confinados porosos" y los "semiconfinados porosos". En éstos la extensión de las zonas es menor a la indicada para acuíferos libres en diferentes materiales (medios con porosidad intergranular, kársticos o fisurados).

En el Reino Unido al delimitar perímetros de protección en acuíferos confinados se considera una única zona, la zona III, que es el área necesaria para soportar el volumen de bombeo a largo plazo en base a la recarga por infiltración de la lluvia.

Este área, cuyas dimensiones dependen del volumen bombeado y de la infiltración eficaz, en los acuíferos confinados estará lógicamente a cierta distancia de

la captación, en la zona donde se produzca la recarga por infiltración de la lluvia (cuadro 3). Se le aplican las mismas restricciones que a esta zona III para los demás tipos de acuíferos.

Las otras dos zonas, de protección interior, I, y de protección exterior, II, contempladas en ese país para los demás acuíferos no se delimitan en los acuíferos confinados siempre y cuando exista una capa confinante continua, de suficiente espesor, muy baja conductividad hidráulica y no exista ningún riesgo de "cortocircuitarla", por ejemplo mediante fracturas.

Por último hay que resaltar que en Estados Unidos, si bien no está reglamentado el establecimiento de zonas específicas para perímetros de protección en acuíferos confinados, han desarrollado una metodología específica para los mismos. Ésta contempla las particularidades de su protección (USEPA, 1991 b) motivada por la gran relevancia que tiene en ese país la explotación de aguas subterráneas para abastecimiento a la población (supone el 37 % del total) alcanzando una importancia notable las captaciones en acuíferos confinados. En los siguientes apartados se analizan las principales características y consideraciones de dicha metodología.

9.1. Consideraciones acerca de los acuíferos confinados

Se considera, dentro del contexto de la delimitación de los perímetros de protección, como un acuífero confinado aquella *sección de un acuífero que se encuentra cubierta por estratos de baja permeabilidad que atenúan la posibilidad de contaminación cuyo origen es un foco superficial* (USEPA, 1991 b).

Esta definición se centra en la contaminación, a diferencia de la definición clásica que se refiere al contexto hidrogeológico que causa el confinamiento en vez del fenómeno resultante del confinamiento.

No todos los acuíferos que presentan confinamiento lo hacen de forma similar, por lo que se puede hablar de grados de confinamiento, desde semiconfinado hasta altamente confinado. Los indicadores geoquí-

micos de la edad y los cálculos del movimiento descendente del agua pueden indicar el grado de confinamiento.

Para la delimitación de los perímetros de protección hay que tener en cuenta la sensibilidad a la contaminación; diferencias en el funcionamiento hidráulico del sistema: tasa de recarga, almacenamiento específico, filtraciones verticales desde las capas confinantes y extensión del cono de descensos por la ausencia de éstas; diferencias en la distribución vertical de la recarga: en los semiconfinados se puede asumir una distribución areal además de por vías preferentes y en los confinados a través de un escaso número de vías preferentes.

Aunque los acuíferos confinados son menos vulnerables que los acuíferos libres y por lo tanto la posibilidad de que una contaminación les afecte es menor, ésta se puede producir (los acuíferos semiconfinados pueden sufrir filtraciones areales y en el caso de altamente confinados éstas pueden ser a través de fracturas, perforaciones artificiales o por efecto del cono de bombeo), por lo que los perímetros de protección son siempre necesarios.

Los objetivos de éstos comprenden:

- El establecimiento de un tiempo de reacción ante una eventual contaminación.
- La disminución de los contaminantes hasta niveles aceptables en un área definida antes de llegar a la captación, mediante su atenuación y adsorción en los estratos confinantes, aunque si la migración es a través de vías preferentes la dilución y dispersión son menores.

9.2. Características de un acuífero confinado

Existen ciertas características que definen la existencia de un acuífero confinado así como el grado de confinamiento de éste, clave para la delimitación de los perímetros de protección. Éstas incluyen:

9.2.1. Geología

Las capas confinantes son formaciones de baja conductividad hidráulica de naturaleza muy variable (pizarras, arcillas, limos, yesos y margas, coladas volcánicas entre otros). No existe un rango de conductividad hidráulica para el estrato confinante, normalmente se considera alrededor de tres órdenes de magnitud por debajo de la que presenta el acuífero.

En ellas, las fracturas se pueden presentar de manera areal o discreta, su densidad y distribución tendrá

gran influencia en el grado de confinamiento del acuífero.

La litología de los acuíferos confinados puede ser muy variada y presentar conductividades hidráulicas muy heterogéneas. La geología (mineralogía, grado de litificación, tipo de porosidad,...) puede dar las características hidrológicas e hidroquímicas asociadas a los acuíferos confinados (bajo almacenamiento y química asociada a un largo tiempo de residencia).

9.2.2. Características hidrológicas

El análisis de la piezometría de un acuífero confinado junto a la del acuífero superior libre indicará el sentido del flujo vertical y si las sustancias potencialmente contaminantes pueden llegar al acuífero confinado. Si la piezometría del acuífero confinado es mayor que la del libre el flujo es ascendente, lo que impediría a los contaminantes llegar al acuífero. En el caso contrario sí se puede producir su contaminación. Éste caso puede ser debido a la existencia de un cono de descensos por bombeo alrededor de un pozo.

El caudal de flujo vertical viene definido por la Ley de Darcy:

$$q_v = \frac{K' \cdot (h_0 - h)}{b'}$$

siendo:

q_v = caudal de flujo vertical por unidad de área

K' = conductividad hidráulica vertical

h_0 = nivel piezométrico del acuífero confinado

h = nivel piezométrico del acuífero libre

b' = espesor del acuitardo

Este caudal de flujo vertical, q_v , se puede usar para diferenciar los acuíferos confinados de los semiconfinados. De manera general si K' es mayor de $5 \cdot 10^{-7}$ cm/s la filtración que se producirá será significativa. También el coeficiente de almacenamiento se puede utilizar para diferenciar acuíferos confinados. En éstos el coeficiente de almacenamiento puede considerarse que varía entre $5 \cdot 10^{-3}$ y $5 \cdot 10^{-5}$.

En acuíferos confinados el gradiente hidráulico, suele ser muy bajo, la velocidad de flujo también es muy baja y el agua puede ser relativamente antigua.

Los niveles en acuíferos confinados muestran pequeños cambios cíclicos (1 ó 2 veces al día) debido a *sobrecargas de presión* (mareas oceánicas), *dilatación del acuífero* (mareas terrestres) y *cambios de presión atmosférica* (en el sondeo).

En un acuífero confinado, que sólo se encuentran en contacto con la atmósfera mediante los sondeos, al aumentar la presión atmosférica baja el nivel piezométrico y al disminuir la presión éste aumenta. En los acuíferos libres estos cambios no se producen, por lo que se pueden utilizar para determinar si el acuífero es o no confinado.

El origen del agua en los acuíferos confinados puede ser una aportación lateral, recarga vertical a través del acuitardo, o del almacenamiento del propio acuífero. El cono de descensos con bajo gradiente hidráulico define el área en que existe un flujo vertical y horizontal.

El bombeo en acuíferos altamente confinados sigue una curva de Theis asintótica. En ellos únicamente entra agua lateral del acuífero y el cono de descenso debería de extenderse con el tiempo de bombeo. En acuíferos semiconfinados el cono termina en el momento en que las filtraciones descendentes igualan las descargas a través del pozo. Esta filtración se puede calcular con las curvas de ensayos de bombeo.

Las características hidroquímicas en el acuífero confinado reflejan generalmente la litología del acuífero y el tiempo de residencia. Si el acuífero tiene una extensión elevada, el tiempo de residencia y el recorrido en su interior pueden ser también altos, lo que se distingue en la signatura isotópica así como en la química del agua:

- La zona de recarga es oxidante, tiene valores bajos de pH y de NO_3^- , $\text{SO}_4^{=}$ y Ca^{2+} elevados.
- Según fluye se hace más reductor, los valores de pH, TSD, Na^+ y HCO_3^- se incrementan y los valores de NO_3^- , $\text{SO}_4^{=}$ y Ca^{2+} disminuyen.

9.3. Determinación de la existencia y grado de confinamiento de un acuífero

Para la delimitación de las áreas de protección a establecer en una captación en un acuífero confinado es imprescindible conocer el grado de confinamiento a que está sometido el acuífero a fin de establecer la metodología a seguir.

Se pueden emplear diferentes estudios para determinar si existe confinamiento siendo más difícil evaluar el grado de éste. Son los siguientes:

9.3.1. Aproximación geológica

Descripción de las capas confinantes, sus características físicas, espesor y extensión así como las posibles

vías preferentes de migración de los contaminantes mediante:

- Mapas geológicos clásicos: análisis de litología y estructura.

Se realizan mediante estudios de campo en afloramientos, análisis de mapas geológicos y de suelos existentes y columnas de sondeos.

Mapas geológicos en profundidad: a partir de registros geofísicos o columnas de sondeos. La integración con la geología de superficie da una visión tridimensional, se pueden realizar cortes geológicos y bloques diagrama con capas de baja permeabilidad y su espesor y las discontinuidades estructurales y litológicas.

- Mapas hidrogeológicos:

Consideran específicamente los acuíferos confinados, la existencia y tipo de fallas y fracturas, presencia o ausencia de confinamiento, el grado de éste, integrando la geología con la hidrología e hidroquímica.

9.3.2. Aproximación hidrogeológica

Existen diferentes técnicas hidrogeológicas para discriminar acuíferos confinados y evaluar la filtración desde el confinante.

Para la definición del confinamiento:

- Nivel de agua en la captación:

Cuando el nivel piezométrico del acuífero confinado está por encima del nivel freático del acuífero libre suprayacente, el primero no puede contaminarse puesto que el flujo a través de la formación confinante es ascendente. Por el contrario cuando por efecto de los bombeos el nivel piezométrico esté más bajo, sí que existe un flujo descendente que puede transportar contaminantes hasta el acuífero confinado. En este caso en las cercanías de la captación el cono de bombeo puede provocar que el acuífero se comporte como libre aunque estratigráficamente sea confinado.

- Análisis del mapas de isopiezas:

Similar al anterior, con la ventaja de que interrelaciona el nivel con otros niveles del área.

- Ensayos de bombeo para determinar el coeficiente de almacenamiento:

Éste suele ser superior a 10^{-2} en los acuíferos libres y menor de esa cantidad en los confinados. Se debe a la compresión de la matriz y la reducción del espacio de los poros. El coeficiente de almace-

namiento se calcula con los cambios de nivel piezométrico originados por bombeos a caudal constante usando la fórmula de Theis para régimen transitorio o fórmulas modificadas de ésta.

– Respuestas continuas de los niveles de agua:

Es un método simple y barato. Mediante las variaciones de presión se producen cambios en los niveles (diarios y de mayor amplitud temporal). Para medir los cambios producidos por mareas (terrestres y oceánicas) se necesitan instrumentos muy sensibles (cm) y medidas al menos cada dos horas durante 1 día, requiriéndose mayor tiempo para medir la recarga.

La recarga se manifiesta diferida respecto a las características de los acuíferos libres, si bien la variación de nivel puede ser mayor y más inmediata cuando existan vías de comunicación específicas con el acuífero.

Para la evaluación de la cantidad de filtración:

– Ensayos de bombeo para determinar la filtración vertical:

Se pueden utilizar ecuaciones para calcular el caudal que se filtra. La existencia de filtraciones significativas se pueden determinar mediante una curva de aumento de los descensos/tiempo. Éstas pueden deberse a la existencia de discontinuidades en el confinante (naturales o de origen antrópico).

Los ensayos pueden ser de larga duración en el caso de que el cambio en los descensos sea muy pequeño, siendo imprescindibles los piezómetros para evitar los errores de medida en el sondeo por las pérdidas de carga.

La filtración generalmente varía entre 0,035 L/m²/día (en acuíferos libres) y 3,5·10⁻⁹ L/m²/día (en acuíferos confinados).

La filtración no es necesariamente desde un acuífero superior por encima del acuitardo, sino que puede corresponder al propio almacenamiento del acuitardo.

– Medidas en los estratos confinantes:

Los cambios en el nivel del acuitardo durante el bombeo del acuífero indican comunicación con el acuífero. Los cambios diarios en los estratos superiores se correlacionan con el confinamiento y los cambios de nivel estacional debidos a la precipitación sugieren la existencia de filtraciones. La medida de las filtraciones es, generalmente, complica-

da debida a la dificultad de localizar las vías por donde se producen. Los sondeos de monitorización se utilizan para comprobar la naturaleza del estrato confinante y la migración de los contaminantes.

– Modelización numérica: Son métodos sofisticados que indican la existencia de confinamiento y su grado. Las filtraciones se determinan mediante la modificación de parámetros y el ajuste a las medidas de la superficie piezométrica y mediante éstas se puede estimar el grado de confinamiento.

Son muy eficaces para definir el confinamiento (aunque su coste pueda resultar excesivo si se usan sólo con esta finalidad).

9.3.3. Aproximación hidroquímica

9.3.3.1. Análisis de la composición química del agua

La sensibilidad del acuífero a la contaminación se puede estimar mediante:

– Química general del agua, que varía dentro de las zonas del acuífero y el tiempo de residencia. Así en la zona de recarga se tiene altos valores de eH y relación Ca²⁺/Na⁺, algo de NO₃⁻ y SO₄⁼ y bajos pH, total de sólidos disueltos (TSD), HCO₃⁻ y Cl⁻ y a medida que se aumenta el tiempo de circulación del agua en el acuífero aumentan pH, TSD, Na⁺, HCO₃⁻ y Cl⁻, y disminuyen en eH, NO₃⁻ y SO₄⁼.

Es posible identificar las filtraciones si las características hidroquímicas de las muestras no coinciden con los valores de la hidroquímica regional.

– Presencia de contaminantes correspondientes a focos superficiales. Su presencia indica alta vulnerabilidad frente a la contaminación por flujos horizontales o verticales.

– Medidas hidroquímicas en los estratos confinantes. Análisis hidroquímicos estándar así como de ³H y ¹⁴C.

– Cambios en la química del agua. En acuíferos confinados la explotación intensiva de un pozo o campo de pozos puede provocar que los descensos producidos induzcan un flujo vertical que cambie la química del agua.

9.3.3.2. Datación de las aguas

Hay diferentes sistemas de datación de las aguas, siendo los que se emplean con mayor frecuencia los siguientes:

– Datación con tritio:

El contenido de tritio en las aguas subterráneas puede ser empleado para determinar su edad. El tritio es un isótopo radiactivo del hidrógeno cuyo origen natural está en la alta atmósfera, mediante la interacción del nitrógeno con neutrones cósmicos.

Artificialmente se produce por activación del hidrógeno y del deuterio en los circuitos de refrigeración primaria de los reactores nucleares, también por fisión terciaria del U^{235} y por reacción neutrónica sobre el litio y el boro.

A partir del año 1952 los ensayos termonucleares en la atmósfera provocaron un gran incremento en su contenido en tritio. En Estados Unidos en 1953 se midieron 30-50 UT, en 1954 se alcanzaron 1.000 UT, llegándose a un máximo en 1963 en torno a las 3.000 UT.

Las primeras determinaciones realizadas en Europa sobre la concentración de tritio en el agua de lluvia comenzaron en 1958. Las estimaciones sobre los valores correspondientes a los años anteriores se suelen apoyar en las determinaciones efectuadas en Ottawa (Canadá).

En la mayoría de los estudios se suele adoptar un intervalo de 5 a 15 UT como representativos del contenido de tritio del agua de lluvia caída sobre la Península antes del año 1952.

El tritio, una vez en la atmósfera comienza a desintegrarse siguiendo una ley que se expresa como:

$$C = C_0 \cdot e^{-\left[\frac{0,693}{t}(t-t_0)\right]}$$

donde:

C = Concentración residual en el año T

C_0 = Concentración en el año de infiltración T_0

t = Periodo de semidesintegración del tritio (12,26 años)

El procedimiento consiste en calcular la concentración que cabe esperar según esta ecuación en función de la concentración supuesta en el año de infiltración, tomando como referencia 1952, y los años transcurridos desde esa fecha hasta la actualidad, tomando este valor calculado como referencia. Valores superiores a este implicarían una infiltración posterior a 1952.

El método, muy usado en la actualidad para determinar la fecha de infiltración de aguas "recientes"

(posteriores al año 1952) lo que permite, entre otras aplicaciones, evaluar si un acuífero es confinado, irá perdiendo utilidad pues ya no se realizan ensayos nucleares atmosféricos y la corta vida del isótopo hace que las medidas en su contenido se vayan acercando al valor natural de fondo.

– Datación con Clorofluorocarbonos (CFCs)

Durante los últimos 50 años las actividades antrópicas han lanzado a la atmósfera ciertas sustancias químicas entre las que se encuentran los clorofluorocarbonos (CFCs) empleados para sistemas de refrigeración y otros usos (entre los años 50 y 80) que pasan al agua atmosférica y pueden llegar al agua subterránea. Su existencia en ésta indica que la recarga se produjo en los últimos 50 años.

A principios de los 90 científicos del USGS (Busenberg, Eurybiades y Plummer, 1992) desarrollaron una datación basada en la medida de CFCs aplicable a la mayoría de los sistemas de agua subterránea someros.

La posibilidad del uso de los CFCs para datación fue propuesta en los años setenta. Desde esta fecha se han utilizado como trazadores oceánicos de circulación, ventilación y mezcla. Los procedimientos analíticos se adaptaron para estudios de agua subterránea y se diseñaron métodos y equipamiento para el muestreo. Actualmente se trata de un trabajo rutinario en USA llevado a cabo por el USGS y se analizan hasta unos límites de 0,3 pg/kg (USGS, 1999).

La datación mediante CFC 11, 12 y 113 (Figura 78) es posible debido a que se han reconstruido sus concentraciones en la atmósfera en los últimos 50 años, se conocen sus solubilidades en agua y las concentraciones en el aire y agua joven son suficientes para ser medidas. La edad se calcula refiriendo la concentración en el agua a las medidas atmosféricas históricas existentes o a las concentraciones calculadas esperadas en el agua en equilibrio con el aire. La edad se aplica a la introducción del contaminante en el agua, no al agua en sí misma.

La precisión en la determinación depende de cómo se transporten en el agua. Procesos químicos como la degradación microbiana y la sorción también les afectan, por ello se suele denominar "edad modelo" o "edad aparente".

Los factores que pueden afectar a las concentraciones y la interpretación de la edad son: incertidumbre en la temperatura del agua en el momento de la recarga, exceso de aire atrapado en el

momento de la recarga, incertidumbre en la altura de la recarga, espesor de la zona no saturada, efecto del aire urbano, contaminación de origen local, degradación microbiana (ambiente anaerobio), sorción sobre superficies orgánicas y minerales y mezcla de aguas jóvenes y antiguas. Debido a ello en muchos casos se necesitan datos adicionales (gases disueltos: oxígeno, metano, nitrógeno, argón).

Por los límites de detección y la baja sensibilidad a la dispersión hidrodinámica los CFCs son los compuestos más fiables para la datación de aguas desde los años 40 y 50 pero en ambientes contaminados o con metano de degradación orgánica los isótopos pueden ser los únicos utilizables.

– Datación con Hexafluoruro de Azufre

El uso de hexafluoruro de azufre (SF_6) parece ser una alternativa posible, actualmente en estudio por el USGS (USGS, 1999). Su producción industrial comenzó en 1953, es extremadamente estable y se está acumulando de manera rápida en la atmósfera. Sus concentraciones históricas (Figura 79) se pueden reconstruir a partir de los datos de producción, muestras de aire guardadas, medidas atmosféricas, recuperaciones de agua de mar y muestras de agua subterránea datada previamente. Se trata de una herramienta cada vez más útil, debido a la disminución de los CFCs, aunque puede existir un leve problema debido a la existencia de una pequeña proporción de origen ígneo.

Para obtener mejores resultados se deben de utilizar varios métodos de datación debido a las limitaciones de cada uno. Los CFCs funcionan mejor en entornos rurales, este método parece funcionar bien en acuíferos someros, aerobios, y arenosos que contienen poca materia orgánica con una precisión de 2-3 años. La presencia de ellos en todo caso indica que hay agua recargada posterior a los años 40.

– Datación con Carbono 14 (^{14}C)

El carbono 14 determina la edad absoluta de la muestra en el HCO_3^- disuelto. Se recomienda para estimar edades del agua superiores a 500 años (menor es considerada moderna). Se determina así si el acuífero es confinado y su grado de confinamiento.

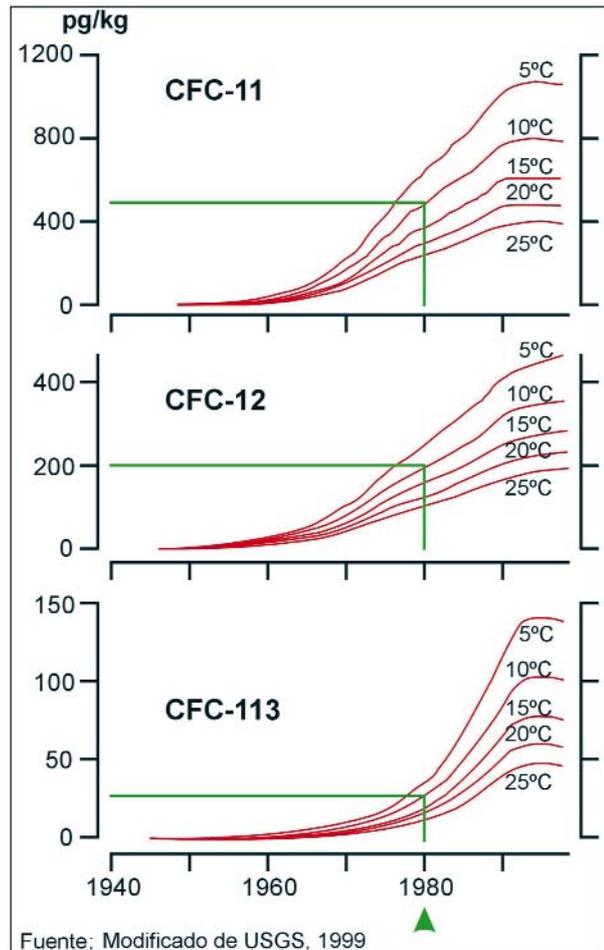


Figura 78: Concentraciones de CFC-11, CFC-12 y CFC-113 en el agua recargada en equilibrio con el aire entre los años 1940 y 2000 a temperaturas entre 5 y 25 °C. El análisis determinó que las concentraciones de CFC-11, CFC-12 y CFC-113 eran 493, 203 y 28 pg/kg en la muestra de agua a datar. La temperatura de recarga de 10°C se determinó mediante análisis de nitrógeno disuelto y argón en la muestra de agua.

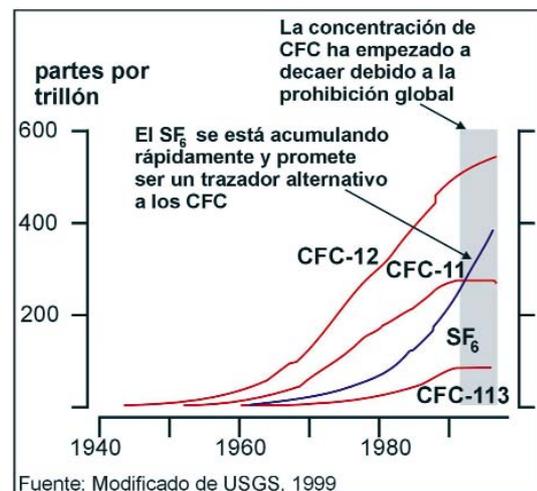


Figura 79: Concentraciones de CFCs y hexafluoruro de azufre en el aire en Norteamérica durante los últimos 50 años.

9.3.4. Diferenciación cuantitativa entre acuíferos confinados y semiconfinados

En el contexto de la delimitación de perímetros de protección es conveniente poder diferenciar cuantitativamente los acuíferos confinados de los semiconfinados, estableciendo un valor que, a pesar de ser en cierta medida arbitrario, permita establecer una diferenciación lógica y justificable.

El sistema propuesto (USEPA, 1991 b) se basa en la capacidad de evaluar cuantitativamente si el acuífero suprayacente puede filtrar contaminantes que afecten al acuífero confinado en un periodo de tiempo razonable, es decir es un criterio basado en el cálculo del tiempo de tránsito vertical.

Se propone un tiempo de tránsito de 50 años que indica que el agua bombeada fue recargada en la década de 1950. Esta época coincide con el inicio del desarrollo industrial, las pruebas nucleares y el empleo de fertilizantes y plaguicidas, por lo que la mayoría de los contaminantes se introdujeron en las aguas subterráneas con posterioridad a esa fecha.

La estimación del tiempo de tránsito seleccionado (50 años) puede efectuarse mediante dos sistemas:

– Datación:

Es muy adecuada la datación con tritio o mediante los otros métodos anteriormente indicados.

Si no hay valores apreciables de tritio entonces el tiempo de tránsito es superior a 50 años y el acuífero puede considerarse altamente confinado. Si el contenido en tritio presenta valores mayores (superiores al que correspondería a la concentración inicial supuesta para la fecha de infiltración, aplicándole la ecuación de desintegración antes indicada, es decir valores superiores a 1 U.T.), entonces el tiempo de tránsito (vertical y horizontal) es menor de 50 años y el acuífero debe considerarse semiconfinado y por tanto más vulnerable a una eventual contaminación.

– Cálculo del tiempo de tránsito vertical a partir de parámetros hidráulicos:

Se emplea la ecuación:

$$t = \frac{m \cdot L \cdot X}{K' \cdot \Delta h}$$

donde:

t = tiempo de tránsito vertical a través de la capa confinante

m = porosidad del acuitardo

L = espesor del acuitardo

X = distancia de tránsito a través del confinante

K' = conductividad hidráulica vertical del estrato confinante

Δh = gradiente hidráulico a través de la capa confinante

Esos valores se obtienen del estudio hidrogeológico y de un ensayo de bombeo.

Derivada de la expresión anterior puede obtenerse otra ecuación que permite identificar qué conductividad hidráulica se emplearía para diferenciar un acuífero semiconfinado de otro altamente confinado, que es:

$$K' = \frac{m \cdot L \cdot X}{t \cdot \Delta h}$$

en la cual se introducen los valores de los diferentes parámetros y el de un tiempo de tránsito de 50 años.

Es recomendable una aproximación integrada, aunando a esta diferenciación cuantitativa los estudios geológicos (que indican confinamiento y las vías de flujo), hidrológicos e hidroquímicos (que indican si hay o no filtraciones verticales).

9.4. Delimitación de perímetros de protección de una captación en medios confinados

Los criterios y métodos que se proponen para delimitar perímetros de protección de una captación en acuíferos confinados son los siguientes:

9.4.1. Criterios hidrodinámicos para la delimitación de perímetros de protección en acuíferos confinados

Se pueden establecer diferentes criterios para la determinación de las áreas de protección en los acuíferos confinados. Éstos son:

Distancia

Radio fijo o dimensión fija. Es el más simple, barato y más arbitrario. Debe utilizarse sólo en los estadios iniciales como primera aproximación.

Descenso

Ocurre en la zona de influencia de la captación. En acuíferos confinados la filtración potencial hacia el

acuifero no se transmite inmediatamente. El cono de descenso puede ser mayor que la superficie por la que se produce la filtración si el nivel piezométrico del acuifero confinado es superior a la de uno libre suprayacente. Los límites se deben referir a un tiempo concreto, debido al aumento del cono con el tiempo.

Tiempo de tránsito

Tiempo que tarda el agua en llegar desde un punto a una captación. Se puede calcular para un flujo vertical y para un flujo vertical y horizontal combinado. Se asume generalmente un flujo subterráneo advectivo aplicando la ley de Darcy.

Criterios hidrogeológicos

Localización de las divisorias hidrogeológicas y otros límites físicos como criterio y definición del área de alimentación de una captación. Los límites físicos pueden ser geológicos (fallas...) o hidrológicos (divisorias naturales o inducidas...). Si el gradiente hidráulico es despreciable la divisoria viene marcada por el cono de descensos, solo se toma agua de la zona de influencia, éstos suelen ser acuiferos profundos. Si el gradiente no es despreciable, las dos zonas, de influencia y de contribución no coinciden, la divisoria aguas abajo se encuentra dentro de la zona de influencia y aguas arriba fuera de ésta hasta que alcanza una barrera hidrogeológica. Si el tiempo de tránsito es elevado se incrementa la diferencia entre la zona de influencia y la zona de contribución.

Poder autodepurador del terreno

La zona saturada y la no saturada pueden atenuar los contaminantes (dilución, dispersión, adsorción, precipitación química o degradación biológica) antes de que lleguen a la captación. Se necesitan métodos sofisticados de tratamiento del fenómeno de la contaminación, estudio de la geología, hidrología y geoquímica del entorno.

Se recomienda la utilización del criterio del tiempo de tránsito combinado con criterios hidrogeológicos, porque la distancia no caracteriza de forma precisa la zona de recarga, las divisorias en acuiferos confinados son difíciles de definir, el tratamiento de datos para el cálculo del poder autodepurador del terreno es complejo y el empleo del cono de descensos delimita zonas innecesariamente grandes en comparación con el tiempo de tránsito.

9.4.2. Métodos para el cálculo de áreas de protección de captaciones en acuiferos confinados

Se hace una aproximación diferente en función del gradiente hidráulico regional existente.

9.4.2.1. Para el cálculo de áreas de protección con gradiente despreciable

En este caso se pueden delimitar las áreas de protección mediante:

- El cono de descensos: la extensión lateral del cono de descensos, definida por el contorno con descensos pequeños, por ejemplo de 30 cm, define la zona de influencia alrededor de un pozo de bombeo después de un periodo determinado de tiempo. Se calcula mediante:
 - Descensos en pozos de observación a diferentes distancias del pozo de bombeo. Se pueden representar valores de descenso observados simultáneamente en diversos pozos de observación en una gráfica de descenso respecto a la distancia. Si se representa el descenso respecto al logaritmo de la distancia los valores se ajustan a una línea recta. El punto donde esta línea interseca la correspondiente a valores de descenso del orden de 0 a 0,3 m define el tamaño del cono de bombeo.
 - Descenso respecto al tiempo en el pozo de bombeo o en un pozo de observación. Este método (Figura 80) consta de tres etapas:
 - En la primera se realiza un ensayo de bombeo en el pozo de abastecimiento con el caudal constante de explotación requerido para el mismo. Se representa en una gráfica el descenso de niveles respecto al logaritmo del tiempo en el pozo de bombeo, o en un pozo de observación, obteniéndose la pendiente de la recta que une dichos valores.
 - En la segunda etapa se selecciona un valor de descenso y tiempo en el que se produce, por ejemplo 300 minutos, representándose en una gráfica descenso frente a logaritmo de la distancia (a la que está el pozo de bombeo). Se dibuja entonces una recta que pase por este punto con el doble de la pendiente obtenida en la gráfica de descenso frente a logaritmo de tiempo en la primera etapa.

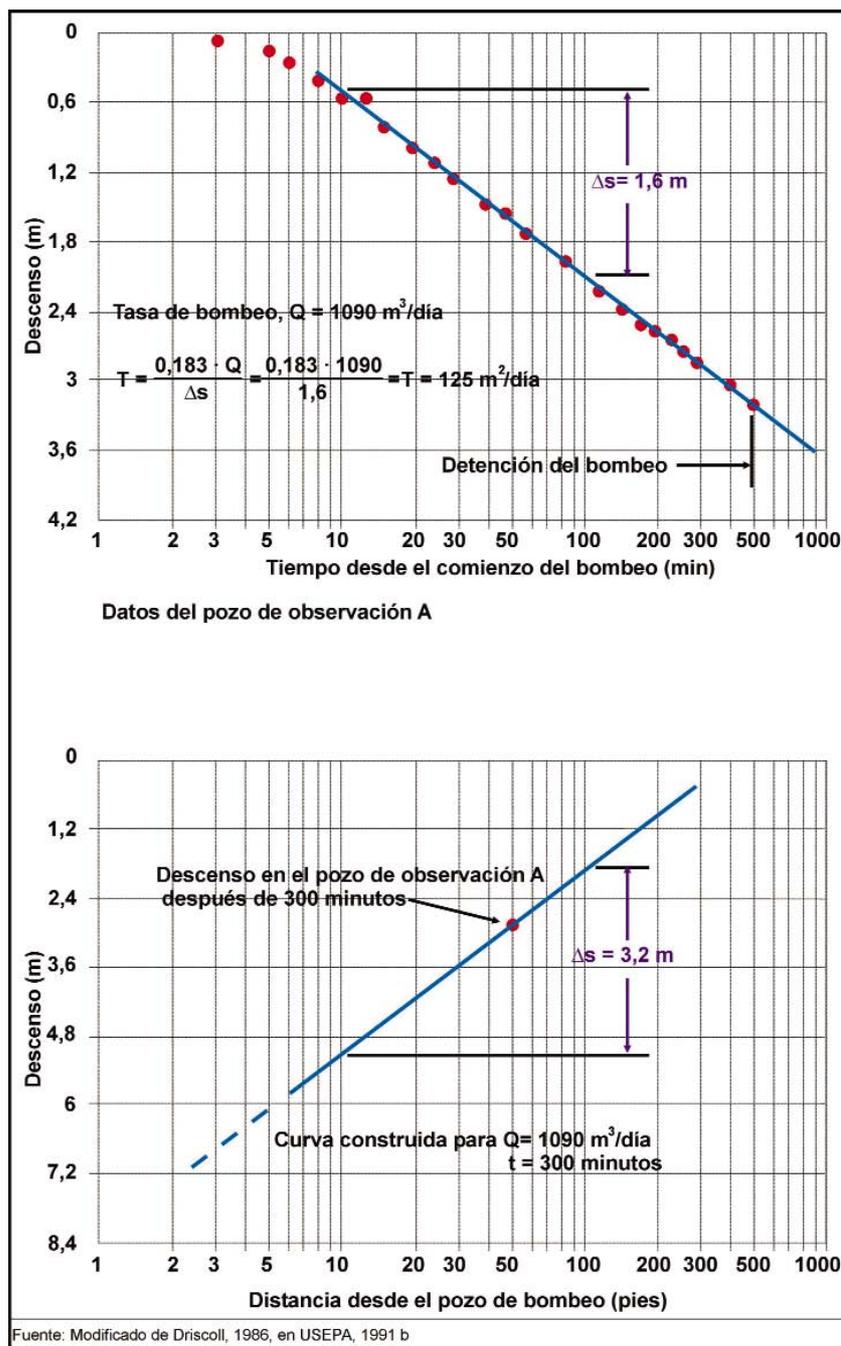


Figura 80: Ejemplo de aplicación del método de descenso respecto al tiempo en el pozo de bombeo o en un pozo de observación.

- En la tercera etapa se introduce el valor seleccionado como límite del cono de descenso obteniéndose en su corte con la línea obtenida en la segunda etapa la distancia hasta la que debe extenderse.
- En equilibrio, con el cono estabilizado, mediante la fórmula de Thiem.
- Sin equilibrio, con el cono aún en expansión mediante la fórmula de Theis.
- Simulación descenso/distancia usando soluciones analíticas o modelos informáticos simples. Se utilizan los parámetros obtenidos en los ensayos de bombeo preferentemente. Pueden ser:
 - Tiempo de tránsito: Se basa en la aplicación de la Ley de Darcy. Se calcula la distancia de flujo o tiempo de tránsito mediante los siguientes métodos:

- Método del Cono de descenso/Tiempo de tránsito. Calculado en base al gradiente hidráulico del cono mediante:
- Método de análisis del sistema de flujo combinado con el cálculo del tiempo de tránsito (ver apartado 6.3.2.).
- Modelos matemáticos: para el cálculo de las trayectorias de flujo directas o inversas de las partículas (ver apartado 6.3.11.).
- Método del radio fijo ecuación de flujo volumétrica (ver apartado 6.3.3.).
- Modelos semianalíticos y analíticos: modelos WHPA y WhAEM desarrollados por la USEPA (ver apartado 6.3.12.).
- Análisis del sistema de flujo combinado con la ecuación de flujo uniforme (ver apartado 6.3.6.).
- Zona de transporte calculada con contornos de tiempo de tránsito. Se utilizan:
 - Solución analítica simple para la aproximación a isocronas que definen zonas de transporte (ver apartado 6.3.8.).
 - Modelos semianalíticos y analíticos: modelo WHPA y WhAEM (ver apartado 6.3.12).
 - Otros modelos con cálculo de trayectorias inversas de flujo de las partículas.

Consideraciones para la elección del método

Consideraciones para la elección del método

Es aconsejable utilizar el método del Cono de descensos/Tiempo de tránsito, por ser el más versátil y valorar de forma más aproximada las zonas de protección necesarias, tanto en acuíferos confinados como en semiconfinados. El método del cono de descensos, que considera la filtración desde las capas confinantes, es adecuado para acuíferos semiconfinados, pero para confinados puede dar tamaños excesivos.

9.4.2.2. Cálculo del área de protección con gradiente regional significativo

Normalmente en los acuíferos confinados el gradiente hidráulico es muy bajo, pero puede suceder que afecte al cono de descensos en el bombeo lo que hace que el perímetro de protección que se va a delimitar se encuentre controlado por el gradiente hidráulico, la transmisividad y el caudal. En estos casos se utilizan métodos que incorporan el gradiente hidráulico regional.

La delimitación de zonas de protección se puede llevar a cabo mediante:

El análisis del sistema de flujo combinado con la ecuación de flujo uniforme proporciona un área única para el perímetro de protección. Ésta no depende del tiempo de tránsito, lo que puede conducir a perímetros de gran extensión. La solución analítica simple para la aproximación a isocronas que definen zonas de transporte sólo da dos puntos a lo largo de la línea que define la dirección de flujo obtenida del análisis de la piezometría, no indica el área de la zona de protección.

Los modelos semianalíticos y analíticos delimitan el área completa del perímetro de protección, considerando el efecto de las filtraciones verticales en el caso de que el acuífero sea semiconfinado. El resto de modelos matemáticos, mediante la simulación de las trayectorias de las partículas, delimitan las zonas de protección a establecer de forma más precisa, pero requieren una mayor disponibilidad de datos y de tiempo para su elaboración, no siempre abordable en el caso de la delimitación de perímetros de protección.

La secuencia de trabajos a efectuar para proceder a la delimitación de perímetros de protección en acuíferos confinados se indica en la figura 81.

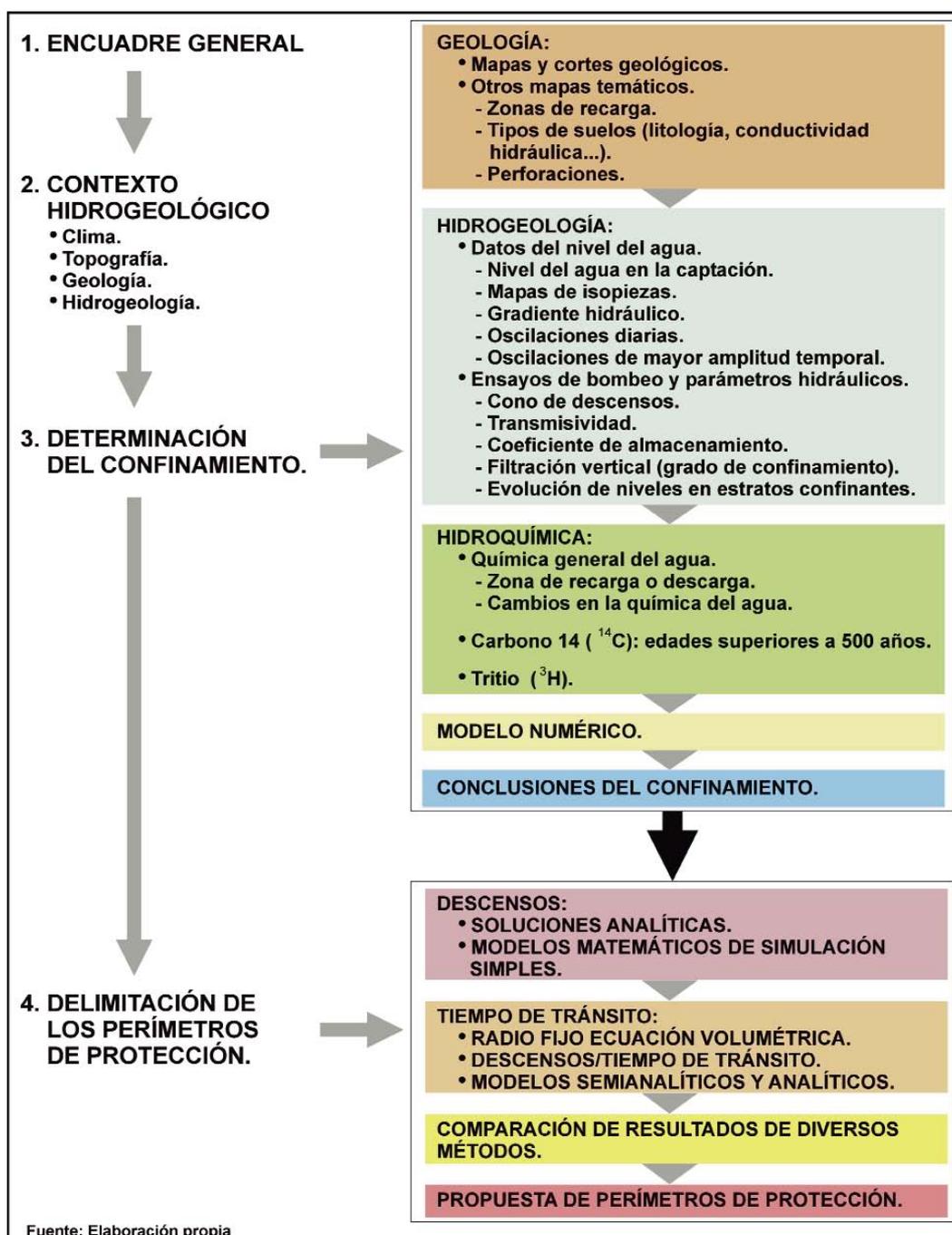


Figura 81: Esquema general para la delimitación de perímetros de protección en acuíferos confinados.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia Europea de Medio Ambiente. 1999. *Groundwater quality and quantity in Europe*. Copenhagen. 123 pp. <http://reports.eea.eu.int/groundwater07012000/en/enviassrp199903>
- Albinet, M. 1972. *Contribution à la délimitation des périmètres de protection des captages d'eau souterraine. Essai de détermination de l'aire d'alimentation de captages en nappes libres*. Note technique n° 3, BRGM 72. SGN 370. AME.
- Albinet, M. y Margat, J. 1970. *Cartographie de la vulnérabilité à la pollution de nappes d'eau souterraine*. Orleans, Francia. Bull. BRGM, 2° Series 3 (4), 13-22.
- Alley, T., 1997. Keynote Adress: Dyes don't lie; practical karst hydrology. *Karst-Water Environment Symposium*. 1-10. Virginia Water Resources Research Center. Virginia. <http://www.vwrrc.vt.edu/pdf/karst.pdf>
- Aller, L.; Bennet, T.; Lehr, J.H.; Petty, R.I. y Hackett, G. 1987. *DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings*. United States Environmental Protection Agency. Ada, Oklahoma, EPA 600/2/87/035. 643 pp.
- Alonso, A. 1981. El Cretácico de la provincia de Segovia (Borde norte del sistema Central). Universidad Complutense de Madrid. *Seminario de estratigrafía*, 7,1-271.
- AmbienteDiritto.it, Sito giuridico ambientale. 2003. *Decreto del Presidente della Repubblica 24 maggio 1988, n. 236 (in Gazz. Uff., 30 giugno 1988, n. 152, s.o.)*. <http://www.ambientediritto.it/Legislazione/ACQUA/DP/Rn.236.1998.htm>
- Andersen, L.J. y Thomsen, R. 1994. Case history II. Land-use planning and groundwater protection in Denmark. En: *Seminario sobre perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas: Experiencia en países europeos*. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea, Barcelona.
- Andreo, B.; Vías, J.M.; Perles, M.J.; Carrasco, F.; Vadillo, I. y Jiménez, P. 2002. Ensayo metodológico para la protección de aguas subterráneas en acuíferos carbonatados. Aplicación al sistema de Torremolinos. En: *Presente y futuro del agua subterránea en España y la Directiva Marco europea. Textos de las ponencias y comunicaciones*. Zaragoza. Asociación Internacional de Hidrogeólogos – Grupo Español.
- Andreo, B.; Goldscheider, N.; Vadillo, I.; Neukum, C.; Brechenmacher, J.; Carrasco, F.; Hötzl, H.; Jiménez, P.; Perles, M. y Sinreich, M. 2003. *Sierra de Líbar (Southern Spain). Comparative application of the PI and COP methods of intrinsic vulnerability mapping, specific vulnerability mapping, hazard and risk mapping*. Libro de la Acción COST 620. En prensa.
- Ayuntamiento de Villacastín. 1994. *Revisión de las Normas Subsidiarias de Villacastín (Segovia). Tomo 1. Normas urbanísticas*, 70 pp. <http://www.jcyl.es/plau/lplanes.plau#>
- Bayó Dalmau, A.; Castiella Muruzabal, J.; Custodio Gimena, E.; Niñerola Pla, S. y Virgos Soriano, L. 1986. Ensayo sobre las diversas tipologías de acuíferos en rocas carbonatadas de España. Infiltración, técnicas de estudio y formas de captación y explotación. En: *I Máster en Tecnologías Hidrogeológicas*. IGME – ETSIMM. Madrid. 1991.
- Bear, J. y Jacob, M., 1965. On the movement of water bodies injected into aquifers: *Journal of hydrogeology*, 3, 37-57.
- Bellido, F.; Capote, R.; Casquet, C.; Fúster, J.M.; Navidad, M.; Peinado, M. y Villaseca, C. 1981. Caracteres generales del cinturón Hercínico en el Sector oriental del Sistema Central Español. *Cuadernos de Geología Ibérica*, 7,15-52.
- Benito de Santos, G. 1987. Los virus, el SIDA y el medio hídrico. *Tecnología del agua*, 38, 69 – 74.
- Bitto, G. y Gerbo, C.P. 1984. *Groundwater pollution microbiology*. John Wiley and sons, eds. 377 pp.
- Bitton, G.; Farrah, S.R.; Ruskin, R.H.; Butner, J. y Chou, Y.J. 1983. Survival of pathogenic and indicator organisms in ground-water. *Groundwater*, vol. 21, 4, 405-410.
- Boletín Oficial de Castilla y León (BOCYL). 1994. *Decreto 151/1994, de 7 de julio, por el que se aprueba el Plan Director de Infraestructura urbana*. BOCYL número 70, de 26 de octubre.
- Boletín Oficial de Castilla y León (BOCYL). 1999. *Ley 5/1999, de 8 de abril, de urbanismo de Castilla y León*. BOCYL número 70, de 15 de abril.
- Boletín Oficial del Estado (BOE). 1985. *Ley 29/85, de 2 de agosto, de Aguas*. BOE número 189, de 8 de agosto.

- Boletín Oficial del Estado (BOE). 1986. *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 29/85, de 2 de agosto, de Aguas*. BOE número 103, de 30 de abril.
- Boletín Oficial del Estado (BOE). 1988. *Real Decreto 927/1988, de 29 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica, en desarrollo de los títulos II y III de la Ley de Aguas*. BOE número 209, de 31 de agosto.
- Boletín Oficial del Estado (BOE). 1990. *Real Decreto 1138/1990, de 14 de septiembre, por el que se aprueba la Reglamentación Técnico Sanitaria para el abastecimiento y control de calidad de las aguas potables de consumo público*. BOE número 226, de 20 de septiembre.
- Boletín Oficial del Estado (BOE). 1998 a. *Ley 6/1998, de 13 de abril, sobre régimen del suelo y valoraciones*. BOE número 89, de 14 de abril.
- Boletín Oficial del Estado (BOE). 1998 b. *Real Decreto 1664/1998, de 24 de julio, por el que se aprueban los Planes Hidrológicos de cuenca*. BOE número 191, de 11 de agosto de 1998.
- Boletín Oficial del Estado (BOE). 1999 a. *Orden de 13 de agosto de 1999 por la que se dispone la publicación de las determinaciones del contenido normativo del plan Hidrológico de la cuenca del Duero, aprobado por Real Decreto 1664/1998, de 24 de julio*. BOE número 206, de 28 de agosto, de 1999.
- Boletín Oficial del Estado (BOE). 1999 b. *Ley 46/99, de 13 de diciembre, de modificación de la Ley 29/85, de 2 de agosto, de Aguas*. BOE número 298 de 14 de diciembre.
- Boletín Oficial del Estado (BOE). 2001 a. *Real Decreto 378/2001, de 6 de abril, por el que se aprueba el Plan Hidrológico de las Illes Balears*. BOE número 96, de 21 de abril.
- Boletín Oficial del Estado (BOE). 2001 b. *Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional*. BOE número 161, de 6 de julio.
- Boletín Oficial del Estado (BOE). 2001 c. *Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas*. BOE número 176, de 24 de julio.
- Boletín Oficial del Estado (BOE). 2003 a. *Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano*. BOE número 45, de 21 de febrero.
- Boletín Oficial del Estado (BOE). 2003 b. *Real Decreto 606/2003, de 23 de mayo, por el que se modifica el 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*. BOE número 135, de 6 de junio.
- Boletín Oficial de las Islas Baleares (BO Islas Baleares). 2002. *Resolución de 28 de mayo de 2002, por la que se dispone la publicación de las determinaciones de contenido normativo del Plan Hidrológico de las Illes Balears, aprobado por el Real Decreto 378/2001, de 6 de abril*. BO Islas Baleares de 27 de junio.
- Bonacci, O. 1987. *Karst hydrology, with special reference to the dynamic karst*. Springer – Verlag. Berlin, Heidelberg, Nueva York. 184 pp.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. 2001. *Environmental policy. It's our future. Water resources management in Germany. Part 1, Fundamentals*. BMU. Berlín. 67 pp. <http://www.umweltbundesamt.de/wasser/veroeffentlich/kostenlos.htm>
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, BMU. 2003 *Drinking water*. BMU current topics. <http://www.bmu.de/english/fsheet800.php>
- Bussenberg, E. y Plummer, L.N. 1992. Use of chlorofluorocarbons (CCl₃F and CCl₂F₂) as hydrologic tracers and age – dating tools: example- the alluvium and terrace system of central Oklahoma. *Water Resources Research*, vol. 28, 2257–2284.
- Cabo de la Fuente y Catalán. 1972. *Bacteriología y potabilidad del agua*. 261 pp. Aportación de los autores al año internacional del libro.
- California Environmental Protection Agency. State water resources. 2002. *Evaluation of groundwater model applications*. California Environmental Protection Agency. <http://www.swrcb.ca.gov/cwphome/land/landu/intErnet/modeval.htm>
- Capote, R. 1985. Historia deformativa en el Sistema Central. Tectónica prehercínica y Hercínica. *Revista Real Academia de Ciencias exactas Físicas y Naturales*. 79, 4, 511-522.
- Capote, R.; Casquet, C. y Fernández Casal, M.J. 1982. Los grandes complejos estructurales del Sistema Central: Modelo de evolución tectonometamórfica. *Revista Real Academia de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*. 76, 2, 313-331.
- Charlaix, E.; Guyon, E. y Rivier, N. 1984. A criterion for percolation treshold in a random array of plates. *Solid state communications*, 50, 999-1002.
- Civita, M. 1994. *Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Studi sulla vulnerabilità degli acquiferi. Teoria & Practica*. Pitagora Editrice. Bolonia. 325 pp.
- Cohen, S.Z; Eiden, C. y Corber, M.N. 1986. Monitoring groundwater for pesticides. Evaluation of pesticides. En: *Groundwater ACS Symposium series*, 315, 170 – 195. Washington D.C.

- Comisión Para la Cooperación Ambiental de América del Norte, CCA. 2002. *Resumen de derecho ambiental en Canadá. Protección y gestión de los recursos hidráulicos*. http://www.cec.org/pubs_info/resources/law_treat_agree/summary_enviro_law/publication/index.cfm?varlan=espanol
- Confoederatio Helvetica, 2003. *Loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux) 814.20, du 24 janvier 1991 (Etat le 21 décembre 1999)*. <http://www.admin.ch/ch/fr/rs/8/814.20.fr.pdf>
- Daly, D. y Misstear, B.D. 2001. The groundwater protection scheme in Ireland: A risk-based tool for effective land use planning. *Protecting groundwater*. Birmingham. Environment Agency. NC/00/10/Conference Proceedings, 134-146.
- Daly, D. 2002. "Groundwater Protection Schemes" - A National Methodology for Protecting Groundwater. En: UK Groundwater Forum. *Groundwater Protection – An Overview of Current Issues*. <http://www.nwl.ac.uk/gwf/proceed.pdf>
- Daly, D.; Dassargues, A.; Drew, D.; Dunn, S.; Goldscheider, N.; Neale, S.; Popescu, C. y Zwhalen, F. 2002. Main concepts of the "European approach" for (karst) groundwater vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeology Journal*, 10 (2), 340 – 345.
- Danish Environmental Protection Agency. 2003. *Aquatic environment – Acts*. <http://www.mst.dk/homepage/>
- Davis, S. N. y DeWiest, R. J. M. 1966 *Hydrogeology*. John Wiley & Sons, Inc. Nueva York. 463 pp.
- Department of the Environment and Local Government, DELG; Environmental Protection Agency, EPA, y Geological Survey of Ireland, GSI. 1999. *Groundwater Protection Schemes*. 24 pp. <http://www.gsi.ie/workgsi/groundwater/gwpsfra.htm>
- Deutsche Vereinigung des Gas und Wasserfaches, DVGW. 1995. *Directrices para áreas de protección de agua potable, parte I: Áreas de protección para aguas subterráneas*. <http://www.wvgw.de/cgi-bin/regelsuche.pl>
- Dershowitz, W.; Lee, G.; Geier, J.; Hitchcock, S.; LaPointe, P. y Thomas, A. 1998. *Fracman interactive discrete fracture data analysis, geometric modeling and exploration simulation. Version 2.6*. Golder Associates.
- Dirección General de Obras Hidráulicas (DGOH). 1993. *Estudio de caracterización de la Unidad Hidrogeológica: Región de los Arenales. 02-17*. Informe 2884. Servicio Geológico.
- Dirección General de Obras hidráulicas (DGOH) e Instituto Geológico y Minero de España (IGME). 1988. *Estudio de delimitación de las unidades hidrogeológicas del territorio peninsular e Islas Baleares y síntesis de sus características*. Informe 2503. Servicio Geológico.
- Dodge, M. 1982. *Structure fortionnement hydrodynamique et vulnérabilité des aquifères kárstiques*. Bruselas. Sec. nationales des distributions d'eau et comm de protection des sites speleologiques. 42 –46.
- Doerfliger, N. y Tâche, E. 1995. *Vulnérabilité des eaux dans les régions karstiques et délimitation des zones de protection. Methodologie EPIK*. Rapport intermédiaire, phase 3a 1994/1995. Centre d'hydrogeologie de l'Université de Neuchâtel, pour l'Office Fédéral de l'environnement, des Forêts et du Paysage.
- Doerfliger, N. 1996. *Advances in karst groundwater protection strategy using artificial tracer test analysis on a multiattribute vulnerability mapping (EPIK method)*. Tesis Doctoral, Universidad de Neuchâtel (Suiza). 308 pp.
- Driscoll, F.G. 1986. *Groundwater and wells*. St. Paul, Minnesota. Johnson Division. 1089 pp.
- Environment Agency. 1998. *Policy and practice for the protection of groundwater*. The Stationery Office, 57 pp.
- Environment Agency. 2001 a. *Guidance on the assessment and interrogation of subsurface analytical contaminant fate and transport models*. National Groundwater Contaminated Land Center report. Environment Agency. NC/99/38/1, 50 pp. http://www.environmentagency.gov.uk/commondata/105385/nc_99_38_1.pdf?lang=e
- Environment Agency. 2001 b. *Guidance on assigning values to uncertain parameters in subsurface contaminant fate and transport modelling*. National Groundwater & Contaminated Land report NC/99/38/3. Bristol. 62 pp. http://www.environment-agency.gov.uk/commondata/105385/nc_99_38_1.pdf?lang=e
- Environment Agency. 2002. *Groundwater source protection zones*. Environment Agency. National Groundwater and Contaminated Land Center. Otton, Solihul. 9 pp. <http://www.environment-agency.gov.uk/commondata/105385/112974>
- Environment Agency. 2003. *Groundwater source protection zones Data maps*. <http://www.environment-agency.gov.uk>.
- Environnement Québec. 2003 a. *Règlement sur le captage des eaux souterraines. Loi sur la qualité de l'environnement*. <http://www.menv.gouv.qc.ca/eau/souterraines/reglement.pdf>
- Environnement Québec. 2003 b. *Regulation respecting the quality of drinking water*. <http://www.menv.gouv.qc.ca/eau/potable/reglement-eau-potable-en.pdf>
- Escola Superior de Tecnologia de Gestão Beja, ESTIG. 2003. *Direito de Águas - Portugal*. http://www.estig.ipbeja.pt/~ac_direito/daguaslegis.html
- FAO. 1975. *Contaminación de las aguas subterráneas. Tecnología, economía y gestión*. AGL: DP/SPA/73001. Informe técnico 1.
- Fernández Ruiz, L.; Montserrat Rebull, F.X y Cristobal, F.P. 1990. Residuos sólidos urbanos. En *XXIII Curso Interna-*

- cional de hidrogeología aplicada*. IGME. ETSIMM, Madrid, 1990.
- Fernández Sánchez, J.A. 2001. Protección de las aguas subterráneas en el desarrollo del territorio. En: Iribar, V.Grima, J, y Sánchez Vila (ed), *Las aguas subterráneas en el Plan Hidrológico Nacional*. Ediciones Mundiprensa, Madrid, 99-106.
- Finnish Environment Institute, SYKE. 2001. The Finnish Eurowaternet with information about Finnish water resources and monitoring strategies. The Finnish Environment, 445. Helsinki. 62 pp. <http://www.vyh.fi/eng/orginfo/publica/electro/fe445/fe445.htm>
- Ford, D.C. y Williams, P.W. *Karst geomorphology and hydrology*. Chapman Hall. Londres. 601 pp.
- Foster, S. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. En: Van Duijvenbooden, W. y Van Waegeningh, H. G. (eds.). *Vulnerability of soil and groundwater to pollution*, Vol. 38. 69 – 86. TNO committee on hydrological research. La Haya.
- Foster, S. 1994. Managing land to protect groundwater sources: The English experience. En *Seminario sobre perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas: Experiencia en países europeos*, Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea, Barcelona, diciembre 1994.
- Foster, S.S.D. y Skinner, A.C. 1994. *Protección de las aguas subterráneas. La ciencia y la práctica de la zonificación de la superficie*. III Curso sobre la zona no saturada y la contaminación de las aguas subterráneas. Barcelona.
- Franke, T.E.; Reilly, T.E.; Pollock, D.W. y LeBaugh, J.W. 1998. *Estimating areas contributing recharge to wells. Lessons from previous studies*. United States Geological Survey (USGS). Circular 1174. Denver. 14 pp. <http://water.usgs.gov/ogw/pubs/Circ1174/circ1174.pdf>
- Gale, J.E. 1982. *Assessing the permeability characteristics of fractured rock*. En Namasimhan, T. N. (ed.) *Recent trends in hydrogeology*. Geological Society of America Special Paper. 189 pp. 163-182.
- Geological Survey of Denmark and Greenland, GEUS. 1997. *Water resources. Freshwater! the 21st Century's most serious problem?*. Geologi, 2. Copenhagen. 16 pp. <http://www.geus.dk/publications/geo-nyt-geus>
- Geological Survey of Ireland. 2000. *Groundwater section*. <http://www.gsi.ie/workgsi/groundwater/groundwater-fra.htm>
- Goldscheider, N.; Klute, M.; Sturm, S. y Hölz, H. 2000. The PI method – a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. *Zeitschrift für angewandte geologie*, 46 (2000) 3. 157-166.
- González Manso, J. y Giráldez Cebollos-Escalera, R. 1998 a. *Evaluación de Impacto Ambiental (Simplificada)*. *Ampliación de explotación porcina hasta 400 reproductoras, producción de lechones de 6 kg (fase 1)*. Sociedad Cañada del Abad S.L., 43 pp.
- González Manso, J. y Giráldez Cebollos-Escalera, R. 1998 b. *Evaluación de Impacto Ambiental (Ordinaria)*. *Construcción de explotación porcina para cría y cebo. (Fase 2 y 3)*. Sociedad cañada del Abad S.L., 47 pp.
- Gramel, S. y Urban, W. 2001. Cooperative agreements between water supply and agriculture in Germany. *Protecting groundwater*. Birmingham, U.K. Environment Agency NC/00/10/Conference Proceedings, 37-49.
- Harvey, R.W. y Georg, L.H. 1986. Population dynamics of free – living bacteria in an organically contaminated aquifer. *Summary of the American Geophysical Union Chapman conference on microbial processes in the transport, fate and in situ treatment of subsurface contaminants*. Snowbind, Utah.
- Hatton, C.G.; Main, I.G. y Meredith, P.G. 1994. Non-universal scaling of fracture length and opening displacement. *Nature*, 367, 160-162.
- Heredia Díaz, J. 1995. *Estudios de vulnerabilidad de acuíferos*. Informe técnico. Inédito.
- Hickey, J. J. 1984. Field testing the hypothesis of darcian flow through a carbonate aquifer. *Groundwater*, 22/5, 544-547.
- Hirata, R. y Reboucas, A. 1999. La protección de los recursos hídricos subterráneos: una visión integrada, basada en perímetros de protección de pozos y vulnerabilidad de acuíferos. *Boletín Geológico y Minero*, 110-4, 423-436.
- Henriksen, H.J.; Knudby, C.; Nyegaard, P.; Rasmussen, P.; Hansen, M. y Jacobsen, P.R. 1997. *National water resources modelling in Denmark: Application of national groundwater model for the Isle of Funen*. Refsgaard. Karalis (eds.) Balkema, Rotterdam. 277-284.
- Hoffman, W. y Lillich, W., 1973. Problematik der bemessung der engeren schutzzones für lockergesteinsaquifere. *Deutsch. Geol.* Hannover.
- Höltig, B.; Haertle, T.; Hohberger, K.H.; Nachtigall, K.H.; Villinger, E.; Weinzierl, W. y Wrobel, J.P. 1995 Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. *Geol. Jb.*, C 63, 5-24. Hannover.
- Horsley, Scott, W., 1983. Delineating zones of contribution for public supply wells to protect groundwater. *National water well conference. Proceedings*. Worthington, Ohio.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). 1979. *Proyecto para la investigación hidrogeológica de la cuenca del Duero. Sistemas número 8 y 12. Plan nacional de investigación de aguas subterráneas (PIAS)*. IGME.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). 1980. *Investigación hidrogeológica de la cuenca del Duero*.

- Sistemas número 8 y 12. Colección Informe. IGME, Madrid, 75 pp.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). 1982 a. *Proyecto de investigación de infraestructura hidrogeológica del sistema 11. Cuenca del Duero*. IGME.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). 1982 b. *Investigación hidrogeológica de la cuenca del Duero. La explotación de los recursos hidráulicos en la zona comprendida entre los ríos Voltoya y Trabancos*. IGME, Madrid, 47 pp.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). 1982 c. *Proyecto de Gestión y conservación de acuíferos en la cuenca del Duero. Informe sobre la calidad del agua*. IGME.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). 1987. *Calidad de las aguas subterráneas en los acuíferos terciarios detríticos de la cuenca del Duero*. IGME.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). 1990. *Estudio metodológico de los procesos de contaminación bacteriológica en las aguas subterráneas. Aplicación a los acuíferos del norte de España*. IGME.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME) 2000. *Unidades Hidrogeológicas de España. Mapa y datos básicos*. IGME, Madrid, 34 pp.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga. 2002. *Clasificación tipológica de acuíferos carbonáticos del sur de España y estimación de su recarga*. Inédito.
- Instituto Nacional de Estadística (INE). 2002. *Demografía y población. Series cronológicas TEMPUS. Datos de población de los municipios de España* <http://www.ine.es/inebase/cgi/um>
- IUSCOMP, The Comparative Law Society. 2003. *Federal Water Act (Wasserhaushaltsgesetz, WHG) – Excerpts*. <http://www.iuscomp.org/gla/statutes/WHG.htm>
- Jedlitschka, J. 1994 The drinking water protection areas in Germany/Bavaria. En: *Seminario sobre perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas: Experiencia en países europeos*. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea, Barcelona.
- Käss, W. 1998. *Tracing technique in geohydrology*. A.A. Balkema, Rotterdam. 580 pp.
- Kimmeier, F.; Bouzelboudjen, M.; Ornstein, P.; Weber, I. y Roullier, J.D. 2001. Geohydrological parameter identification and groundwater vulnerability to pollution: A Swiss case study. *Proceedings of the 3rd International Conference on Future Groundwaters at Risk – FGG'01*. Ribeiro, L. (ed.). Lisboa. 63 - 78.
- Konikow. 1986. *Current issues predictive modeling of groundwater*. U. S. Geological Survey Newsletter, p. 4.
- Krijgsman, B. y Lobo Ferreira, J.P. 2001. *A methodology for delineating wellhead protection areas*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, 76 pp. http://www-dh.lnec.pt/Gias/english/projects/BK_LF ICT2001.pdf
- Ladeira, F.L. y Price, N.J. 1981. Relationship between fracture spacing and bed thickness. *Journal of Structural Geology*, 3, 179-183.
- Lallemant – Barrès, A. y Roux, J.C. 1989. *Guide méthodologique d'établissement des périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée a la consommation humaine*. Manuels et méthodes. Éditions du BRGM. Orleans, 221 pp.
- Lallemant – Barrès, A. y Roux, J.C. 1999. *Périmètres de protection des captages d' eau souterraine destinée a la consommation humaine*. Éditions du BRGM. Orleans, 334 pp.
- Laws, A.T. 2001. Groundwater protection in western Australia. *Protecting groundwater*. Birmingham, U.K. Environment Agency NC/00/10/Conference Proceedings. 105-118.
- López-Camacho y Camacho, B. 1976. *Aplicación de métodos estadísticos en la planificación de recursos hidráulicos subterráneos. Aplicación al área metropolitana de Madrid*. Tesis doctorales. ETSICCP. Madrid.
- López-Camacho y Camacho, B. 1995. Las aguas subterráneas en los abastecimientos españoles: gestión, protección y perspectivas. En: *Las aguas subterráneas en la Ley de aguas Española. Un decenio de experiencia*. AIHGE, Madrid, 109-131.
- López-Camacho y Camacho, B. y Martínez Alfaro, P.E. 1979. Análisis estadístico del comportamiento de acuíferos muy heterogéneos. Aplicación a la identificación de parámetros. *II Simposio Nacional de Hidrogeología*, Pamplona, 37-56.
- López Geta, J.A., Navarrete Martínez, P., Moreno Merino, L., Ruiz Hernández, J.M. Ballester Rodríguez, A., del Barrio Beato, V. 1996 a. *Calidad química y contaminación de las aguas subterráneas en España. Periodo 1982-1993. Cuenca del Duero*. IGME. http://www.igme.es/internet/web_aguas/igme/homec.htm
- López Geta, J.A., Martínez Navarrete, C.; Moreno Merino, L., Navarrete Martínez, P. y Rodríguez Caro, J.B. 1996 b. *Guía para la elaboración de perímetros de protección de las aguas minerales y termales*. IGME, Madrid, 104 pp.
- López Geta, J.A.; Fornés, J.M.; Ramos, G. y Villarroya, F. 2001. *Las aguas subterráneas. Un recurso natural del subsuelo*. IGME, Fundación Marcelino Botín. Madrid. 94 pp.
- Madsen, B. 1994. Protection of groundwater resources in Denmark. En: *Seminario sobre perímetros de protección de captaciones de agua subterránea: Experiencia en países europeos*, Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona.

- Madsen, B., Henriksen, H.J. y Knudby, C. 1998. The national water resource model developed for the assessment of the distribution and protection of the Danish groundwater resources. En: Brahma et al. *IAH/AIH joint conference. Gambling with groundwater – physical, chemical and biological aspects of aquifer stream relations*, 219-226.
- Mangin, A. 1975. *Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques*. Thèse de Doctorat d'Etat. Dijon. 124 pp. Ann. Speleo., 1974 (3), 283 – 332; 29 (4), 495 –601; 30 (1), 21 – 124.
- Martínez Alfaro, P.E. 1979. Análisis estadístico de los materiales del Terciario detrítico de la fosa del Tajo. *II Simposio Nacional de Hidrogeología*. Pamplona. 287-307.
- Martínez Alfaro, P.E. 1980. Un primer análisis de la permeabilidad y el grado de anisotropía de los materiales detríticos de la fosa del Tajo. *Boletín Geológico y Minero*, T XCI-V, 645-648.
- Martínez Alfaro, P.E.; Montero González, E.; Martínez Navarrete, C. y Vázquez Valenzuela, L. 1986. *Sobre explotación de las aguas subterráneas en la zona de la Moraña*. IBERSAT. Junta de Castilla y León. Consejería de Industria, Energía y Trabajo.
- Martínez Navarrete, C.; López Geta, J.A. y Rodríguez Hernández, L. 1997. *Metodología para la delimitación de perímetros de protección en captaciones destinadas al abastecimiento público y criterios para establecer un orden de prioridad en su implantación. Aplicación al caso de los municipios de la provincia de Alicante*. IGME. Diputación de Alicante, 86 pp.
- Martínez Navarrete, C. y Fernández Sánchez, J.A. 1999. *Informe preliminar sobre posible afección a las captaciones de agua subterránea para abastecimiento a Villacastín por la instalación de dos granjas porcinas*. IGME.
- Martínez Navarrete, C. y Fernández Sánchez, J.A. 2000. *Estudio para la delimitación de perímetros de protección a las captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín (Segovia)*. IGME. Informe H8-01-00.
- Martínez Navarrete, C. y López Geta, J.A. 2001. Perímetros de protección de aguas subterráneas y del medio ambiente relacionado. En: Iribar, V.; Grima, J. y Sánchez Vila (ed.), *Las aguas subterráneas en el Plan Hidrológico Nacional*. Ediciones Mundiprensa, Madrid, 89 - 97.
- Martínez Navarrete, C. y García García, Á. 2001 a. Metodología para la protección de captaciones de abastecimiento en materiales detríticos. Integración de métodos analíticos, modelos matemáticos y criterios hidrogeológicos. *VII Simposio de Hidrogeología*, Murcia, Tomo XXIII, Hidrogeología y recursos hidráulicos, 137 – 149.
- Martínez Navarrete, C. y García García, Á. 2001 b. Methodology for wellhead protection areas implementation. Application to urban water supply catchments in carbonated and detritic formations in Spain. *Protecting groundwater*. Birmingham, U.K. Environment Agency NC/00/10/Conference Proceedings, 198-209.
- Martínez Navarrete, C. 2002. *Propuesta metodológica para la delimitación de perímetros de protección en acuíferos detríticos y su implementación en el territorio español. Aplicación a las captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín (Segovia)*. Tesis Doctoral.
- Matthes, G. 1985. *Der stofftransport in grundwasser und die wasserschutzzebietsrichtlinie. W 101*. Umweltbundesamtes. Berichte 7/85. Erich Schmidt. Verlag. Berlín.
- Matthes, G.; Pekdeger, A. y Schroter, J. 1988. Persistence and transport of bacteria and viruses in groundwater. A conceptual evaluation. *J. Contaminant Hydrology*, 12 (1988), 171 –188.
- McDonald, M.C. y Harbaugh, A.W. 1988. *A modular three-dimensional finite difference groundwaterflow model*. United States Geological Survey Techniques of water resources investigation, 6, chap A.1, 586 pp. http://water.usgs.gov/pubs/twri/twri6a1/pdf/TWRI_6-A1.pdf
- Ministère de la santé, de la famille et des personnes handicapées. 1998. *Qualité des eaux d'alimentation 1993-1994-1995. Qualité des eaux de surface utilisées pour produire des eaux d'alimentation. Qualité des eaux d'alimentation des unités de distribution desservant au moins 5.000 habitants*. http://www.sante.gouv.fr/html/actu/eaux_alim/36_eaux.htm
- Ministerio de Medio Ambiente (MIMAM). 2000. *Libro Blanco del Agua en España*. MIMAM, Madrid, 637 pp.
- Ministerio de Medio Ambiente (MIMAM). 2002 a. *Documento base sobre los procedimientos a seguir en la implantación de los perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas para abastecimiento*. Madrid. 342 pp.
- Ministerio de Medio Ambiente (MIMAM) 2002 b. *Guía para la delimitación e implantación de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas para abastecimiento público*. Madrid. 112 pp.
- Ministry of Housing, Spatial planning and Environment. 1944. *Groundwater protection areas in the Netherlands. A policy evaluation*. La Haya. 20 pp.
- Moreno Merino, L.; Martínez Navarrete, C.; López Geta, J.A. y Navarrete Martínez, P. 1991. *Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas*. IGME, Madrid, 289 pp. http://www.igme.es/internet/web_aguas/igme/homec.htm
- Morris, B.L. 1994. Providing the tools: The British experience in groundwater protection zoning. *2º Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea*. Santiago de Chile.
- Muguerza Perelló, I. 2001. *Estudio hidrogeológico de la Unidad Hidrogeológica kárstica de Albiztur (Guipúzcoa)*. *Establecimiento de una metodología para la evaluación y cartografía de la vulnerabilidad intrínseca en acuíferos kársticos*. Tesis Doctoral.

- Office Fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP). 1998. *Guide pratique. Cartographie de la vulnérabilité en régions karstiques (EPIK)*. Berna. 57 pp. <http://guf.unibe.ch/dokugs2/CartographieKarstiques.pdf>? Publications from www.WATERandFISHERIES.ch
- Office Fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP). 2002. *Guide pratique. Delimitation des zones de protection des eaux souterraines en milieu fissuré. Version provisoire du 28 mars 2002*. Berna. 83 pp. <http://guf.unibe.ch/dokugs2/DISCO.pdf>.
- Pérez González, A., Ruiz García, C.; Bellido Mulas, F.; Fuster, J.M.; Martín Serrano, A.; Navidad, M.; Olmo Sanz, A.; Pablo Macía, J.G. y Villaseca, C. 1990. *Mapa Geológico de España, E. 1:50000. Hoja 17-20, El Espinar*. Mapa y Memoria. IGME.
- Pollock, D.W. 1994. User's guide for Modpath, Modpathplot, V-3.0. A particle tracking post-processing package for MODFLOW, the U.S. Geological Survey finite difference groundwater flow model. U.S. Geological Survey. Open file report 94-464, 234 pp.
- Portero, J.M. y Aznar, J.M. 1984. Evolución morfotectónica y sedimentación terciarias en el Sistema Central y cuencas limítrofes (Duero y Tajo). *I Congreso Español de Geología*, 3, 253-263.
- Priest, S.D. y Hudson, J.A. 1976 Discontinuity spacings and rock mass geometry. *Intl. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abs.*, 13, 135-148.
- Pulido Bosch, A. 2001. Investigación y exploración de acuíferos kársticos. *Boletín Geológico y Minero*, vol. 112 núm. especial, 65 - 76.
- Quinlan, J. F., 1989. *Groundwater monitoring in karst terranes: Recommended protocols and implicit assumptions*. USEPA Environmental Monitoring Laboratory. Las Vegas. EPA-600/X-89/050. 79 pp. www.epa.gov/swe-rust1/cat/gwkarst.pdf
- Rayne, T.W.; Bradbury, K.R. y Muldoon, M.A. 2001. Delineation of capture zones for municipal wells in fractured dolomite, Sturgeon Bay, Wisconsin, USA. *Hydrogeology Journal*, 9 (5), 432-450.
- Rehse, W. 1977. *Abbaubare organische Verunreinigungen pathogene Keime und Viren*. Rapport nº 40177. Eidgenössisches amt für umweltschutz. Berna.
- Reilly, T.E. 2001. *System and boundary conceptualization in groundwater flow simulation*. Techniques of water resources investigations of the United States Geological Survey Book 3. Applications of hydraulics, chapter B8, 29 pp. http://water.usgs.gov/pubs/twri/twri-3_B8/pdf/twri_3b8.pdf
- Robinson, P.C. 1984. Numerical calculations of critical densities for lines and planes. *J. Physics A – Math. Gen.*, 17, No. 4. 2823-2830.
- Robinson, J.N. y Barker, J.A. 2000. *A fractured/fissured approach to GPZs*. Environment Agency R&D Project Record W6/020/1.
- Robinson, J.N. y Barker, J.A. 2001. Probability-based protection zones in fractured aquifers. Implications for land use planners. *Protecting groundwater*. Birmingham. Conference Proceedings, 221-231.
- Sánchez González, A. 1994. Perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas: Situación legal en España. En: *Seminario sobre perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas: Experiencia en países europeos*, Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea, Barcelona, diciembre 1994.
- Sánchez González, A. 2000. Perímetros de protección de las captaciones de agua potable. En: Fernández Rubio, R.; Fernández Sánchez, J.A.; López-Camacho y Camacho, B. y López Geta, J.A. (ed.), *Aguas subterráneas y abastecimiento urbano*. IGME, Madrid, 245-249.
- Sautier, J.L. 1984. *Guide du Service Fédéral d'Améliorations forcées*.
- Servicio Geológico de Obras Públicas (SGOP). 1980. *Las aguas subterráneas en la provincia de Segovia*. SGOP.
- Schuster, E. T. y White, W. B. 1971. Seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs: a possible means for characterizing carbonate aquifers. *Journal of Hydrology*, 14, 93-128.
- Smith, E.D. y Vaughan, N.D. 1985. Experience with aquifer testing and analysis in fractured low permeability sedimentary rocks exhibiting non radial pumping response. *Proceedings, Hydrogeology of rocks of low permeability*. International Association of Hydrogeologists, 17th Congress. Tucson, Arizona. Memoirs, v.XVII, 137 -149.
- Sondagua. 1993. *Informe sobre el estudio hidrogeológico en el término municipal de Villacastín (Segovia)*. 27 pp.
- Soulios, G. 1984. Infiltration efficace dans le karst hellénique. *J. Hydro.*, 75, 343-356.
- Sorensen, H.R. y Refsgaard, A. 2001. Groundwater protection based on interpreted dynamic flow and particle tracking. *Protecting groundwater*. Birmingham, U.K. Environment Agency NC/00/10/Conference Proceedings, 210-220.
- Southern Water Authority. 1985. *Aquifer protection policy*. Worthing, West Sussex, England, Guildbourne House, 47 pp.
- Theis, C.V. 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *American Geophysical Union Transactions*, 16, 519-524.
- Todd, D.K. 1980. *Groundwater hydrology*. New York, John Wiley Sons, 535 pp.
- Tribunal Constitucional. 1988. *Sentencia 227/1988, de 29 de noviembre, en recursos planteados en relación con la Ley 29/1985, de Aguas y conflictos positivos de com-*

- petencia en relación con el Real Decreto 849/1986 que aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, la Orden de 23-12-1986 sobre vertidos de aguas residuales, y el Real Decreto 650/1987 regulador de los Organismos de cuenca. Suplemento del BOE de 23 de diciembre de 1988.
- Umweltbundesamt .2002. Water – Protection and Precaution. German Water Regulations. <http://www.umweltbundesamt.de/water/themen/gwr.htm>
- Unión Europea. 2000. 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. DO L 327 de 22-12-2000. http://www.mma.es/normativa/jurispdoce/2000122327_1.pdf
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), 1987. Guidelines for delineation of wellhead protection areas. Technical Report EPA-440/6-87-010. Environmental Protection Agency, Office of Water. Washington. <http://www.epa.gov/cgi-bin/claritgw?op-Display&document=clserv:OAR:0668;&rank=4&template=epa>
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), 1991 a. Delineation of wellhead protection areas in fractured rocks. Technical Report EPA-570/9-91-009. Environmental Protection Agency, Office of Water. Washington. 144 pp. <http://www.epa.gov/cgi-bin/claritgw?op-Display&document=clserv:OSWER:2511;&rank=4&template=epa>
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), 1991 b. Wellhead protection strategies for confined-aquifer settings. Technical Report EPA-570/9-91-008. Environmental Protection Agency, Office of Water. Washington. 168 pp.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), 1993 a. Guidelines for delineation of wellhead protection areas. Technical Report EPA-440/5-93-001. Environmental Protection Agency, Office of water, Office of groundwater protection. Washington, D.C.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), 1993 b. Wellhead protection: a guide for small communities. Technical Report EPA-625/R-93-002. Environmental Protection Agency, Office of water, Office of research and development. Washington D.C. 144 pp.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), 2000. Working with WhAEM 2000. Source Water Assessment for a Glacial Outwash Wellfield, Vincennes, Indiana. Technical Report EPA-600/R-00/022. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington D.C. <http://www.epa.gov/ceam-publ/WINDOWS/WHAEM/WhAEM2000.pdf>
- United States Environmental Protection Agency, USEPA. 2003 a. Ground Water & Drinking Water. The Safe Drinking Water Act. <http://www.epa.gov/safewater/sdwa/sdwa.html#theact>
- United States Environmental Protection Agency, USEPA. 2003 b. Laws & Regulations. Major Environmental laws. <http://www.epa.gov/epahome/laws.htm>
- United States Geological Survey (USGS). 1997. Modeling groundwater flow with MODFLOW and related programs. USGS. Fact sheet, FS-121-97. <http://www.usgs.gov/pubs/FS/FS-121-97/fs-121-97.pdf>
- United States Geological Survey (USGS). 1999. Tracing and dating young groundwater. USGS. Fact sheet, FS-134-99. 4 pp. <http://water.usgs.gov/pubs/FS/FS-134-99/pdf/fs-134-99.pdf>
- United States Geological Survey. USGS. 2002. Estimated use of water in the United States in 1995. USGS. 71 pp. Denver, Colorado. <http://water.usgs.gov/watuse/pdf1995/html>
- Van Put, S. 2001. Some administrative, policy and juridical aspects in relation to groundwater protection (groundwater used as a drinking-water source) in the Netherlands En: United Nations Economic Commission for Europe, Workshop on the protection of groundwaters used as a source of drinking water supply. Budapest <http://www.unece.org/env/water/meetings/groundwater01/netherlands.pdf>
- Van Waegeningh, H.G. 1981. A proposal for the dimensions of protection areas. *The science of the total environment*, 21, 397 - 403.
- Vías, J.M.; Andreo, B.; Perles, M.J. y Carrasco, F. 2001. Application of several methods of contamination vulnerability mapping in a carbonate aquifer from south Spain. *Proceedings of the 3rd International Conference on Future Groundwaters at Risk – FGG'01*. Ribeiro, L. (ed.). Lisboa. 113 - 121.
- Vías, J.M.; Andreo, B.; Perles, M.J.; Carrasco, F.; Vadillo, I. y Jiménez, P. 2002. Preliminary proposal of a method for contamination vulnerability mapping in carbonate aquifers. En Carrasco, F.; Durán, J.J. y Andreo, B. (eds.). *Karst and environment*, 75 - 83. Fundación de la Cueva de Nerja.
- Villanueva Martínez, M. e Iglesias López, A. 1984. Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo. IGME, Madrid, 426 pp. http://www.igme.es/internet/web_aguas/igme/homec.htm
- Villaseca, C. 1985. Los granitos de la Sierra de Guadarrama. *Revista Real Academia de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 79,4, 573-587.
- Von Gunten, U. 2000. Ground water: from drinking water reservoir to a water body. EAWAG news 49e. Ground Water Research in Practice. http://www.eawag.ch/publications/eawagnews/www_en_49/en49e_pdf/en49e_gunten.pdf
- Vorreyer, C. 1998. Delineating surface source water protection areas in Germany. *Source water assessment and protection* 98, Dallas, Proceedings, 61-64.

- Vrba, J. y Zaporozec, A. 1994. *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*. Asociación Internacional de Hidrogeólogos. Verlag Heinz Heise, 16, 131 pp.
- Water and Rivers Commission. 1999. *Esperance Water Reserve. Water source protection plan. Esperance town water supply*. Water resource protection series. Report WRP22. Water and Rivers Commission, 31 pp. <http://www.wrc.wa.gov.au/protect/watersupply/wspp.htm>
- Water and Rivers Commission 2000 a. *Water protection legislation*. <http://www.wrc.wa.gov.au/protect/water-supply/legislation.htm>
- Water and Rivers Commission 2000 b. *Proclaiming protection areas*. <http://www.wrc.wa.gov.au/protect/water-supply/proclaiming.htm>
- Water and Rivers Commission 2000 c. *Water source protection plans*. <http://www.wrc.wa.gov.au/protect/watersupply/WSPP.htm>
- Waterloo Hydrogeologic. 1995. Visual Modflow v 2.7. User's manual. Waterloo Hydrogeologic Inc. Waterloo, 313 pp.
- Wen-Hsing, C. y Kinzelbach, W. 1998. *Processing Modflow. A simulation system for modeling groundwater and pollution*, User's manual, 325 pp.
- WOB, 2000. *Source water protection. Ten years after... protection still is necessary*. <http://www.horizon.nl/~abannink/artikel3.html>
- Wyssling, L. 1979. Eine neue formel zur Berechnung der Zuflussdauer des Grundwassers zu einem Grundwasser pumpwerk. *Eclogae geol. Helv.* 72, 401-406. Basel.
- Zaporozec, A. 1985. *Groundwater pollution potential of Bannan County, Wisconsin*. Wisconsin Geological and Natural History Survey. Madison, Wisconsin.
- Zekster, I.S. 2001. Principals of regional assessing and mapping of groundwater vulnerability. *Proceedings of the 3rd International Conference on Future Groundwaters at Risk – FRG'01. Proceedings. Theme 1.*

3ª PARTE

ANEXO I

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN REQUERIDA PARA DEFINIR LA PROTECCIÓN A ESTABLECER EN LAS CAPTACIONES DE ABASTECIMIENTO URBANO. EJEMPLO DE SU APLICACIÓN EN UN ACUÍFERO DETRÍTICO EN LA LOCALIDAD DE VILLACASTÍN (SEGOVIA)

El análisis efectuado comprende los siguientes aspectos:

1. Situación geográfica

La localidad de Villacastín (Segovia) está ubicada en el extremo sudeste de la cuenca del río Duero, en el noroeste de la península (Figura 4).

2. Marco geológico

La zona existente en el entorno del municipio de Villacastín, seleccionado para la delimitación de perímetros de protección de sus captaciones de abastecimiento, está ubicada en el extremo sudeste de la Cuenca del Duero, en una fosa tectónica que paralela a la sierra de Guadarrama y Somosierra se extiende en dirección SO-NE. Sus límites sur y este lo forman materiales plutónicos y metamórficos del Sistema Central. El norte lo constituyen los materiales paleozoicos, triásicos, jurásicos y cretácicos que forman la Sierra de Pradales. Por último un macizo alargado constituido por afloramientos de rocas plutónicas y metamórficas con la misma dirección del Sistema Central (Figura 5) constituye el límite oeste y noroeste.

Entre estos últimos afloramientos y el Sistema Central hay una fosa tectónica de unos 30 km de ancho rellena de materiales cretácicos, terciarios y cuaternarios.

Sus características principales (Alonso, 1981; Bellido *et al.*, 1981; Portero y Aznar, 1984; Villaseca, 1985;

Capote *et al.*, 1982; Capote, 1985; Martínez Navarrete, 2002) son:

2.1. Litoestratigrafía

Las características generales del análisis litoestratigráfico, en el área previamente indicada se pueden resumir como:

A.- Paleozoico

Está constituido fundamentalmente por granitos y gneises y en menor proporción por pizarras y cuarcitas.

El granito está atravesado por numerosos diques de pórfido, aplitas y pegmatitas, así como diques de cuarzo, y en general presenta una red de pequeñas fracturas. Las pizarras se presentan en paquetes de poco espesor (0,5 m a 3 m) con distinto grado de metamorfismo y están fuertemente tectonizadas.

B.- Mesozoico

Sobre el Paleozoico y discordante con él se dispone el Mesozoico, que aflora a lo largo de toda la fosa tectónica, delimitando sus bordes sur y norte, así como en algunos afloramientos cretácicos en las proximidades de los ríos Eresma y Pirón. En el resto de la fosa está recubierto por materiales terciarios.

B.1.- Triásico

Sobre el Paleozoico se apoyan materiales triásicos, en la zona de la Sierra de Pradales, con facies germánica. El Buntsandstein lo componen una serie de conglomerados y areniscas con abundante estratificación cruzada. En las proximidades de Torreadrada, en la Sierra de Pradales, afloran unas calizas compactas en bancos de 1 m a 0,5 m que probablemente correspondan al Muschelkalk.

Por último el Keuper está representado por areniscas verdes y calizas margosas, alternantes con unas margas abigarradas.

La potencia total del Trías es de unos 150 m.

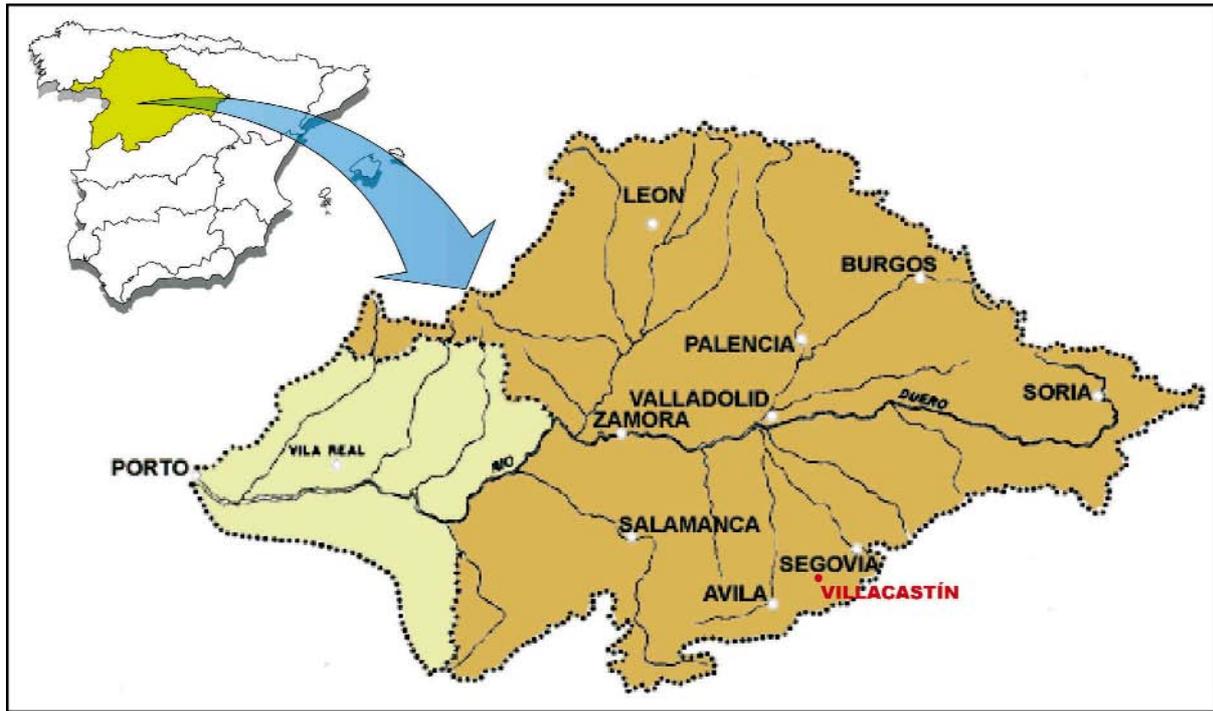


Figura 4: Situación geográfica de la localidad de Villacastín (Segovia) en la cuenca del río Duero.

B.2.- Jurásico

Los materiales jurásicos, concordantes con la serie triásica, están representados por unas calizas dolomíticas muy irregularmente erosionadas.

Esta serie jurásica constituye un gran anticlinal que se encuentra fallado en su núcleo, presentando buzamientos suaves hacia el norte y noroeste introduciéndose bajo materiales terciarios en las inmediaciones del denominado páramo del Duratón. La potencia total del Jurásico se estima en unos 100 a 120 metros.

B.3.- Cretácico

En el Cretácico, discordante sobre las demás formaciones, paleozoicas, triásicas o jurásicas, se han diferenciado en función de la litología diversos tramos, todos ellos concordantes entre sí con vergencia hacia el interior de la cubeta, que descritos de muro a techo son:

- Facies Utrillas: Alternancia de arcillas versicolores y arenas de colores blanco a ocre muy heterométricas con frecuentes cambios laterales. El conjunto tiene una potencia variable entre 20 y 70 metros.
- Tramo margo-calizo-dolomítico y de materiales areniscosos: Sobre el tramo anterior se encuentran unas margas de colores marrones y verdosos, con

algunos niveles de calizas margosas intercalados, terminando en un paquete calizo-dolomítico. Sobre ellas aparece una formación detrítica constituida por materiales areniscosos, con gravillas de color pardo.

Los espesores son muy variables. La formación areniscosa tiene de 3 a 5 metros de potencia en el Norte (Sepúlveda), incrementando su espesor hacia el sudeste alcanzando en la localidad de Madrona (ubicada a unos 7 kilómetros al sudoeste de Segovia capital) los 20 a 30 metros. Con la formación margo-calizo-dolomítica sucede al revés, es decir sus mayores espesores (30 a 40 metros) se producen en el norte.

- Tramo dolomítico: Serie de dolomías frecuentemente karstificadas en bancos potentes (30 a 40 m). En el río Riaza, al norte de Somosierra, en el extremo nordeste, la serie, que tiene alguna intercalación margosa, alcanza espesores de 150 metros hasta el recubrimiento por el Terciario. Hacia el sur los espesores son menores, llegando a tener 40 a 50 m en Madrona.
- Tramo margo-dolomítico: Conjunto de calizas blanquecinas y dolomías margosas y bancos de margas amarillentas compactas, más o menos arcillosas. El tramo tiene una potencia aproximada de unos 50 m y localmente los niveles margo-dolomíticos contienen yesos. Únicamente se presentan en la zona norte.

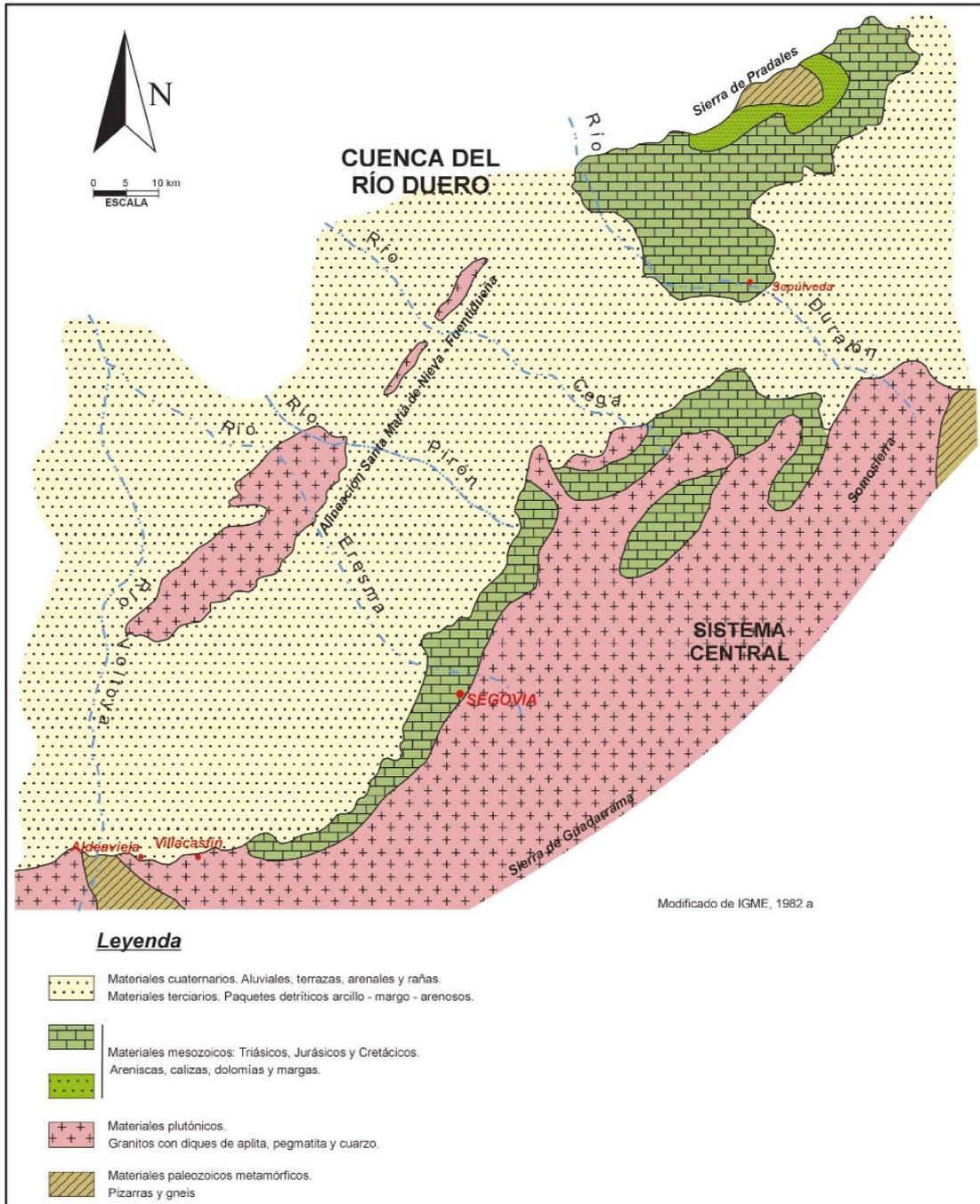


Figura 5: Marco Geológico.

C.- Terciario

Son materiales que se han depositado en régimen continental con sedimentación fluvial, discordantes sobre las anteriores formaciones y cubriendo indistintamente a cualquiera de ellas.

Los materiales terciarios del borde de la formación están constituidos mayoritariamente por una serie de brechas de cantos calizos empastados en un cemento calcáreo. Esta brecha caliza sufre variaciones en cuanto a su composición mediante el aporte del material detrítico del Albiense, Buntsandstein, y

Paleozoico, originando una brecha poligénica calizo-silíceica que engloba cantos de pizarra y gneis entre otros.

Estos materiales son los que posteriormente, por simple cambio lateral de facies, pasan a formar los niveles típicos del Mioceno Superior Castellano.

La potencia aproximada que llegan a tener estos sedimentos es del orden de 30 m.

Al aumentar la distancia respecto a los afloramientos Mesozoicos aparece un terciario formado por poten-

tes paquetes arcillo-margo-arenosos de distintos colores, así como niveles de conglomerados escasamente cementados y niveles de arena de potencia variable. También existen, hacia el interior de la cubeta niveles poco potentes de calizas margosas de génesis lagunar.

La potencia de este Terciario varía según las zonas de acuerdo con la disposición del zócalo. Existen sondeos en los que la potencia supera los 400 m, como sucede al norte de la localidad de Aldeavieja (ubicada siete kilómetros al oeste de Villacastín). Mientras que en algunas zonas en las que el zócalo está próximo a la superficie, como sucede al norte de Segovia capital, las potencias apenas alcanzan los 50 m.

Los niveles de arenas que constituyen las formaciones más permeables, están dispuestos en general en forma de lentejones de dimensiones variables, tanto horizontal como verticalmente.

D.- Cuaternario

Está representado por depósitos del Pleistoceno y Holoceno constituidos básicamente por aluviales, terrazas, arenales y rañas.

La naturaleza de los aluviales está en función del aporte producido desde el área madre y su distancia. Están constituidos principalmente por arenas y limos arcillosos con gravas y cantos de litologías bastante heterogéneas con un espesor que no suele superar los 2 metros.

Aunque con desigual entidad, todos los cursos fluviales tienen un sistema de terrazas asociado. El gran desarrollo de terrazas al norte de Villacastín contrasta con la escasa entidad que tiene actualmente el Arroyo de los Prados al que se asocian. Constituidas por cantos rodados y bloques de granito, gneis y cuarzo con matriz arcósica tiene un aspecto litoestratigráfico muy semejante al del sustrato terciario con el que es muy fácil de confundir.

Los arenales constituyen extensos depósitos de arenas de origen eólico, que recubren a las formaciones arcillo-arenosas del Mioceno. Su espesor oscila entre 2 y 20 m.

Por último las rañas son depósitos de cantos y bolos casi exclusivamente de cuarcita con matriz arcillosa arenosa, rojiza. Morfológicamente presentan superficies planas y ligeramente inclinadas. Pueden llegar a tener una potencia de 15 m.

2.2. Tectónica

La tectónica de la zona de estudio se encuentra íntimamente relacionada con la del Sistema Central. Al

final del Oligoceno se produce un abombamiento del zócalo y cobertera mesozoica cuyo eje coincide sensiblemente con la divisoria hidrológica actual entre el Tajo y el Duero, con lo que la cobertera adquiere un ligero buzamiento hacia el centro de las cuencas respectivas. Posteriormente se producen fallas longitudinales que separan ambas mesetas y levantan el bloque central, donde actúa la erosión y produce su desmantelamiento.

La alineación existente al noroeste de la fosa tectónica que corre en dirección nordeste – sudoeste a una distancia aproximada de 15 a 25 km de la Sierra del Guadarrama descrita en el apartado 6.1.2.1. tiene importancia desde el punto de vista tectónico y está emergida probablemente desde antes del Mioceno y rejuvenecida posteriormente.

A lo largo de esta alineación pueden descubrirse diversos movimientos en el transcurso del tiempo. El primer movimiento importante de ascenso de la alineación Santa María de Nieva-Fuentidueña es postcretácico, constituyéndose como un umbral que aísla una prefosa miocena de la gran fosa terciaria. El Cretácico queda adosado al borde sudoeste del zócalo, amoldándose al movimiento.

La sedimentación del Mioceno detrítico adquiere gran importancia y desarrollo, haciéndose transgresiva, tanto sobre los materiales precretácicos como sobre los mesozoicos.

Posteriormente a la sedimentación miocena, vuelve a rejuvenecerse el movimiento ascendente, produciéndose al mismo tiempo una fuerte denudación de los materiales, tanto miocenos como anteriores, y así todos los afloramientos forman, en general, la topografía suave uniforme de la meseta.

3. Socioeconomía

3.1. Población

El municipio de Villacastín tiene una población de 1.514 personas según los datos del censo del Instituto Nacional de Estadística (INE) correspondientes al año 2001 (INE, 2002). Según información del Ayuntamiento esta población prácticamente se duplica en la temporada estival.

La evolución de la población de Villacastín se indica en la tabla 9.

La población creció fuertemente desde el año 1900 (en que había 1.416 habitantes) hasta 1970, año en que se alcanzó un máximo histórico de 1.734 habitantes.

Tabla 9: Evolución de la población de derecho y de hecho en Villacastín (Segovia).

AÑO	POBLACIÓN DE DERECHO (Hab)	POBLACIÓN DE HECHO (Hab)
1900	---	1.416
1910	---	1.467
1920	---	1.347
1930	---	1.394
1940	---	1.466
1950	---	1.577
1960	---	1.608
1970	---	1.734
1981	---	1.579
1985	1.611	---
1986	1.658	---
1987	1.667	---
1988	1.635	---
1989	1.643	---
1990	1.631	---
1991	1.617	1.600
1992	1.627	
1993	1.610	
1994	1.568	
1995	1.571	
1996	1.540	
1997	---	
1998	1.538	
1999	1.537	
2000	1.506	
2001	1.514	

En la década de los setenta se produjo un acusado descenso demográfico llegando a 1.579 habitantes en el año 1981, incrementándose posteriormente hasta alcanzar 1.667 habitantes en el año 1987.

Desde el año 1987 hasta el año 2000 la población ha decrecido un 9,6 % alcanzándose los 1.506 hab en el año 2000, observándose en el último año un ligero incremento del 0,5 % de la población.

Esta tendencia a la baja se produce en la mayoría de los municipios de la provincia, cuya población tiende a concentrarse en Segovia capital, que ha duplicado sus habitantes de derecho desde 1950 hasta la actualidad.

Con estos datos, y de mantenerse un ritmo de evolución semejante, no cabe esperar incrementos de la población de derecho de Villacastín en los próximos años, si bien podría existir un incremento de la población que acude al municipio en la temporada estival, difícil de cuantificar.

3.2. Actividad socioeconómica del municipio

La actividad socioeconómica del municipio de Villacastín se centra en la agricultura de secano de cereales (trigo y cebada), en una amplia ganadería, con aproximadamente 40 explotaciones, intensivas y extensivas, repartidas por el término municipal, limitándose la industria a dos fábricas (de embutidos y de harina), a un aserradero y a diversas canteras, si bien la importancia de estas se ha visto reducida notablemente en los últimos años.

La construcción presenta un crecimiento notable ligado en gran medida a la rehabilitación de vivienda y la construcción de nuevas casas empleadas básicamente en la temporada estival.

El sector de servicios, con una amplia tradición en Villacastín como cruce de caminos, cuenta con diversos hostales y restaurantes, ubicados junto a las carreteras, si bien está en declive desde que la construcción de la autopista A-6 evitó el tránsito por la población.

4. Marco hidrogeológico

La zona estudiada está ubicada en el borde sudeste de la cuenca del Duero en la Unidad Hidrogeológica 02.17 (DGOH e IGME, 1988) Región de los Arenales (Figura 6 y Figura 7).

Esta Unidad Hidrogeológica, con una extensión de 7.754 km², abarca parte de las provincias de Salamanca, Valladolid, Segovia, Ávila y Zamora.

En esta unidad quedan representados dos tipos de acuíferos detríticos (IGME, 1979; IGME, 1980; SGOP, 1980; IGME, 1982 b; Martínez Navarrete, 2002):

Acuíferos superficiales: Se encuentran en el sector comprendido entre Tormo, Cuéllar, Nava de Arévalo y Peñaranda de Bracamonte. Se trata de extensos depósitos de arenas y limos cuaternarios o pliocuaternarios con un espesor medio de 15 a 20 metros. Forman acuíferos libres heterogéneos, con una transmisividad que oscila entre 10 y 100 m²/día aportando caudales entre 1 a 20 L/s con un rápido agotamiento (6 a 8 horas), sin gran interés para su explotación, si bien constituyen el principal elemento regulador de los acuíferos profundos a los que recargan.

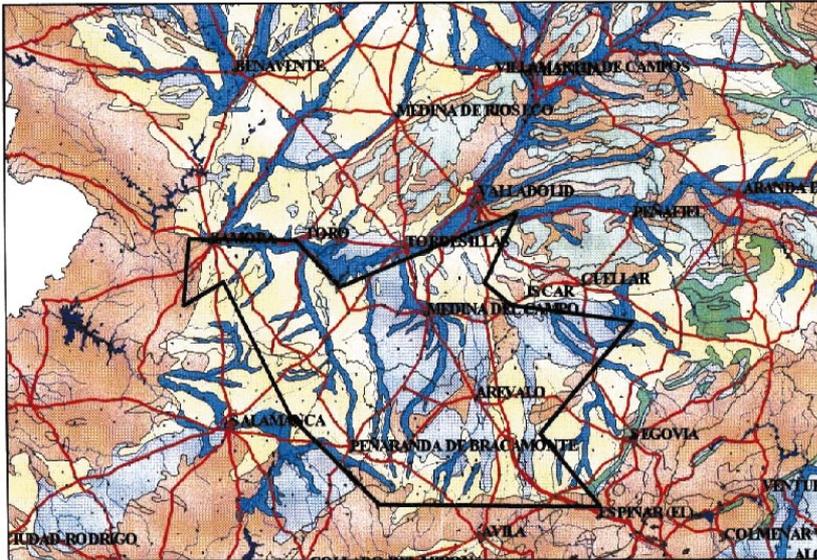
Acuíferos profundos: Formados por capas lenticulares de materiales detríticos (arenas y gravas) en una matriz arcillo-limo-arenosa semipermeable. Los límites de la Región de los Arenales (al norte el Duero y la zona de los Páramos, al sur el Sistema Central, al



MINISTERIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
INSTITUTO TECNOLÓGICO
GEOMINERO DE ESPAÑA



UNIDAD HIDROGEOLÓGICA 02.17 REGIÓN DE LOS ARENALES
CUENCA HIDROGRÁFICA 02 DUERO
SUPERFICIE (km²): Poligonal 7754.43 Aflorante 7632



FORMACIONES DETRÍTICAS PERMEABLES EN GENERAL NO CONSOLIDADAS

- Acuíferos generalmente extensos, muy permeables y productivos.
- Acuíferos extensos, discontinuos y locales de permeabilidad y producción moderadas (No excluyen la existencia en profundidad de otros acuíferos cautivos y más productivos)

FORMACIONES CARBONATADAS PERMEABLES POR FISURACIÓN-KARSTIFICACIÓN

- Acuíferos generalmente extensos, muy permeables y productivos.
- Acuíferos extensos, discontinuos y locales de permeabilidad y producción moderadas (No excluyen la existencia en profundidad de otros acuíferos cautivos y más productivos)

FORMACIONES PERMEABLES EN TERRENOS VOLCÁNICOS

- Acuíferos muy permeables y productivos.
- Acuíferos de permeabilidad y producción moderadas.
- Formaciones permeables con acuíferos colgados y/o en contacto con otras formaciones.

FORMACIONES DE BAJA PERMEABILIDAD O IMPERMEABLES

- Formaciones generalmente extensas, en general de baja permeabilidad, que pueden albergar en profundidad acuíferos de mayor permeabilidad y productividad, incluso de interés regional.
- Formaciones generalmente impermeables o de baja permeabilidad, que pueden albergar a acuíferos superficiales por alteración o fisuración; en general poco extensos y de baja productividad, aunque pueden tener localmente un gran interés. Los modernos pueden recubrir en ciertos casos a acuíferos cautivos productivos.

Fuente: IGME 2000

Figura 6: Unidad Hidrogeológica 02.17. Región de los Arenales.

oeste los granitos de tierras de Sayago y la región del Tormes y al este la unidad de Segovia) se comportan como si fueran impermeables a excepción del río Duero que es una vía de drenaje. Son acuíferos heterogéneos y anisótropos confinados o semiconfinados según las zonas. Los caudales extraídos son muy variables oscilando entre 10 y 30 L/s y los caudales específicos son del orden de 1 L/s/m.

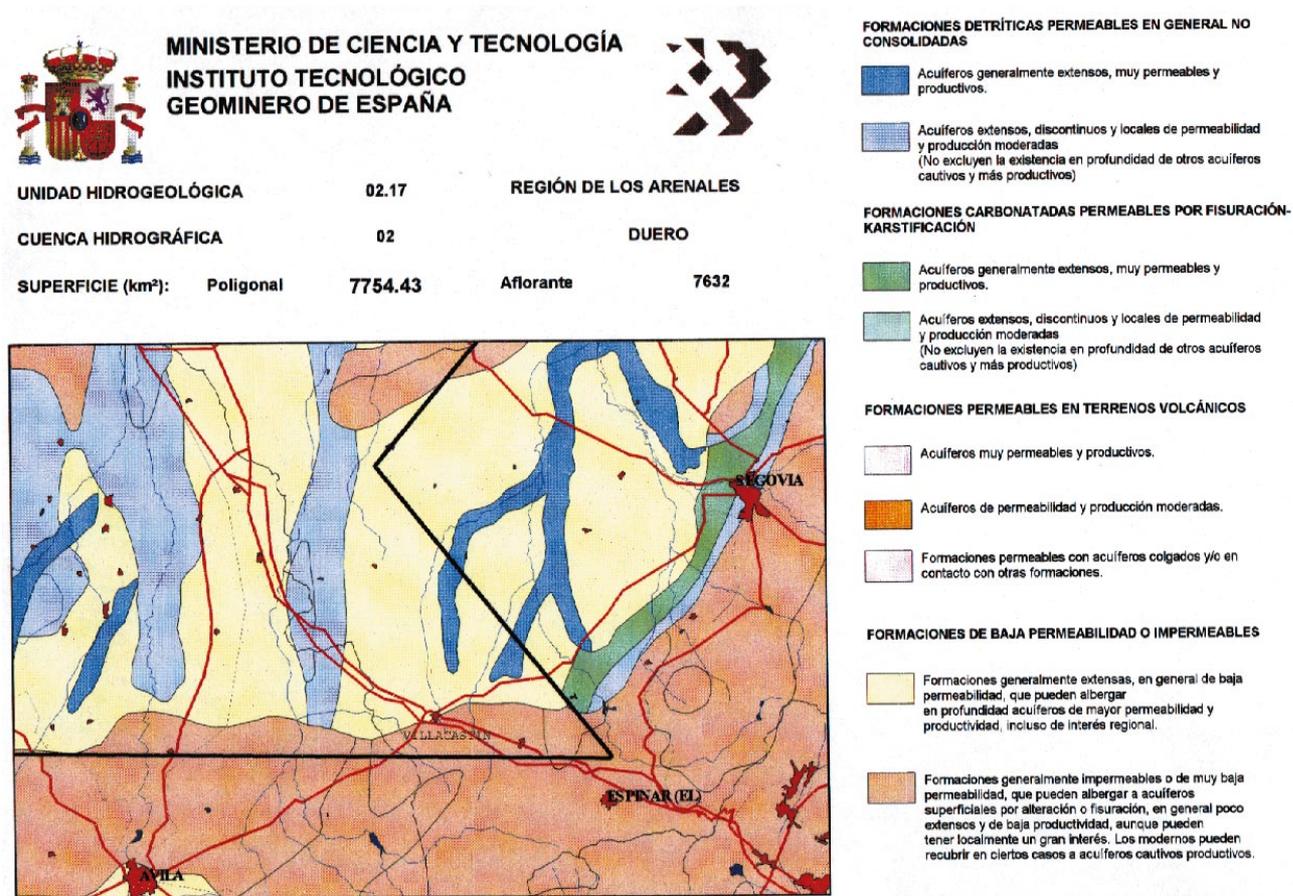
El esquema de flujo regional se dirige desde los bordes de la cuenca hacia el río Duero, que es la vía de drenaje más importante (Figura 8).

El balance de la Unidad Hidrogeológica (DGOH, 1993) es:

Entradas (hm³/año)	Salidas (hm³/año)	Usos del agua (hm³/año)
Lluvia: 100-290	Ríos: 50-65	Abastecimiento urbano: 14,8
Entradas laterales: 10-15 (Región sudoeste o del Tormes)	Bombes: 187	Agrícola: 170
Retornos: 48		Industrial: 0,5
		Otros: 1,7
Total: 158-353	Total: 237-252	Total: 187

Las aguas subterráneas de la unidad (IGME, 1982 c; IGME, 1987) son bicarbonatadas cálcico-magnésicas, que predominan en la mayor parte de la unidad, y bicarbonatadas sódicas, existiendo en algunos puntos aguas sulfatadas -cloruradas cálcico-magnésicas y bicarbonatadas cloruradas. En el sector norte y en las proximidades del río Duero, en la zona de descarga las aguas, son bicarbonatadas cloruradas sódicas; también lo son en Madrigal de las Altas Torres y en la zona de Arévalo. Son aguas de dureza media (200-300 mg/L CO₃Ca) y mineralización notable (700-1.000 µS/cm) en la mayoría de la unidad.

La zona donde se ubican las captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín (como se indicó en el apartado 6.1.2.) es una fosa tectónica rellena de materiales cretácicos, terciarios y cuaternarios, limitada por los materiales que constituyen la Sierra de Pradales al norte, un macizo alargado de rocas plutónicas y metamórficas con la misma dirección del Sistema Central al oeste y noroeste y los materiales plutónicos y metamórficos del Sistema Central al sur, y este. Esta fosa, que constituía el denominado anteriormente sistema acuífero número 11 (IGME, 1982



Fuente: IGME 2000

Figura 7: Unidad Hidrogeológica 02.17 Región de los Arenales en el entorno de Villacastín.

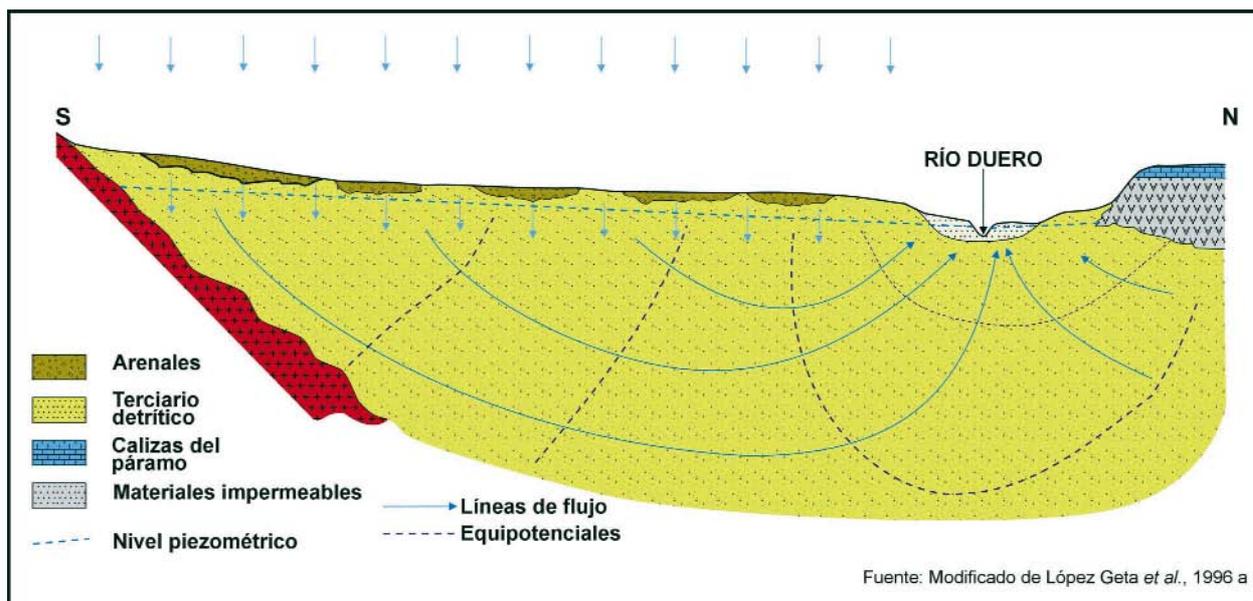


Figura 8: Esquema de flujo de la Unidad Hidrogeológica 02.17. Región de los Arenales.

a), ha sido incluida parcialmente en la Unidad Hidrogeológica 02.17 (en su extremo sudeste), cuyas características generales han sido ya descritas.

Los materiales mesozoicos, cuyas características litoestratigráficas se han indicado en el apartado 6.1.2.1., afloran en el borde sur y norte de dicha fosa y, recubiertos por materiales terciarios en el resto de la fosa, constituyen acuíferos de interés, especialmente los materiales Jurásicos que descargan hacia el norte fuera de esta área, y el tramo dolomítico, diferenciado en el Cretácico. En menor medida puede considerarse de interés el tramo calizo-dolomítico y de materiales arenosos cretácicos, de comportamiento hidrogeológico irregular, dependiendo de su espesor en cada zona, y el tramo margo dolomítico que, aunque tiene poca permeabilidad, ocasionalmente da lugar a manantiales que pueden resolver problemas locales. Las Facies Utrillas del Cretácico y los materiales triásicos carecen de interés en la zona por su baja permeabilidad.

Los materiales del Terciario, discordantes sobre las formaciones inferiores, cubriendo indistintamente a cualquiera de ellas, constituyen un acuífero de gran interés. Están constituidos por conglomerados de borde y materiales arcillo arenosos del Mioceno. Presenta una serie de lentejones arenosos de extensión variable incluidos dentro de una matriz areno-limo-arcillosa de naturaleza semipermeable, a través de la cual se relacionan hidráulicamente, funcionando el conjunto como un acuífero único muy heterogéneo y anisótropo.

Los niveles de arenas, que constituyen las formaciones más permeables, se disponen en lentejones en la serie arcillo-margo-arenosa, con dimensiones variables tanto horizontal como verticalmente. La potencia del Terciario es diferente según las zonas de acuerdo con la disposición del zócalo, pudiendo variar entre los más de 400 m que presenta al norte de la localidad de Aldeavieja (ubicada a unos 7 km al oeste de Villacastín) y apenas 50 m al norte de Segovia capital.

El Terciario esta parcialmente recubierto por materiales cuaternarios (aluviales, arenales y rañas), estando ambos conjuntos conectados hidráulicamente. Los arenales, que alcanzan su mayor desarrollo en la zona norte, constituyen un acuífero libre cuya mayor importancia reside en el papel que juega de regulador de la recarga del terciario detrítico sobre el que se apoya directamente.

Por último en los materiales plutónicos y metamórficos del Sistema Central, aflorantes al sur de la fosa antes indicada, constituidos fundamentalmente por granitos fracturados con diques de cuarzo, pórfido, aplita y pegmatitas así como gneises, pizarras y cuar-

citadas, aunque sin importancia hidrogeológica a nivel regional, presentan manantiales y captaciones que permiten resolver demandas locales. Este es el caso del área situada al sur del casco urbano de Villacastín, donde diferentes pozos perforados en estos materiales son empleados para el abastecimiento de esta población.

5. Hidrogeología del entorno de Villacastín

El abastecimiento a la población de Villacastín se efectúa empleando los recursos del acuífero Terciario detrítico, que es captado por cuatro sondeos, y las captaciones existentes en materiales graníticos al sur del casco urbano (Mapa 1), mediante el bombeo de tres pozos.

Estas siete captaciones están ubicadas dentro del término municipal de Villacastín.

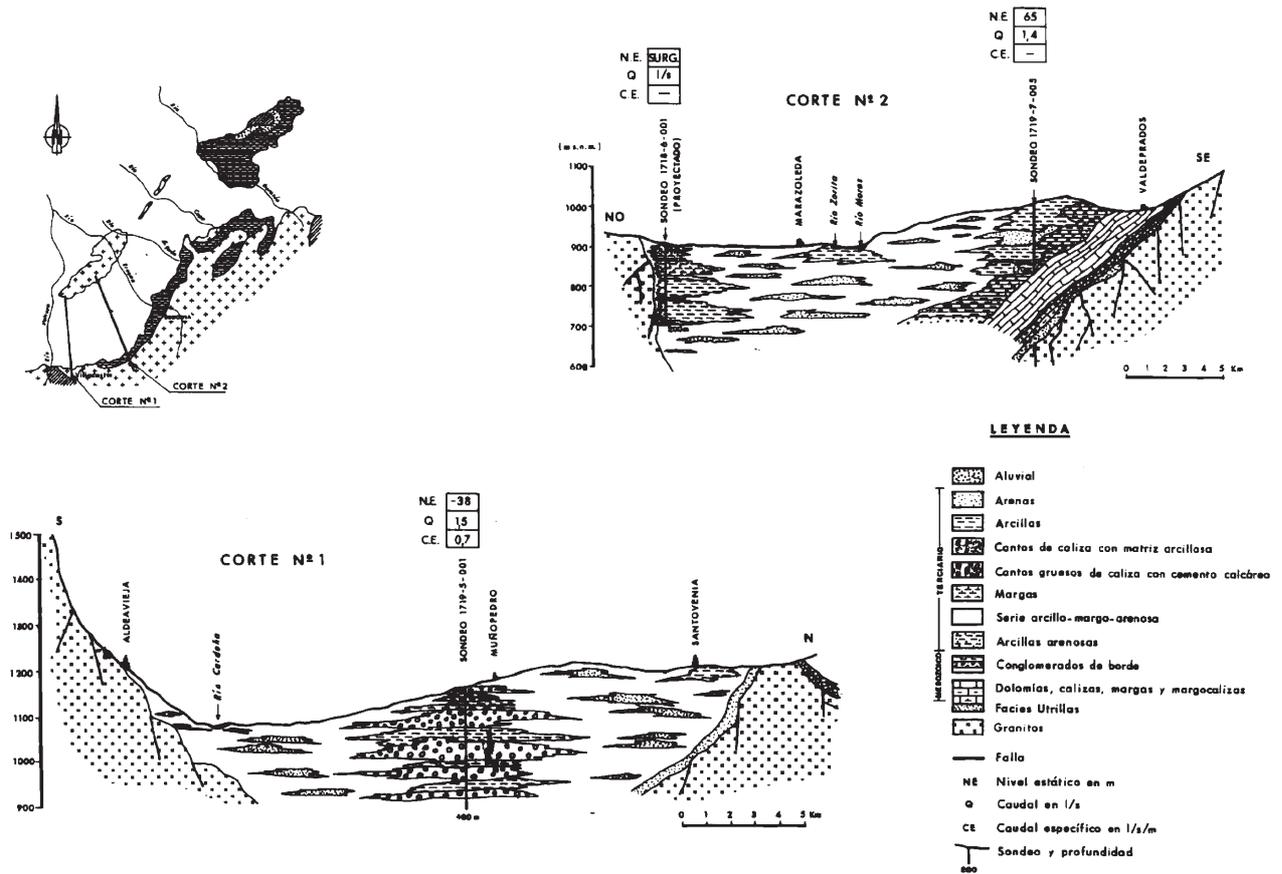
En el plano y los cortes hidrogeológicos incluidos en la figura 9, realizados con el apoyo de columnas litológicas de los sondeos allí referenciados, se muestra como los materiales mesozoicos se acuñan hacia el extremo sudoeste de la cubeta que constituía el anteriormente denominado sistema 11, tienen aún cierta entidad en el corte número 2 y desaparecen por completo en el corte número 1, realizado en dirección sur-norte desde la localidad de Aldeavieja, muy próxima a Villacastín, por lo que no cabe esperar acuíferos mesozoicos en el área donde se ubican las captaciones de abastecimiento de este municipio. La misma conclusión se obtiene de los estudios geofísicos realizados (nueve sondeos eléctricos verticales), en el área donde se ubican las captaciones de abastecimiento, que asigna todos los materiales hasta la profundidad máxima alcanzada de 300 m como pertenecientes al Terciario y Cuaternario (Sondaga, 1993).

Las principales características de los acuíferos captados para el abastecimiento de Villacastín, son:

5.1. Acuífero del Terciario detrítico

- Naturaleza

Los materiales detríticos del Terciario, captados por los sondeos de abastecimiento de Villacastín, están constituidos por una serie de lentejones de materiales permeables (arenas y gravas) de extensión variable, incluidos dentro de una matriz areno-limo-arcillosa, de naturaleza semipermeable, a través de la cual están relacionados hidráulicamente. Están parcialmente recubiertos por materiales cuaternarios, estando ambos conjuntos conectados, funcionando



Fuente: IGME, 1982 a

Figura 9: Cortes hidrogeológicos en el área objeto de estudio.

regionalmente como un acuífero único, libre, heterogéneo y anisótropo. A escala local su funcionamiento se ajusta más al de un acuífero multicapa con una serie de niveles arenosos, acuíferos, separados entre sí por niveles arcillosos, acuitardos.

- Características de las captaciones

Las principales características de los puntos de agua existentes, en el área analizada del acuífero del Terciario detrítico, en la que se ubican las captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín (Mapa 1), se muestran en la tabla 10.

- Recarga-Descarga

El funcionamiento hidrogeológico del acuífero del Terciario detrítico en el entorno de Villacastín (Figura 10), obtenido del análisis del mapa hidrogeológico elaborado (Mapa 1), indica que las zonas de recarga corresponden a los interfluvios, descargándose en los diferentes arroyos, entre los que destaca el de los Prados (junto al que se ubican las captaciones de abastecimiento), que discurren de sur a norte, y mediante bombeos, existiendo un flujo regional de toda el área hacia el río Duero, al norte del área analizada.

El límite sur del acuífero, constituido por el contacto con los materiales graníticos, es considerado regionalmente como límite impermeable, si bien podría existir, localmente, un flujo y aportación lateral de escasa entidad desde los materiales graníticos.

La recarga de los acuíferos Terciario y Cuaternario, en el área analizada, procede de la infiltración del agua de lluvia, que se ha evaluado en $1,02 \cdot 10^{-4}$ m/día. Esta se ha obtenido en base al análisis de la precipitación media anual en Villacastín, que supone 750 mm/año, y a los resultados de la campaña de aforos realizada en la zona, que ha permitido estimar valores de escorrentía total de 15% de la precipitación y de infiltración del orden del 5% de la pluviometría.

La descarga del acuífero en el área analizada, se produce por bombeos, para ganadería y el abastecimiento urbano de la localidad de Villacastín, limitándose el regadío a una pequeña zona con cultivo de fresas, y por drenaje a los arroyos y hacia el río Duero como ha sido ya indicado.

Los arroyos en la zona son ganadores, como indican los aforos realizados en los mismos y específicamen-

Tabla 10: Principales características de los puntos de agua inventariados en el acuífero del terciario detrítico en el término municipal de Villacastín.

NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN Y NOMBRE	TIPO DE CAPTACIÓN, PROFUNDIDAD Y DIÁMETRO	UTILIZACIÓN, BOMBA Y CAUDAL DE EXPLOTACIÓN	PROFUNDIDAD Y COTA DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO	OBSERVACIONES
172010002 Pozo de la Gasolinera	Pozo, 4,8 m Pozo de gran diámetro (4-5 m)	Abastecimiento de dos gasolineras y un restaurante	CERRADO. No se puede medir (07-10-2001)	
172010003 Sondeo de la Gasolinera	Sondeo, 120 m 300 mm de diámetro	Abastecimiento de dos gasolineras y un restaurante. Bomba a 70 m de profundidad. Bombeos intermitentes con depósito regulador. Q = 3 L/s durante 2 horas al día. Volumen diario 21,6 m ³	CERRADO. No se puede medir (07-10-2001). Nivel piezométrico= 1.070 m s.n.m. (7-10-2001)	Información del propietario
172010004 Fuente año 1956	Manantial	Ganadería (abrevadero). Q < 0,1 L/s (Octubre 2001)	Cota = 1.055 m (07-10-2001)	
172010005 Sondeo de las Fresas	Sondeo, 100 m 300 mm de diámetro	Agricultura. Riego de 4 ha de fresas con aspersores. Bomba sumergible 4 CV	Prof = 0,34 m Nivel piezométrico = 1.029 m s.n.m. (6-10-2001)	
172010006 Sondeo Fly Trap	Sondeo, 100 m 300 mm de diámetro	Abastecimiento hotel	CERRADO. No se puede medir	
172020001 Puente Alzado (88043604 C.H. Duero)	Sondeo, 100 m (actualmente 90 m) 300 mm de diámetro	Abastecimiento Villacastín. Bomba de 20 CV a 82 m de profundidad. Q = 3-5 L/s	Surgente (6-10-2001) Cota > 1.035 m (Cota de la boca del sondeo surgente)	Actualmente no se bombea. Está previsto emplearlo nuevamente para abastecimiento. Descarga por "Fuente Álamo". Tiene caseta y valla metálica alrededor. Datos de análisis químicos
172020002 Fuente Alamo	Manantial	Ganadería (Abrevadero)	Cota = 1.035 m (7-10-2001)	Esta conectada al sondeo Puente Alzado (surgente) por una tubería
172020003 Cañada del Abad	Sondeo, 96 m 300 mm de diámetro	Abastecimiento a Villacastín. Bomba de 40 CV a 75 m de profundidad. Q = 3 L/s Abril a sept = 14 horas. Resto año = 8 horas	Prof = 14,5 m Nivel piezométrico > 1025 m s.n.m. (07-10-2001) Nivel dinámico en recuperación, sin bombear en 1 hora	Tiene caseta, no tiene valla metálica alrededor
172020004 San Bartolomé (88043604 C.H. Duero)	Sondeo, 96 m 300 mm de diámetro	Abastecimiento a Villacastín. Bomba de 20 CV a 80 m de profundidad. Q = 3-5 L/s	Prof = 3,23 m Nivel piezométrico: 1.050,97 m s.n.m. (6-10-2001) Nivel estático (sin bombear en meses)	Actualmente no se bombea. Está previsto emplearlo nuevamente para abastecimiento sustituyendo la tubería y bomba actuales
172020005 Camino del Valle	Sondeo, 96 m 300 mm de diámetro	Abastecimiento a Villacastín. Bomba de 40 CV a 75 m de profundidad. Q = 3 L/s Abril a sept = 14 horas. Resto año = 8 horas	Prof = 10,0 m Nivel piezométrico > 1.045 m s.n.m. (07-10-2001) Nivel dinámico en recuperación, sin bombear en 48 horas	Tiene caseta. No tiene valla metálica
172020006 Sondeo Granja de huevos Velasco	Sondeo, 104 m 300 mm de diámetro	Ganadería. Granja de gallinas ponedoras. Bomba de 5 CV. Depósito de 1.000 litros. Volumen diario bombeado= 25 m ³ /día	Prof = 7,31 m Nivel piezométrico: 1.057,0 m s.n.m. (6-10-2001) Nivel estático	
172020007 Fuente del km 86	Manantial	Ganadería (abrevadero). Q = 0,3 L/s (7-10-2001)	Manantial con agua Cota = 1.075	
172020008	Pozo, 6 m Pozo de gran diámetro (4-5 m)	Agricultura	Prof = 0,63 m Nivel piezométrico: 1.099,0 m s.n.m. (6-10-2001)	
172020016 Fuente del Espino	Manantial	Ganadería. Q < 0,1 L/s (7-10-2001)	Manantial con agua Cota = 1.040 m s.n.m. (7-10-2001)	

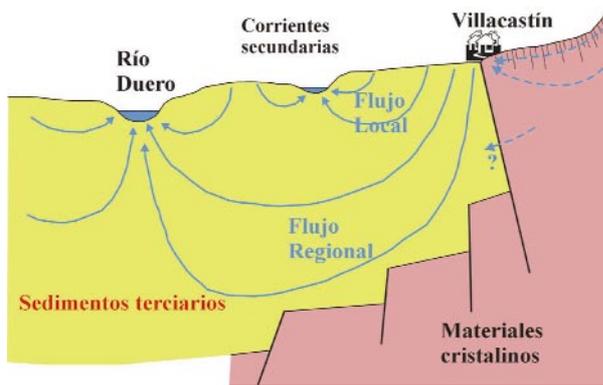


Figura 10: Esquema de funcionamiento hidrogeológico del acuífero en materiales del Terciario detrítico y su manifestación física en el entorno de Villacastín.

te en los arroyos de la Asperilla y de los Prados, que atraviesa el término municipal de Villacastín de sur a norte.

• Parámetros hidráulicos

Se dispone de 51 datos de caudal específico de los sondeos que explotan este acuífero. Su análisis estadístico indica:

Nº de datos:	51
Valor máximo:	3,5 L/s/m
Valor mínimo:	0,01 L/s/m
Valor medio:	0,37 L/s/m
Valor mediano:	0,49 L/s/m

Para el análisis de las transmisividades del acuífero terciario y cuaternario, se dispone de información completa de dos ensayos de bombeo realizados en las localidades de Carbonero el Mayor y Cantalejo, ubicadas 24 km al noroeste y 39 km al nordeste respectivamente de la ciudad de Segovia en materiales de características semejantes a los captados para el abastecimiento a la localidad de Villacastín. Los resultados de los ensayos fueron los siguientes:

	Número de identificación del inventario de puntos acuíferos del IGME	
	18174003	17184022
Profundidad (m)	180	180
Nivel estático (m)	23,93	41,20
Caudal de bombeo (L/s)	12	5
Duración del ensayo (min)	1440	960
Nivel dinámico al finalizar (m)	96,34	87,10
Tiempo de recuperación (min)	—	540
Nivel al finalizar recuperación (min)	—	44,55
Transmisividad en bombeo (m ² /día)	12	5
Transmisividad en recuperación (m ² /día)	—	10

El mecanismo de depósito de los materiales de este acuífero se adapta al de los abanicos aluviales, lo que produce una distribución aleatoria tanto en vertical como en horizontal de canales más arenosos englobados en una matriz de naturaleza más arcillosa, lo que da lugar a un acuífero heterogéneo y anisótropo. El grado medio de anisotropía (K_H/K_V) de estos materiales en la cuenca del Duero es del orden de 100.

Al analizar el tratamiento de los parámetros hidráulicos

licos se emplearon los trabajos estadísticos de López-Camacho y Camacho (1976), López-Camacho y Camacho y Martínez Alfaro (1979) y Martínez Alfaro (1979 y 1980) en acuíferos correspondientes a materiales terciarios de carácter detrítico no consolidados que rellenan las grandes fosas tectónicas continentales, como las del Duero y del Tajo, de carácter heterogéneo y anisótropo. Estos han permitido determinar que la estructura de este tipo de acuíferos no es caótica y sus parámetros y características (caudal específico de los pozos, transmisividad y distribución de tramos productivos) siguen leyes estadísticas de distribución de tipo log-normal, es decir siguen una ley de efectos multiplicativos.

Al ser muy escasos los datos de transmisividad en la zona estudiada es necesario estimar este parámetro a partir de los caudales específicos ya que entre ambos existe una relación lineal.

Para obtener ésta se ha empleado la correlación obtenida en una zona más amplia, la correspondiente a toda la cuenca detrítica sur del Duero (Martínez Alfaro *et al.*, 1986), de características iguales a la de la zona a modelar, con 169 datos de caudal específico y 35 de transmisividad que indicó que la ecuación de correlación es:

$$T [m^2/día] = 100,13 q_e [L/s/m] - 5,44$$

Su aplicación a la zona de estudio proporciona valores de transmisividad medios en el acuífero de 31 m²/día y un valor mediano de 43 m²/día.

Los valores de transmisividad estimados por este procedimiento para las captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín son del orden de los 30 m²/día.

No se dispone de valores de coeficiente de almacenamiento, habiéndose estudiado este en estudios precedentes en estos materiales con un valor de 2·10⁻³.

• Hidroquímica y calidad

En la tabla 11, se muestran los resultados de los análisis químicos correspondientes a los sondeos de abastecimiento urbano Puente Alzado (172020001), Cañada del Abad (172020003) y Camino del Valle (172020005) que captan el acuífero del Terciario detrítico.

Son aguas bicarbonatadas cálcicas, con dureza media y mineralización ligera (449 μS/cm) a notable (533 μS/cm y 563 μS/cm). Su composición química es muy parecida, como se observa en su representación porcentual empleada el diagrama de Piper-Hill-Langelier correspondiendo las 3 muestras a un mismo grupo de aguas (Figura 11) y de los valores correspondientes en el diagrama de Schöeller-Berkaloff (Figura 12).

La distribución espacial de estas aguas y sus características puede observarse en el Mapa 1 en el cual se ha incluido su representación empleando el diagrama de Stiff modificado.

En ninguno de los análisis químicos efectuados en estas captaciones (Tabla 11), se supera los valores de concentración máxima admisible, indicados en la Reglamentación Técnico Sanitaria para el abastecimiento y control de calidad de las aguas potables de consumo público (BOE, 1990).

El contenido de nitratos que presentan (de 14 a 36

Tabla 11: Análisis químicos de muestras de agua de las captaciones de abastecimiento urbano en materiales detríticos de Villacastín.

Número de identificación del inventario de puntos acuíferos del IGME y nombre de la captación	Fecha del análisis (Toma de muestras)	DQO	Cl ⁻ mg/L	SO ₄ ⁼ mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L	CO ₃ ⁼ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	Na ⁺ mg/L	Mg ⁺⁺ mg/L	Ca ⁺⁺ mg/L	K ⁺ mg/L	pH	Conduct μS/cm	Residuo Seco 110°C	NO ₂ ⁻ mg/L	NH ₄ ⁺ mg/L	P ₂ O ₅ mg/L	Si O ₂ mg/L
172020001 Puente Alzado	06-10-01	2,0	16	12	260	0	14	19	12	72	1	7,6	449	299	0	0	0	36,3
172020003 Cañada del Abad	07-10-01	1,1	18	25	298	0	36	38	14	76	2	7,8	563	382	0	0	0	32,1
172020005 Camino del Valle	07-10-01	1,0	18	12	261	0	26	33	12	64	2	7,6	533	363	0	0	0	32,6

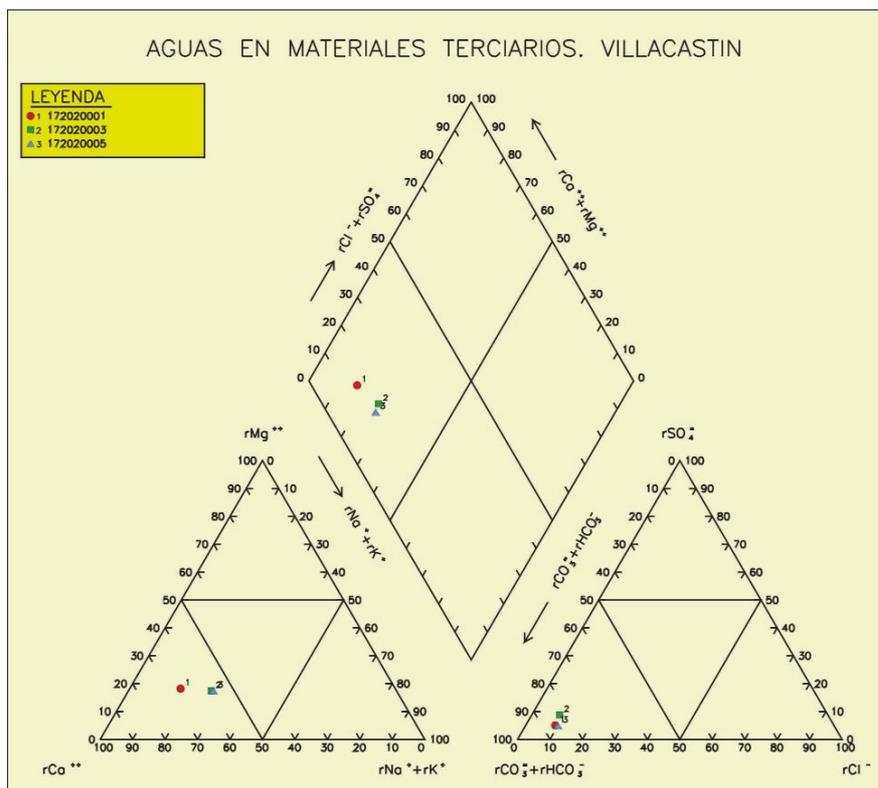


Figura 11: Diagrama de Piper-Hill-Langelier de las muestras de las captaciones del acuífero del Terciario detrítico.

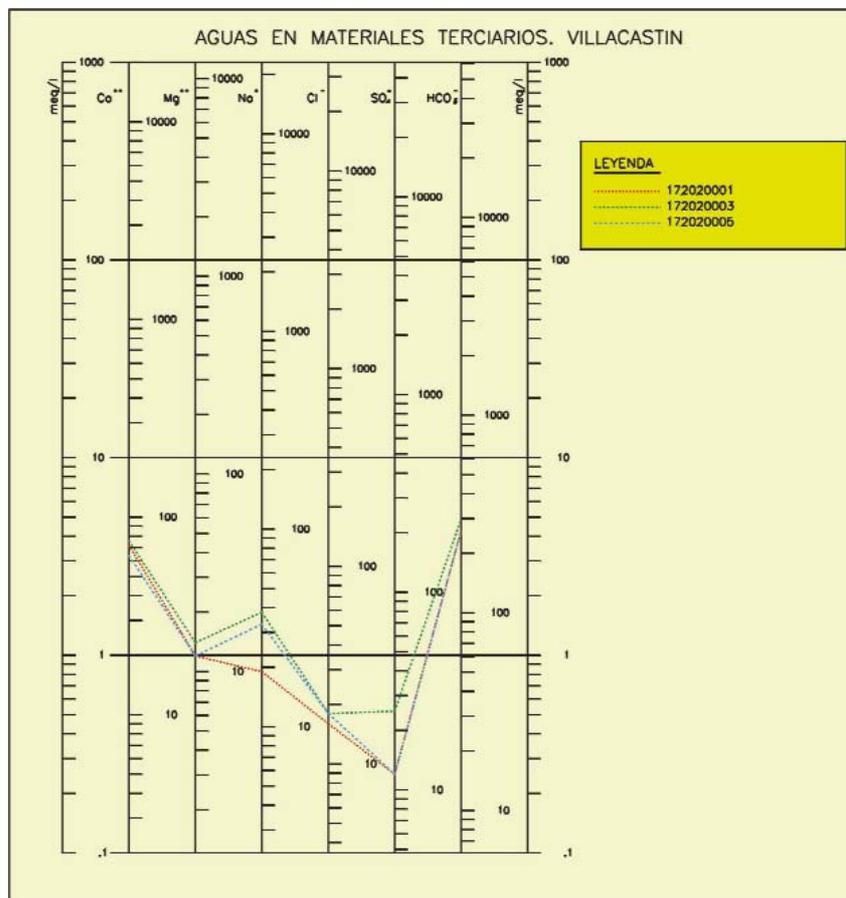


Figura 12: Diagrama de Schöeller-Berkaloff de las muestras de las captaciones del acuífero del Terciario detrítico.

mg/L) debe estar relacionada con la actividad antrópica, siendo su fuente más probable el abonado y las explotaciones ganaderas existentes en sus inmediaciones.

No se han detectado en los análisis efectuados contenido de nitritos ni amonio, cuya presencia podría indicar una contaminación reciente.

Por último cabe indicar que en los análisis bacteriológicos efectuados periódicamente por los responsables del abastecimiento municipal no se ha detectado ningún indicio de contaminación bacteriológica.

5.2. Captaciones en materiales graníticos

Los granitos existentes en el área de estudio, al sur de la localidad de Villacastín (Mapa 1), están fracturados y atravesados por numerosos diques de cuarzo, pórfido, aplitas y pegmatitas.

En estos materiales, sin importancia hidrogeológica regional, existen pequeños manantiales y pozos que permiten resolver demanda locales, captando el agua que circula a través de la red de fracturas y diques, así como por los materiales de alteración de los granitos, de escasa potencia en la zona.

Tabla 12: Principales características de los puntos de agua inventariados en los materiales graníticos en el término municipal de Villacastín.

NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN Y NOMBRE	TIPO DE CAPTACIÓN, PROFUNDIDAD Y DIÁMETRO	UTILIZACIÓN, Y CAUDAL DE EXPLOTACIÓN	PROFUNDIDAD Y COTA DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO	OBSERVACIONES
172010001	Sondeo, 68 m 0-30 m: 350 mm de diámetro 30-68 m: 220 mm de diámetro Tubería 180 mm ranurada de 6-68 m	Abastecimiento de la localidad de Blascoeles. Q = 0,25-0,75 L/s	Prof = 1,71 m. Nivel piezométrico= 1.113,29 m s.n.m. (13-10-2001)	Sondeo realizado por el IGME para abastecimiento a la localidad de Blascoeles. La columna litológica es: 0-6 m: Arcilla arenosa. 6-10 m: Granitos poco fracturados. 10-30 m: Granitos muy fracturados y diaclasados. 30-68 m: Granitos rosas inalterados
172020009 Manantial de la Ermita del Cristo del Valle	Manantial	No se utiliza actualmente. Q < 0,1 L/s (13-10-2001)	Manantial con agua. Cota = 1.105 m	
172020010 Pozo Estacio	Pozo de gran diámetro (4-5 metros) 8-10 m de profundidad	Abastecimiento a Villacastín. Q < 1 L/s	Prof = 1,67 m. Nivel piezométrico= 1.118,3 m s.n.m. (13-10-2001)	Actualmente no se bombea. Está previsto emplearlo nuevamente para abastecimiento. Tiene caseta y valla metálica alrededor. Datos de análisis químicos
172020011 Pozo de la Rejilla	Pozo de gran diámetro (4-5 metros) 8-10 m de profundidad	Abastecimiento a Villacastín. Q < 1 L/s. Se bombea varias veces a la semana	Prof = 0,4 m . Nivel piezométrico= 1.099,6 m s.n.m. (13-10-2001)	Tiene caseta y valla metálica alrededor
172020012	Pozo de gran diámetro (4 metros) 11 m de profundidad	Abastecimiento de 8 viviendas	Prof = 3,41 m Nivel piezométrico= 1.151 m s.n.m. (13-10-2001)	
172020013 Fuente Raena	Manantial	Ganadería. Q < 0,1 L/s (13-10-2001)	Manantial con agua. Cota = 1.165 m	
172020014 Pozo de los Lavaderos	Pozo de gran diámetro (4-5 metros) 8-10 m de profundidad	Abastecimiento a Villacastín. Q = 1-1,5 L/s. Se bombea 1 día a la semana	Prof = 1,3 m. Nivel piezométrico= 1.128,7 m s.n.m. (13-10-2001)	Tiene caseta y valla metálica alrededor. Tiene conexión hidráulica directa con el arroyo del Lavadero que está a unos 3 metros de distancia
172020015	Manantial	Ganadería (Abrevadero). Q = 0,03 L/s (13-10-2001)	Manantial con agua. Cota = 1.140 m	
172060001 Manantial de los Alijares	Manantial	Ganadería. Q < 0,05 L/s	Manantial con agua. Cota = 1.250 m	
172060002 Fuente Taberna	Manantial	Ganadería. Q < 0,05 L/s	Manantial con agua. Cota = 1.280 m	
172060003 Fuente Tordeveguas	Manantial	Ganadería. Q < 0,05 L/s	Manantial con agua. Cota = 1.305 m	

En la tabla 12 se indican las principales características de existentes en dichos materiales.

La mayoría son manantiales de pequeño caudal, y pozos de gran diámetro y escasa profundidad (menor de 10 metros) como los 3 pozos empleados para el abastecimiento de Villacastín, de los que no se tiene ningún dato de columna litológica, ni de sus parámetros hidráulicos.

La excepción lo constituye el sondeo 172010001 (de 68 metros de profundidad), realizado por el IGME para abastecimiento a la localidad de Blascoeles (situada a unos 8 km al sudoeste de Villacastín y de sus pozos de abastecimiento en estos materiales). En dicho sondeo el IGME realizó en 1993 un ensayo de bombeo de 23 horas a caudal crítico, siendo éste de 0,75 L/s, obteniéndose un valor de transmisividad de 1,1 m²/día. En la tabla 12 se indica su columna litológica.

Los recursos de estos materiales, que proceden exclusivamente de la infiltración del agua de lluvia, sobre las rocas cristalinas, son descargados básicamente a través de escorrentías superficiales a diversos arroyos que surcan la zona (Mapa 1), pequeños manantiales empleados para abreviar al ganado, y bombeo, principalmente de los 3 pozos empleados para abastecimiento de la localidad de Villacastín y casas aisladas, existiendo muy probablemente un grado de desconexión elevado entre las diferentes áreas de alimentación de las captaciones difícil de precisar con la información disponible.

En la tabla 13 se muestran los datos hidroquímicos disponibles en estos materiales en la zona estudiada, correspondiente a los pozos de abastecimiento urbano de Villacastín: Estacio (172020010), de la Rejilla (172020011) y de los Lavaderos (172020014), así como al sondeo 172010001.

En las figuras 13 y 14 se realiza su representación gráfica empleando los diagramas de Piper-Hill-Langelier y Schöeller-Berkaloff respectivamente.

La distribución espacial de estas aguas y sus características puede observarse también en su representación mediante el diagrama de Stiff modificado incluido en el Mapa 1.

En la figura 15 se refleja la representación gráfica de las muestras de las captaciones del acuífero del Terciario detrítico y de las captaciones en materiales graníticos empleando el diagrama de Piper-Hill-Langelier.

Su análisis indica que puede distinguirse dos grupos de aguas: Las aguas son cloruradas cálcicas en los pozos Estacio (172020010) y de la Rejilla (172020011), con una mineralización notable siendo aguas de dureza media (231 mg/L de CO₃Ca) en el pozo de la Rejilla y duras (374 mg/L de CO₃Ca) en el pozo Estacio.

En el segundo grupo, compuesto por el pozo de los Lavaderos (172020014) y el sondeo de Blascoeles (172010001), las aguas son bicarbonatadas cálcicas,

Tabla 13: Análisis químicos de las captaciones en materiales graníticos.

Número de registro Nombre de la captación	Fecha del análisis (Toma de muestras)	DQO	Cl ⁻ mg/L	SO ₄ ⁼ mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L	CO ₃ ⁼ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	Na ⁺ mg/L	Mg ⁺⁺ mg/L	Ca ⁺⁺ mg/L	K ⁺ mg/L	pH	Conduct µS/cm	R-S 110°C	NO ₂ ⁻ mg/L	NH ₄ ⁺ mg/L	P ₂ O ₅ mg/L	Si O ₂ mg/L
172020010 Estacio	13-10-01	1,8	179	58	126	0	33	37	28	103	4	7,2	836	636	0,08	0	0	26
172020011 De la rejilla	13-10-01	3,8	302	50	190	0	15	39	54	125	4	7,0	1.222	912	0	0	0,05	25,2
172020014 De los lavaderos	13-10-01	4,5	4	10	112	0	0	11	7	22	1	7,5	186	140	0	0	0	28,8
172010001 Blascoeles Muestra 1: Min. 200 bombeo	27-09-93	—	27	35	360	0	66	44	28	76	2	7,8	711	675 (Sólid. Dto.)	0,37	0	<0,05 (PO ₄)	36,6
172010001 Blascoeles Muestra 2: Min. 1400 bombeo	27-09-93	—	23	25	347	0	52	42	25	67	1	7,8	665	620 (Sólid. Dto.)	0,12	0	<0,05 (PO ₄)	37,8

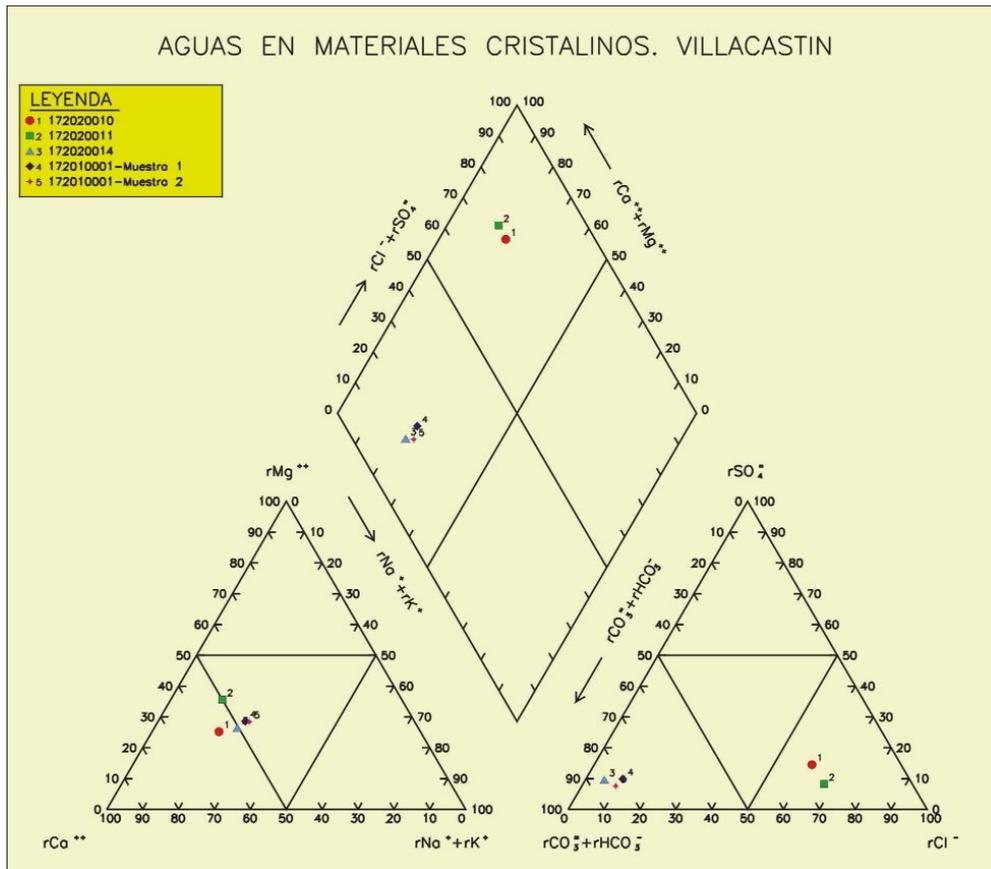


Figura 13: Diagrama de Piper-Hill-Langelier de las muestras de las captaciones de abastecimiento en materiales graníticos.

presentando diferencias en su mineralización que es débil en el pozo de los Lavaderos y notable en el sondeo de Blascoeles, así como en su dureza siendo aguas blandas (84 mg/L de CO_3Ca) en el pozo de los Lavaderos y media (271 mg/L de CO_3Ca) en el sondeo de Blascoeles.

Existen no obstante notables diferencias en las características químicas de las captaciones de cada uno de esos grupos, que son claramente observables en su representación en los diagramas de Schöeller-Berkaloff (Figura 14) y de Stiff modificado (Mapa 1). Estas son especialmente notorias entre el pozo de los Lavaderos (172020014) y el de Blascoeles (172010001).

En los análisis químicos efectuados en estas captaciones (Tabla 13), se superan los valores de concentración máxima admisible, indicada en la Reglamentación Técnico Sanitaria para el abastecimiento y control de calidad de las aguas potables de consumo público (BOE, 1990), respecto al contenido en nitratos en el sondeo de Blascoeles (con valores de 66 y

52 mg/L, siendo el máximo valor admisible de 50 mg/L) y de nitritos (con valores de 0,37 y 0,12 superando los 0,10 de la Reglamentación), así como en el pozo de la Rejilla de abastecimiento a Villacastín (superando el contenido en magnesio, 54 mg/L, el límite legal de 50 mg/L).

En los otros pozos de abastecimiento de Villacastín, pozos Estacio y de los Lavaderos, no se supera ninguno de los valores indicados en la citada Reglamentación.

Hay que reseñar además los altos valores de conductividad, y cloruros existentes en los pozos Estacio y de la Rejilla, correspondiendo el análisis químico de las muestras efectuadas a aguas cloruradas cálcicas, así como el valor de nitratos y nitritos en el pozo Estacio, que podrían atribuirse a la posible existencia de focos de contaminación en su área de alimentación. Estos valores aconsejan efectuar un análisis de posibles focos de contaminación en la zona y un seguimiento de la calidad de dichos pozos, efectuando nuevos análisis químicos y bacteriológicos.

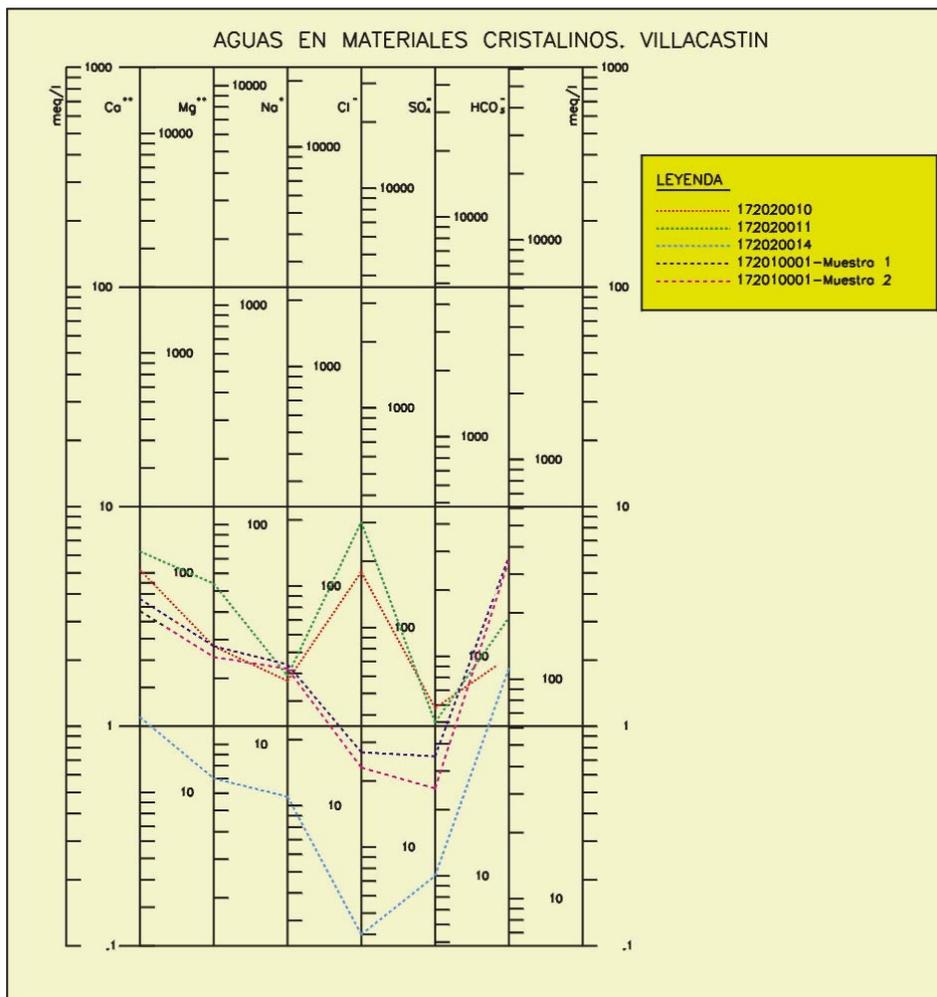


Figura 14: Diagrama de Schöeller-Berkaloff de las muestras de las captaciones en materiales graníticos.

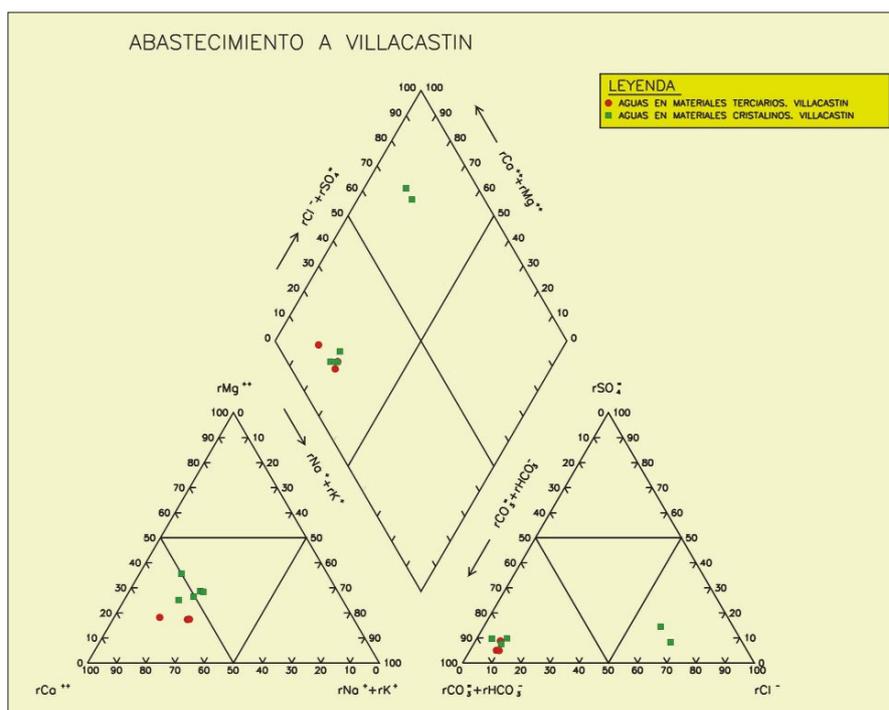
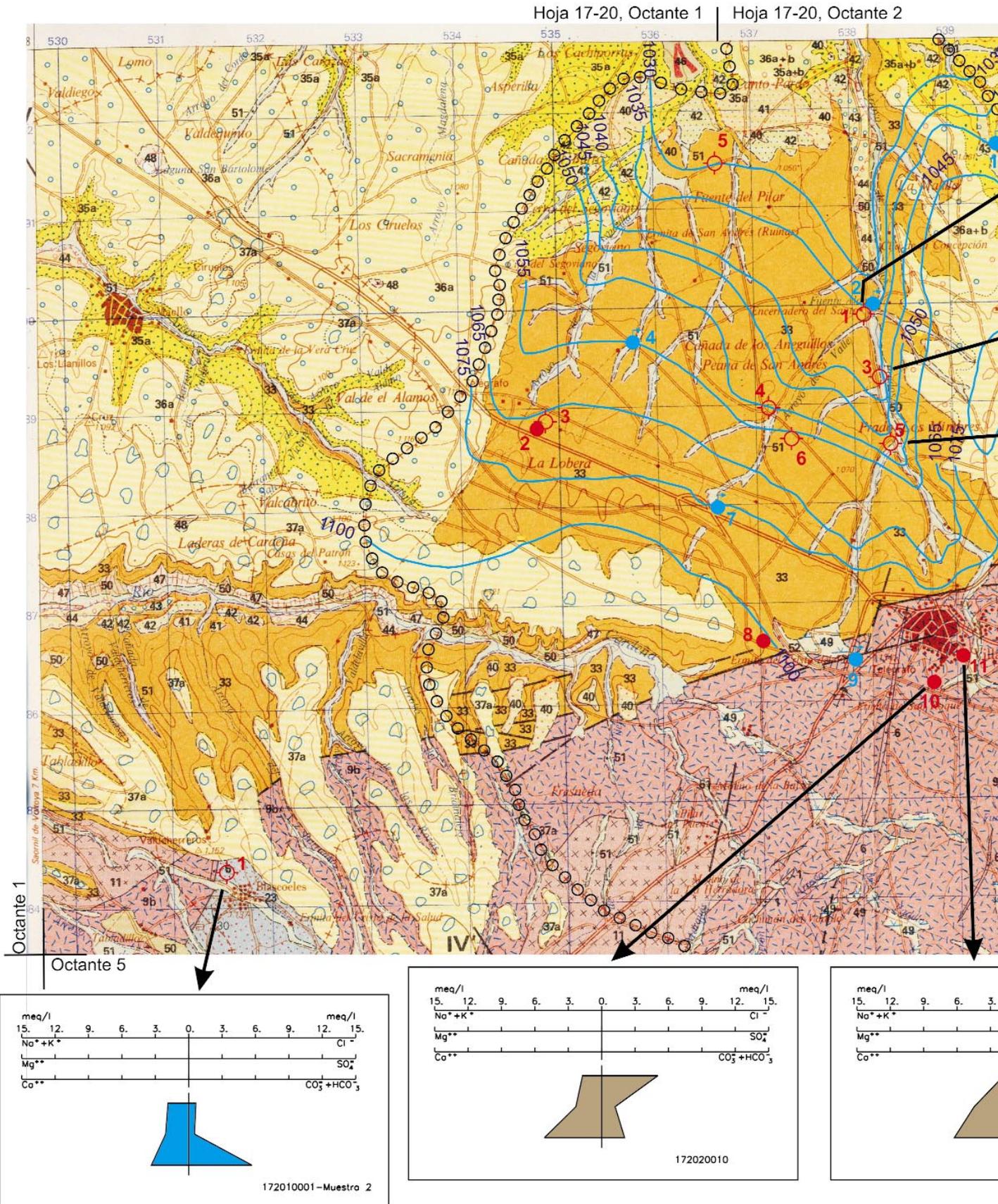
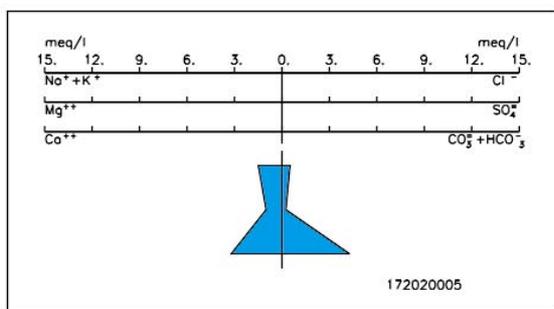
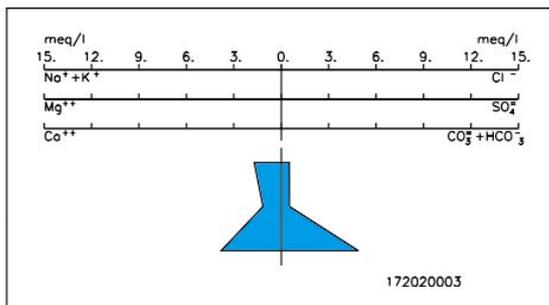
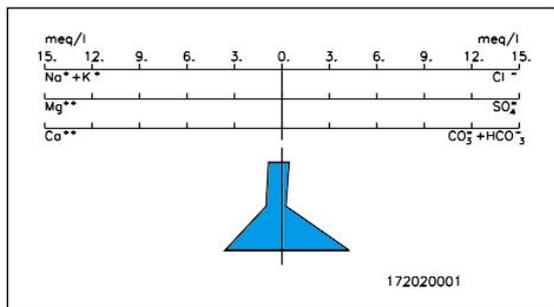
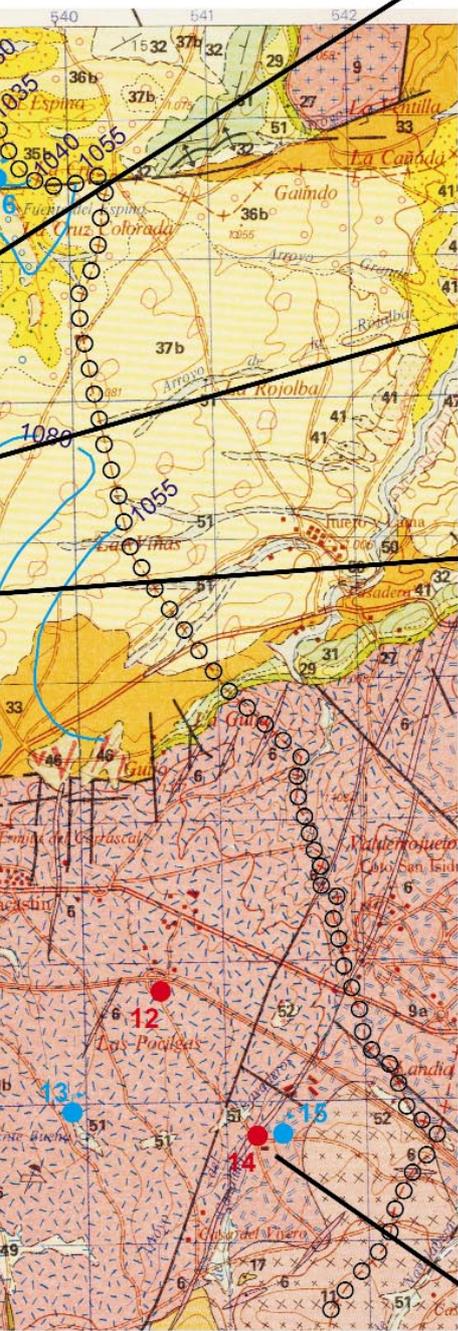


Figura 15: Diagrama de Piper-Hill-Langelier de las muestras de las captaciones del acuífero del terciario detrítico y de las captaciones en materiales graníticos.

Mapa 1. Mapa hidrogeológico en el entorno de las captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín. Cartografía geológica tomada de Pérez González, et. al., 1990

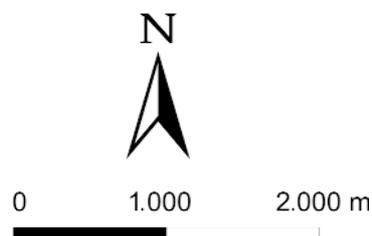
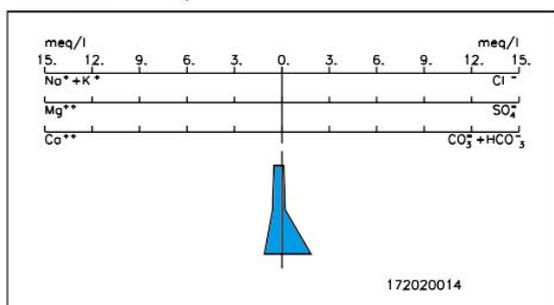
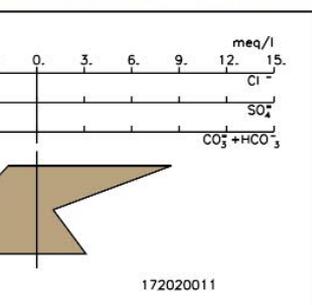
Fuente: Martínez Navarrete, 2002

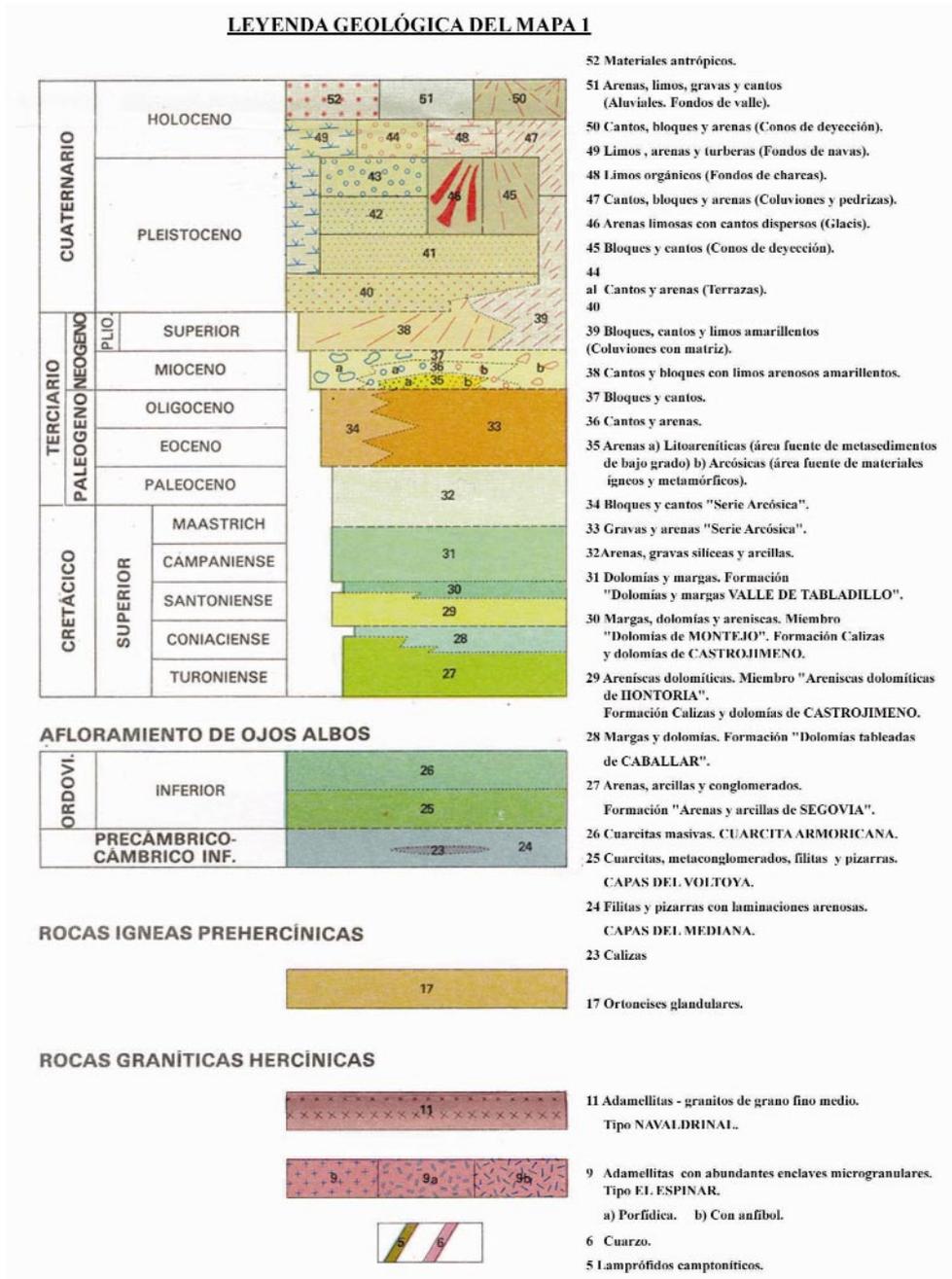




SIMBOLOGÍA

-  5 Sondeo y número de identificación.
-  12 Pozo y número de identificación.
-  15 Manantial y número de identificación.
-  1055 Isopiezas acuífero detrítico del Terciario y Cuaternario m s.n.m. (Octubre 2001).
-  Limite del término municipal de Villacastín.
-  Aguas bicarbonatadas cálcicas.
-  Aguas cloruradas cálcicas.





6. Problemática del abastecimiento a la población

6.1. Infraestructura del abastecimiento

En la figura 16 se indica la localización de los elementos que componen la infraestructura de abastecimiento a la población. Sus características principales son las siguientes:

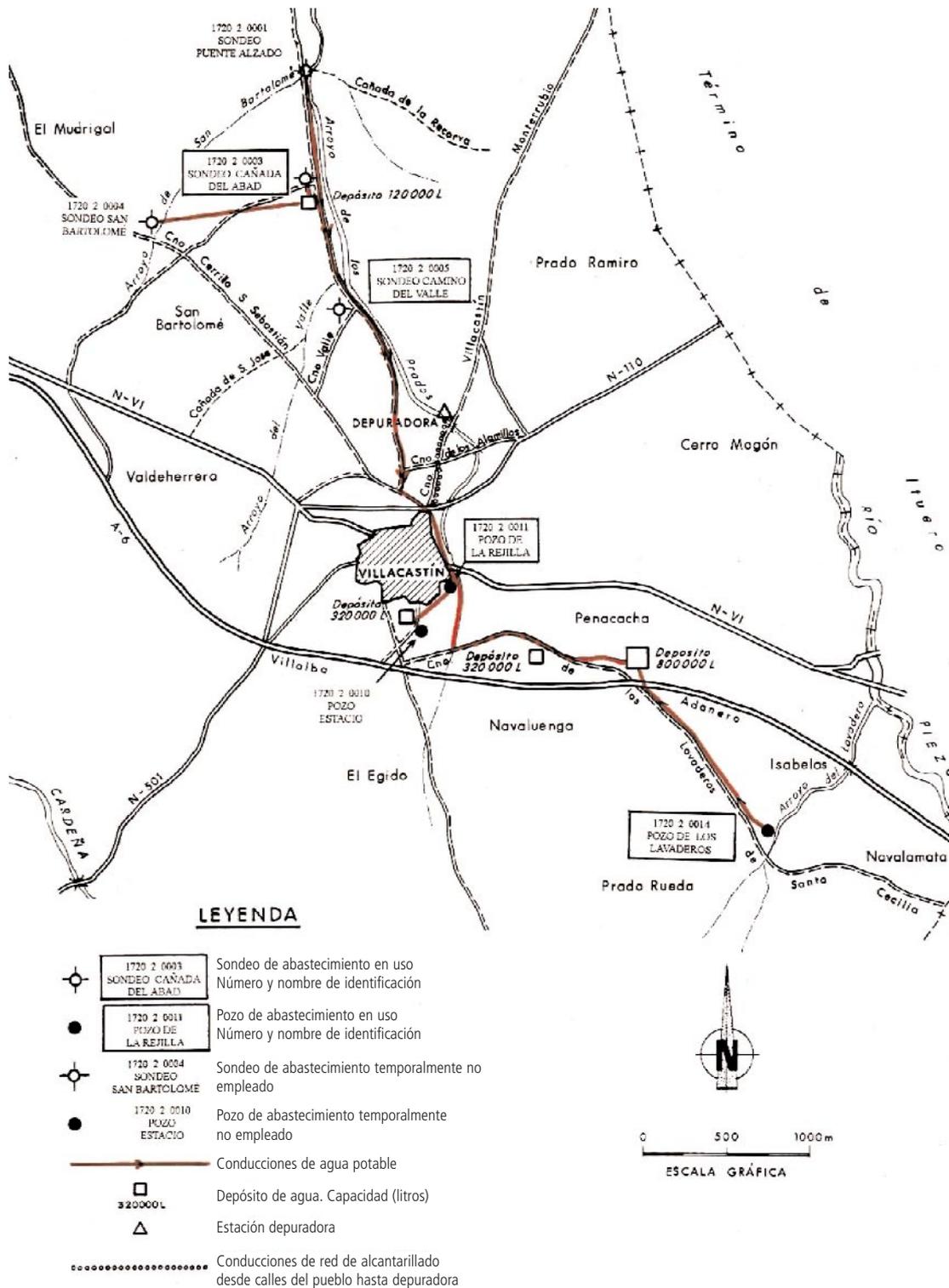
Captaciones de abastecimiento urbano

El abastecimiento actual de la población de Villacastín se efectúa exclusivamente en base a la explotación de siete captaciones de aguas subterráneas ubi-

cadas en el término municipal. Se bombean cuatro sondeos que captan el acuífero detrítico terciario y cuaternario al norte del casco urbano, denominados sondeos de Puente Alzado, San Bartolomé, Cañada del Abad y Camino del Valle (Fotografías 1 a 4), y tres pozos que captan los materiales graníticos al sur del casco urbano, llamados Pozo Estacio, de la Rejilla y de los Lavaderos, (Fotografías 5 a 7).

Las características principales de dichas captaciones se indican en la tabla 14 y 15 respectivamente.

En cuanto a los sondeos (Tabla 14), hay que reseñar que se emplean exclusivamente para abastecimiento sí bien no de un modo continuo. Los sondeos de Puente Alzado y de San Bartolomé no se bombean



Fuente: Martínez Navarrete y FernándezSánchez, 2000.

Figura 16: Situación actual del abastecimiento y red de saneamiento.

desde hace meses (noviembre 2001), pero está previsto volver a utilizarlos con este fin una vez que se sustituyan las tuberías y la bomba que están inservibles actualmente. El resto se bombea con un caudal de 3-5 L/s de 8 a 14 horas al día, si bien no de un modo continuo, distribuyéndose durante el mismo, el periodo de bombeo.

En ninguno de los análisis químicos disponibles de las muestras de agua de los sondeos de abastecimiento urbano Puente Alzado (172020001), Cañada del Abad (172020003) y Camino del Valle (172020005) se superan los valores de concentración máxima admisible indicados en la Reglamentación Técnico Sanitaria para el abastecimiento y con-

Sondeo Camino del Valle (172020005)



Sondeo Cañada del Abad (172020003)



Sondeo Puente Alzado (172020001)



Sondeo San Bartolomé (172020004)



Sondeos de abastecimiento de Villacastín que captan el acuífero en materiales detríticos del Terciario y Cuaternario (1, 2, 3, 4).

Pozo Estacio (172020010)



Pozo Rejilla (172020011)



Pozo de los Lavaderos (172020014)



Pozos de abastecimiento de Villacastín que captan los materiales graníticos (5, 6, 7).

trol de calidad de las aguas potables de consumo público (BOE, 1990).

En la tabla 15 se indican las características de los pozos existentes en materiales graníticos. Todos se

emplean exclusivamente para abastecimiento si bien no de un modo continuo, así por ejemplo el Pozo Estacio ha estado fuera de servicio durante varios meses (noviembre, 2001), pero está previsto emplearlo otra vez para abastecimiento en fechas próximas.

Tabla 14: Principales características de las captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín en el acuífero de materiales detríticos terciarios y cuaternarios.

Nombre y número de identificación del inventario de puntos acuíferos del IGME	Tipo de captación, profundidad y diámetro	Año y sistema de perforación	Bomba instalada Caudal de explotación	Cota del terreno en la embocadura Profundidad del nivel piezométrico Cota del nivel piezométrico (fecha) Tipo de nivel	Instalaciones de protección de la captación y equipos	Observaciones
Puente Alzado (172020001)	Sondeo, 100 m (actualmente 90 m) 300 mm de diámetro	1982 Percusión	Grundfos SP-1629, 20 CV, sumergible, situada a 82 m de profundidad. Q = 3-5 L/s	Cota= 1.035 Sondeo surgente N.P > 1.035 m s.n.m. (6-10-2001) Nivel estático. Sin bombear en meses	Tiene caseta. Tiene valla metálica que delimita un área de 17 x 17 metros cuadrados	Actualmente no se bombea. Está previsto emplearlo nuevamente para abastecimiento. Una tubería en superficie le conecta con "Fuente Álamo" por donde descarga actualmente. Datos de análisis químicos
Cañada del Abad (172020003)	Sondeo, 96 m 300 mm de diámetro	1993 Percusión	Grundfos, SP-2736, 40 CV, sumergible, situada a 75 m de profundidad. Q = 3 L/s abril a sept. = 14 h Resto año = 8 h	Cota= 1.039,5 Profundidad= 14,5 m N.P > 1.025 m s.n.m. (7-10-2001) Nivel dinámico en recuperación, sin bombear en 1 hora	Tiene caseta No tiene valla metálica	Datos de análisis químicos
San Bartolomé (172020004)	Sondeo, 96 m 300 mm de diámetro	1984 Percusión	Bomba 20 CV, sumergible, situada a 80 m de profundidad. Q = 3-5 L/s	Cota= 1.054,2 Profundidad= 3,23 m NP = 1.050,97 m s.n.m. (6-10-2001) Nivel estático. Sin bombear en meses	Tiene caseta. Tiene valla metálica que delimita un área de 18 x 9 metros cuadrados	Actualmente no se bombea. Tiene tuberías rotas y no está conectada a la Red. Está previsto emplearlo nuevamente para abastecimiento sustituyendo las tuberías y la bomba actual
Camino del Valle (172020005)	Sondeo, 96 m 300 mm de diámetro	1992 Percusión	Grundfos, SP-2736 40 CV, sumergible, situada a 75 m de profundidad. Q = 3 L/s abril a sept = 14 h Resto año = 8 h.	Cota= 1.055 Profundidad= 10,0 m N.P > 1.045 m s.n.m. (7-10-2001) Nivel dinámico en recuperación, sin bombear en 48 horas	Tiene caseta. No tiene valla metálica	No es posible tomar muestras a pie de sondeo, sí a la entrada al depósito de agua. Datos de análisis químicos

Tabla 15: Principales características de las captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín en materiales graníticos.

Nombre y número de identificación del inventario de puntos acuíferos del IGME	Tipo de captación, profundidad y diámetro	Sistema de perforación	Régimen de explotación	Cota del terreno en la embocadura Profundidad del nivel piezométrico Cota del nivel piezométrico (fecha) Tipo de nivel	Instalaciones de protección de la captación	Observaciones
Pozo Estacio (172020010)	Pozo de gran diámetro (varios metros), 8-10 m de profundidad	Excavado a mano	Actualmente no se bombea	Cota= 1.120 Profundidad= 1,67 m N.P = 1.118,3 m s.n.m. (13-10-2001) Nivel estático. Sin bombear en meses	Tiene caseta. Tiene valla metálica. Delimita un área de 16 x 16 m ²	Actualmente no se bombea. Está previsto emplearlo nuevamente para abastecimiento. Datos de análisis químicos
Pozo de la Rejilla (172020011)	Pozo de gran diámetro (varios metros), 8-10 m de profundidad	Excavado a mano	Q = 1 L/s Se bombea varias veces a la semana	Cota= 1.100 Profundidad= 0,4 m N.P = 1.099,6 m s.n.m. (13-10-2001) Nivel estático	Tiene caseta. No tiene valla metálica	Está en el casco urbano. La pared de la caseta es el límite de una calle. Datos de análisis químicos
Pozo de los Lavaderos (172020014)	Pozo de gran diámetro (varios metros), 8-10 m de profundidad	Excavado a mano	Q = 1 – 1,5 L/s Se bombea 1 día a la semana	Cota= 1.130 Profundidad= 1,3 m N.P = 1.128,7 m s.n.m. (13-10-2001) Nivel estático	Tiene caseta. Tiene valla metálica. Delimita un área de 12 x 14 m ²	Conexión hidráulica directa con el arroyo del lavadero que está a unos 3 m de distancia. Datos de análisis químicos

En los análisis químicos disponibles de las muestras de agua de los pozos de abastecimiento Estacio (172020010), de la Rejilla (172020011) y de los Lavaderos (172020014) únicamente en el análisis correspondiente al pozo de la Rejilla se han detectado valores de magnesio, de 54 mg/L, que superan los valores de concentración máxima admisible (50 mg/L) no existiendo problemas en ninguno de los otros parámetros respecto a la Reglamentación Técnico Sanitaria para el abastecimiento y control de calidad de las aguas potables de consumo público (BOE, 1990).

Depósitos de almacenamiento y redes de distribución

En la figura 16 se indica el trazado de las conducciones de agua potable, y la ubicación de los depósitos.

Básicamente consta de una conducción de fibrocemento de 150 mm de diámetro, que discurre junto al arroyo de los Prados desde el sondeo Puente Alzado hasta las inmediaciones del casco urbano, a la que se conectan los sondeos de Puente Alzado, Cañada del Abad, Camino del Valle y, tras las reparaciones previstas, San Bartolomé, y otras conducciones desde el pozo de los Lavaderos, de la Rejilla y Estacio bombeándose el agua hasta los depósitos.

Existen tres depósitos de regulación, dos de ellos de 320.000 litros y el tercero de 800.000 litros, ubicados en la zona sur del pueblo y a mayor cota que este, distribuyéndose a los domicilios por gravedad.

Hay además un aljibe de 120.000 litros junto al sondeo Cañada del Abad desde el que está previsto impulsar el agua procedente de los sondeos de Puente Alzado, San Bartolomé y Cañada del Abad hasta los depósitos de abastecimiento mediante una bomba aún no instalada.

Red de alcantarillado y estaciones depuradoras

La red de alcantarillado inicial de casco urbano se construyó en 1942 y ha sido ampliada en fechas posteriores a las nuevas calles incorporadas al mismo.

Cubre la mayor parte de la población al no existir urbanizaciones en el término municipal, por lo que solo quedan fuera del casco urbano algunas casas y restaurantes que disponen de fosas sépticas.

En la figura 16 se muestra la localización de la conducción que comunica la red de alcantarillado del casco urbano con la estación depuradora.

La depuradora de tratamiento secundario existente fue construida en una primera fase en 1982 y termi-

nada en 1992. Desde abril de 1999 está funcionando en pruebas, no encontrándose aún operativa en octubre de 2001.

6.2 Necesidades de agua para abastecimiento

La Red de distribución de agua potable del municipio cuenta con contadores generales y en los domicilios. El volumen anual facturado medio de 5 años (período 1996-2000) junto con las pérdidas en la red, según información del Ayuntamiento, es de 120.000 m³ anuales, con el siguiente desglose por trimestres:

1 ^{er} Trimestre enero-marzo:	20.000 m ³
2 ^o Trimestre abril-junio:	40.000 m ³
3 ^{er} Trimestre julio-septiembre:	40.000 m ³
4 ^o Trimestre octubre-diciembre:	20.000 m ³
TOTAL ANUAL ...	120.000 m ³

Estos datos suponen, considerando la población de 1.514 habitantes del año 2001, una dotación media de 217 L/hab/día que incluye las pérdidas en la red.

La dotación en el primer y cuarto trimestre es de 147 L/hab/día y de 294 L/hab/día en el segundo y tercer trimestre, lo que parece confirmar que la población prácticamente se duplica en las estaciones de primavera y verano.

El Plan Director de Infraestructura Hidráulica Urbana de la Junta de Castilla y León (BOCYL, 1994), establece una clasificación en la que a las poblaciones con menos de 40.00 habitantes, como es el caso de Villacastín, les corresponde una dotación de 150 L/hab/día, inferior por tanto a la suministrada realmente en el municipio.

Por su parte el Plan Hidrológico de la Cuenca del Duero (BOE, 1999 a) indica que la dotación para los municipios de menos de 10.000 habitantes es la siguiente:

HORIZONTE 2002			HORIZONTE 2012		
Actividad industrial y comercial					
Alta	Media	Baja	Alta	Media	Baja
270	240	210	280	250	220
L/hab/día	L/hab/día	L/hab/día	L/hab/día	L/hab/día	L/hab/día

El Plan Hidrológico de la cuenca del Duero indica que esta dotación es una estimación teórica, por lo que debe comprobarse su validez comparando la cifra obtenida con la que se pueda obtener de los datos de uso real del agua que puedan conseguirse en poblaciones que dispongan de un sistema correcto de control del agua servida y facturada. Se analiza-

rán las posibles discrepancias que aparezcan entre ambas cifras y en caso necesario se modificará la estimación de la dotación (BOE, 1999 a).

En el caso de la población de Villacastín, con una actividad industrial y comercial baja, le corresponde en el año 2002 una dotación de 210 L/hab/día que se incrementan hasta los 220 L/hab/día en el año 2012, cifras que coinciden sensiblemente con los 217 L/hab/día obtenidos previamente en base a la información proporcionada por el Ayuntamiento.

Para obtener los volúmenes consumidos en Villacastín con garantía es necesario bombear en los dos sondeos (Cañada del Abad y Camino del Valle) y dos pozos (de la Rejilla y de los Lavaderos) empleados durante todo el año y bombear en las otras tres captaciones (pozo Estacio y sondeos de Puente Alzado y San Bartolomé), especialmente en los meses de abril a septiembre, indicándose su distribución en la tabla 16.

7. Vulnerabilidad del acuífero frente a la contaminación

7.1 Inventario de focos potenciales de contaminación

Se ha realizado un inventario de focos potenciales de contaminación existentes en el término municipal de Villacastín, que se ha representado en el Mapa 2. Estos se han agrupado en cuatro tipos según su origen (agrícola, ganadero, industrial y urbano) cuyas características son:

Focos potenciales de contaminación agrícolas

Los cultivos existentes en el término municipal de Villacastín se indican en el Mapa 2. El cultivo de regadío se limita exclusivamente a una finca de 4 ha de fresas, existente en el extremo noroeste del área

estudiada, mientras que el cultivo de secano de cereales (trigo y cebada) ocupa unas 2.200 ha, ubicadas al norte y noroeste de la población.

En estos cultivos se emplean plaguicidas y fertilizantes. Se abona dos veces al año, requiriéndose unos 116 kg de N₂ por hectárea y año (cabe recordar que el límite exigido por la CEE es de 170 kg de N₂ por hectárea y año para zonas vulnerables), 72 kg de P₂O₅ y 100 kg de K₂O. Por lo tanto la cantidad de abonos empleada es de:

	kg (año) en las 2.200 ha de Cultivos de secano (cereales)
N ₂	255.200 kg
P ₂ O ₅	158.400 kg
K ₂ O	220.000 kg

El abono se acumula en determinados puntos previamente a su distribución por la superficie (Fotografía 8), práctica que incrementa su potencial contaminante.

El resto del término municipal carece de cultivos estando ocupado por montes y prados además de por los terrenos urbanos.

Focos potenciales de contaminación ganaderos

En el municipio de Villacastín la actividad ganadera tiene un gran desarrollo, reflejándose su distribución en el Mapa 2, habiéndose sintetizado las principales características así como la evaluación del potencial contaminante de todas las actividades ganaderas del municipio en la tabla 17.

Se analizarán además detalladamente las principales características de las instalaciones ganaderas, existentes y potenciales, de mayor entidad en el municipio, ubicadas en el área donde se agrupan la mayoría de las captaciones de abastecimiento a Villacastín.

Tabla 16: Distribución del volumen bombeado en las captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín.

Captación	Caudal	Tiempo de bombeo	Volumen bombeado diariamente	Volumen bombeado en 6 meses	Volumen bombeado en 1 año
Sondeo Cañada del Abad.	3 L/s	Abr-Sept. 14h Oct-Mar. 8 h	151,2 m ³ 86,4 m ³	27.594 m ³ 15.768 m ³	86.724 m ³
Sondeo Camino del Valle	3 L/s	Abr-Sept. 14h Oct-Mar. 8 h	151,2 m ³ 86,4 m ³	27.594 m ³ 15.768 m ³	
Pozo de la Rejilla	(2,1 L/s 12 h. todo el año)				33.276 m ³
Pozo de las Lavaderos					
Pozo Estacio					
Volumen anual bombeado				120.000 m ³	



Abono (estiércol) para los cultivos de secano acumulado previamente a su distribución (8).

– Explotación Avícola Velasco, S.L. (Número 10 del Mapa 2 y Tabla 17).

La explotación (Fotografía 9) ocupa una superficie de 50.000 m², de suelo calificado en las normas subsidiarias de Villacastín como no urbanizable de interés agrario general. Se accede a la misma por el camino del cerrillo de San Bartolomé.

Las instalaciones permiten la explotación de 60.000 gallinas destinadas a la producción de huevos, con un sistema totalmente mecanizado, reponiéndose el 60-70% de las gallinas cada año, efectuándose antes de cada nueva ocupación la limpieza y desinfección de las instalaciones.

Las aves se alojan en baterías de jaulas de 4 pisos. La alimentación es automática, existiendo en el exterior de la nave dos silos metálicos de almacenamiento de pienso de 15 t cada uno.

La evacuación de las deyecciones se realiza mediante cintas transportadoras que discurren bajo las baterías de jaulas, que vierten sobre otra cinta transversal en cuyo extremo son recogidas.

La red de saneamiento consiste en una tubería axial que recorre la nave y una fosa de purines. Ésta es vaciada mediante camiones cisterna fuera del término municipal. Los residuos sólidos son recogidos con un camión y vertidos también fuera del término municipal según la información proporcionada por el encargado de la explotación.

– Propuesta de instalación de dos explotaciones porcinas (número 5 y 11 del Mapa 2 y Tabla 17).

Para analizar el riesgo potencial de contaminación o afección a las aguas subterráneas que supondría la puesta en explotación de estas dos granjas porcinas es necesario analizar los siguientes aspectos: tratamiento y almacenamiento de los purines en las instalaciones de cada granja, empleo de los purines para abono en agricultura en parcelas próximas a las captaciones de abastecimiento urbano, y afecciones al caudal de los sondeos de abastecimiento por las extracciones de agua para las necesidades de las explotaciones porcinas.

A.- Tratamiento y almacenamiento de los purines en las instalaciones de cada granja.

En la granja, identificada con el número 5 en el Mapa 2 y en la tabla 17, con capacidad para 400 hembras reproductoras para la producción de lechones de destete con un peso de 5-6 kg, se construirá, además de la nave ya existente, una nave de gestación y otra de partos que, en proyecto, tienen un foso de deyecciones central que se dispone longitudinalmente y con inclinación con el objetivo de recoger las deyecciones sólidas y líquidas. La capacidad de almacenamiento temporal en estos fosos de deyecciones interiores se complementa con un foso de almacenamiento de estiércoles fluidos externo a las naves, que tiene una capacidad de almacenamiento de 400 m³. La producción de purines prevista es de 10 m³/día, lo que supone una capacidad de



Granja Avícola Velasco. En primer plano el sondeo de abastecimiento San Bartolomé (9).

almacenamiento de 40 días, en lugar de los 120 días que se indican en el informe de evaluación de impacto ambiental (González Manso y Giráldez Cebollos-Escalera, 1998 a) aportado por sus promotores. Esa capacidad sería suficiente si se cumpliesen las previsiones sobre calendario de abonado indicadas en el informe, lo cual no depende del titular de las explotaciones porcinas.

Cualquier fuga o rebose en dichas fosas, pese a las medidas contempladas para su construcción en el proyecto, probablemente producirá una contaminación del acuífero que podría afectar al sondeo de abastecimiento denominado Puente Alzado (172020001), ubicado a sólo 100 metros de la granja (Fotografía 10), lo cual se comprobará al aplicar los distintos métodos que se emplean para definir los perímetros de protección de las captaciones de abastecimiento urbano.

En la granja identificada con el número 11 en el Mapa 2 y en la tabla 17, destinada a cría y cebo de ganado porcino, se prevé la construcción de cuatro naves.

La primera de las naves, destinada a la recepción de los lechones procedentes de la granja de producción antes analizada, tendría una capacidad para 400 cabezas hasta que alcancen los 10-12 kg. La segunda, nave de cría, con capacidad para 800 cabezas hasta alcanzar los 45 kg de peso. La tercera y cuarta se destinarían al engorde, con capacidad de 1.200 plazas en cada una. En estas últimas, se completará

el proceso de engorde del ganado hasta los 95-100 kg/cabeza.

El sistema de recogida y almacenamiento de estiércoles es similar al indicado en la otra granja, es decir fosos interiores en cada nave con el objetivo de recoger las deyecciones sólidas y líquidas. La capacidad de almacenamiento temporal en esos fosos interiores se complementa con un foso de almacenamiento de estiércoles fluidos externo a las naves, de sección circular, que tiene una capacidad de almacenamiento de 962 m³. La producción de purines prevista es de 18 m³/día, lo que supone una capacidad de almacenamiento de 53 días, en lugar de los 140 días que indican en el informe de evaluación de impacto ambiental (González Manso y Giráldez Cebollos-Escalera, 1998 b). Igual que se indicó antes, esa capacidad sería suficiente si se cumpliesen las previsiones sobre calendario de abonado, pero ello no depende del titular de las explotaciones porcinas.

Como en el caso anterior cualquier fuga o rebose en dichas fosas, pese a las medidas proyectadas para su construcción, probablemente produciría una contaminación del acuífero que podría afectar al sondeo de abastecimiento denominado San Bartolomé (172020004), al estar la explotación porcina a sólo 100 metros, y al sondeo Puente Alzado situado a 1.400 m, debiéndose analizar esta posibilidad al aplicar los distintos métodos que se emplearán para definir los perímetros de protección de las captaciones de abastecimiento urbano.

Tabla 17: Características y evaluación del potencial contaminante de las actividades ganaderas existentes en el término municipal de Villacastín.

Número de referencia (Mapa 2)	Tipo de Ganado	Clase de explotación	Número de cabezas	Estiércol producido (t)	Composición del estiércol			DBO ₅ (kg/año)	Población equivalente (hab)	Observaciones Otros datos
					N (kg)	P ₂ O ₅ (kg)	K ₂ O (kg)			
1	Ovejas	Extensiva	600	288	2.362	605	2.390	15.000	548	
2	Ovejas	Extensiva	600	288	2.362	605	2.390	15.000	548	
3	Ovejas	Extensiva	600	288	2.362	605	2.390	15.000	548	
4	Caballos	Intensiva	10-20	96	643	221	691	4.000	46	Encerradero de El Santo
5	Cerdos	Intensiva	400 reproductoras lechones hasta 6 kg	3.650 m ³ purines (Inf.Proyecto)	Nt 7.610 kg Inf. Proyecto N orgánico=2.283 kg N amoniacal=5.327 kg	8030 kg Inf. Proyecto	10.220 Inf. Proyecto	18.000	658	Solicitud explotación (Sociedad Cañada del Abad). Fase 1. No está en funcionamiento (nov 2001). Los edificios si están construidos
6	Ovejas	Extensiva	800	384	3.149	806	3.187	20.000	731	
7	Chotos	Intensiva	300-400	2.660	9.044	3458	9.576	128.000	4.676	
8	Yeguada	Intensiva	30-40 madres	192	1.286	442	1.382	8.000	292	
9	Matadero	Intensiva	----	----	----	----	----	----	----	Matadero municipal de Villacastín
10	Gallinas	Intensiva	60.000	2.400	48.000	55.200	28.800	96.000	3.507	Explotación avícola Velasco S.L.
11	Cerdos	Intensiva	3.600: 400 lechones 800 recría 2.400 cebo	6.570 m ³ purines (Inf.Proyecto)	Nt 24.185 kg Inf. Proyecto N orgánico=7.256 kg N amoniacal=16.930 Kg	14.454 kg Inf. Proyecto	18.396 Inf. Proyecto	162.000	5.918	Solicitud explotación (Sociedad Cañada del Abad). Recría y cebo. Fase 2 y 3. No está en funcionamiento (nov 2001) ni hay edificios
12	Cerdos	Intensiva	140	22.994 m ³	85.080	50.588	64.386	6.300	230	Solicitud de puesta en explotación. No hay instalaciones ni ganado (Noviembre 2001)
13	Vacas Cabras	Extensiva	10-20	133	452	173	479	6.400	234	
			450	216	1771	454	1.793	13.500	493	
14	Ovejas Gallinas	Extensiva	100	48	394	101	398	2.500	91	Es parte de las instalaciones del aeródromo particular de 6 pistas
		Intensiva	20	0,8	16	18	9,6	32	1	
15	Ovejas	Extensiva	400	192	1.574	403	1.594	10.000	365	
16	Chotos	Extensiva	40-50	332	170	432	1.195	16.000	584	
17	Chotos	Extensiva	150	997	510	1.296	3.589	48.000	1.753	
18	Chotos	Extensiva	150	997	510	1.296	3.589	48.000	1.753	
19	Ovejas Chotos	Extensiva	450	216	1.771	454	1.793	11.250	411	
			30	199	102	259	716	9.600	351	
20	Vacas	Extensiva	150	997	3.390	195	3.589	48.000	1.753	
21	Vacas	Extensiva	150	997	3.390	195	3.589	48.000	1.753	
22	Gallinas	Intensiva	10.000	400	8.000	9.200	4.800	16.000	584	Naves.
23	Ovejas Vacas	Extensiva	200	96	787	202	797	5.000	183	
			30-40	266	136	346	958	12.800	468	
24	Cerdos	Intensiva	70 madres	11.497 m ³	42.540	25.294	32.193	3.150	115	Única en activo en el término municipal en noviembre de 2001
25	Vaca lechera	Extensiva	80	532	272	692	1.915	25.600	935	Son tres explotaciones en el casco urbano muy próximas. Son 80 vacas entre las tres
26	Ovejas	Extensiva	300	144	1.181	302	1.195	7.500	274	
42	Criadero de perros de presa	Intensiva	25-50	---	---	---	---	---	---	No ha sido posible acceder a las instalaciones

Fuente: Martínez Navarrete, 2002

B.- Transporte y empleo de los purines para abono en agricultura en parcelas próximas a las captaciones.

En los informes de evaluación de impacto ambiental, para las dos explotaciones porcinas se detallan las parcelas en las que se emplearían como abono agrícola los purines almacenados en las instalaciones antes indicadas (Mapa 3). El purín empleado en diversas parcelas seleccionadas, supone un riesgo de

contaminación del acuífero del terciario detrítico agravado por el hecho de que no se efectúe un tratamiento de esterilización del mismo, que podría afectar a tres captaciones de abastecimiento urbano, sondeos Puente Alzado (172020001), San Bartolomé (172020004) y Cañada del Abad (172020003), a lo que hay que añadir el riesgo puntual existente en las operaciones de vaciado de las fosas de purines y durante el transporte a las parcelas todos los meses del año empleando la cuba distribuidora.



Sondeo de abastecimiento Puente Alzado, al fondo explotación porcina (10).

Por su parte las explotaciones existentes en granitos también podrían verse afectadas por el empleo de purines en diversas parcelas.

C.-Afección al caudal de los sondeos de abastecimiento urbano.

En los informes de evaluación de impacto ambiental elaborados para las dos explotaciones porcinas (5 y 11 del Mapa 2) no se indica el volumen de agua necesario para su puesta en explotación ni su procedencia. Debería conocerse si va a realizarse en base a alguna captación de aguas subterráneas, y en este caso sus características y régimen de explotación previsto. Este aspecto puede tener influencia, puesto que su proximidad a las captaciones de abastecimiento urbano hace necesario comprobar si existiría afección a los caudales aprovechados en éstas, puesto que captarían el mismo acuífero.

– *Granja de ovejas (número 6 del Mapa 2 y Tabla 17) y Granja de Chotos (número 7 del Mapa 2 y Tabla 17).*

Estas granjas ubicadas una junto a la otra (Fotografía 2) presentan un elevado riesgo de contaminación al haberse estimado (como se detalla en la tabla 17) que supondrían una población equivalente de 731 y 4.676 habitantes respectivamente y estar ubicadas a tan solo 250 metros al sur del sondeo Cañada del Abad (172020003) de abastecimiento a Villacastín.

– *Criadero de perros de presa (número 42 del Mapa 2 y Tabla 17) y parcelas con abrevadero y gran acumulación de estiércol (Mapa 2).*

Estos focos de contaminación se analizan conjuntamente dada su interrelación y proximidad.

Entre el límite de las instalaciones del criadero de perros y a lo largo de los escasos 150 m del camino con dirección noroeste conduce directamente al Pozo de la Rejilla se suceden diferentes focos potenciales de contaminación. Estos son: parcela con gran acumulación de estiércol que rodea un pequeño lago (Fotografía 11). Un abrevadero, también con gran acumulación de estiércol a su alrededor, y por último otros dos lagos contiguos que se prolongan varias decenas de metros ya al nordeste de la captación (Fotografía 12). Los lagos recogerían los lixiviados de todo este conjunto que constituye un posible origen de la contaminación detectada en el pozo de la Rejilla de abastecimiento al municipio de Villacastín.

En este, como se indicó en el apartado 6.1.5.2., se sobrepasa los valores de concentración máxima admisible, indicada en la Reglamentación Técnico Sanitaria para el abastecimiento y control de calidad de las aguas potables de consumo público (1990), respecto al contenido en magnesio (con valores de 54 mg/L siendo el máximo valor admisible de 50 mg/L), presentando además altos valores de conductividad y cloruros.



Parcela con gran acumulación de estiércol y un lago (entre los árboles). Al fondo (norte) ubicación del pozo de abastecimiento de la Rejilla (11).



Vista del Lago desde su extremo norte. Al fondo (sur) ubicación del pozo de abastecimiento de la Rejilla (12).

Focos potenciales de contaminación industriales

Los focos potenciales de contaminación industriales en el término municipal están constituidos, como se indica en el Mapa 2, por las siguientes actividades:

– Estaciones de servicio:

Existen cinco gasolineras, tres en la N-VI, en las inmediaciones de la localidad de Villacastín (números 27, 28 y 29, en el Mapa 2), y dos en el área de servicio de la autopista A-6 (números 30 y 31, en el Mapa 2).

– Industrias:

Únicamente existen dos fábricas, que están ubicadas en el centro del casco urbano. Son la "Fábrica de embutidos y carnes la Mari Antonia" y la "Fábrica de harina Santa Margarita" (identificadas con los números 32 y 33 respectivamente en el Mapa 2).

– Almacén de materiales:

Hay un almacén de materiales de construcción (número 34 en el Mapa 2) ubicado en una amplia explanada en el límite oeste del casco urbano, en el cual se depositan materiales inertes, por lo que carece de elementos para la recogida de lixiviados.

– Aserradero de granitos y mármoles:

Sólo hay un aserradero en la localidad, "Granitos y mármoles Prados Quemada" (número 35 en el Mapa 2), ubicado en suelo no urbanizable y declarado fuera de ordenación, pero en el que se permite llevar a cabo obras de consolidación, aumento de volumen y modernización.

– Canteras:

En la localidad de Villacastín las canteras graníticas tienen gran tradición. En el paraje conocido como El Vadillo (número 36 en el Mapa 2) se localiza un área de aproximadamente 22,8 km², con una roca de buena calidad a pocos metros de la superficie, con unas reservas grandes sobre las que se localizan dos canteras activas y varias inactivas o abandonadas. Se trata (Pérez González *et al.*, 1990) de explotaciones sobre adamellitas biotíticas de color gris, tamaños de grano medio y textura granuda. La roca es muy sana ya que la meteorización afecta sólo a sus primeros centímetros. El diaclasado es escaso y ortogonal, lo que permite la extracción de bloques de gran tamaño, de unos 3 x 2 x 2 m³ de media.

Focos potenciales de contaminación urbanos

Los focos potenciales de contaminación urbanos, cuya ubicación se indica en el Mapa 2, son los siguientes:

– Vertedero de residuos sólidos urbanos.

Hay un vertedero a unos 2 km al este del casco urbano en el límite del término municipal (número 37 en el Mapa 2). Está ubicado en granitos, en él se vierten exclusivamente las basuras generadas en la localidad de Villacastín. Los vertidos se realizan sin clasificar, quemándose la basura. No dispone de ningún sistema de recogida de efluentes y carece de vallas y de sistemas que limiten el acceso al mismo.

El volumen de residuos sólidos urbanos puede estimarse, para poblaciones con menos de 20.000 habitantes, en 0,55 a 0,6 kg/hab/día (Fernández Ruiz *et al.*, 1990). En el caso de Villacastín con una población de derecho de 1.514 habitantes, que se estima puede duplicarse en el período estival, esto supondría del orden de 375 toneladas al año. De ellas puede suponerse que 202 t corresponden a materia orgánica, 74 t a papel-cartón, 22 t a vidrio, 21 t a plásticos, 21 t a escombros y cenizas, 12 t a metales, 10 t a madera y 12 t a textiles.

– Almacén de contenedores de basura

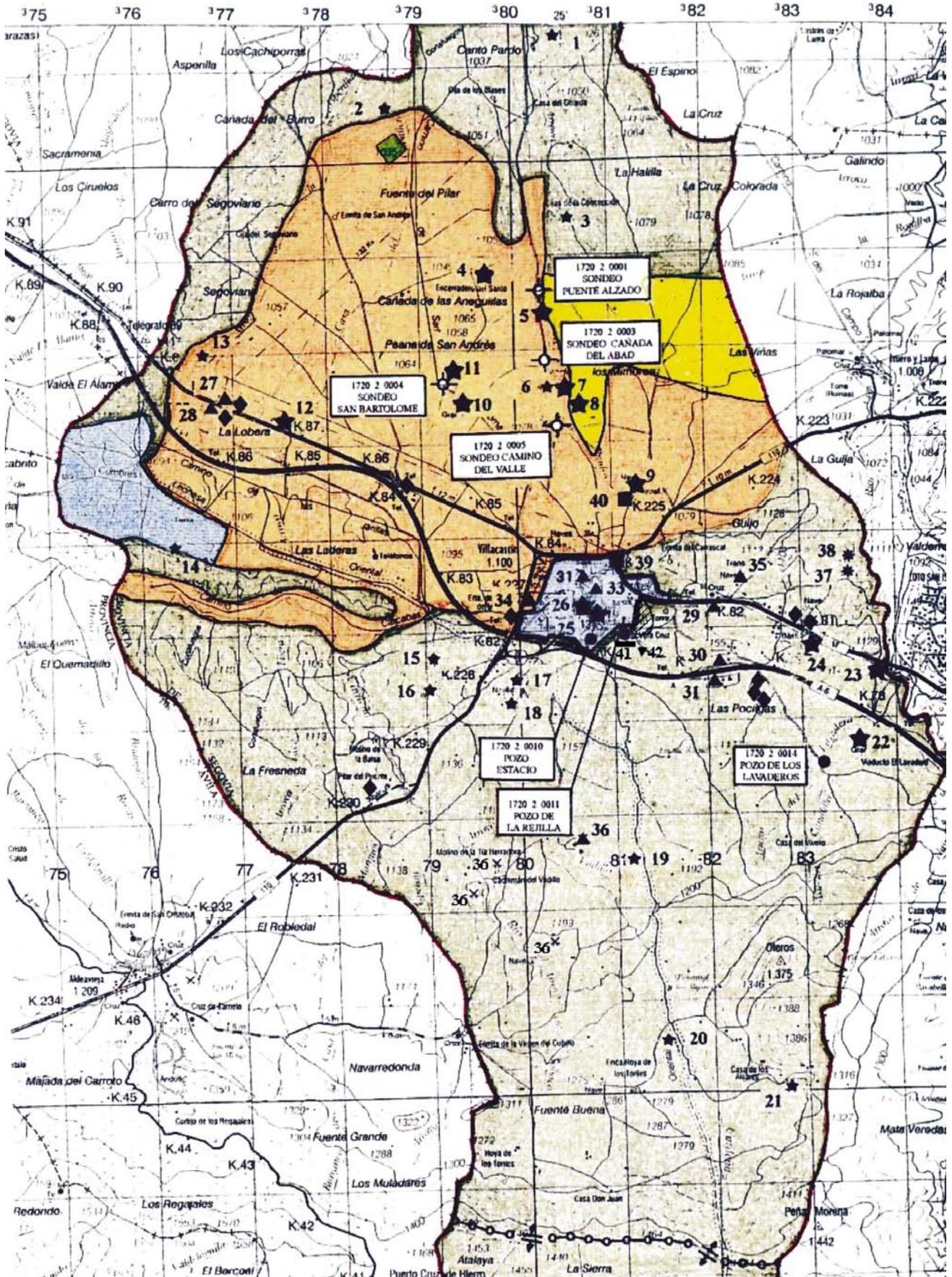
En el límite sudeste del casco urbano en la parcela colindante con el pozo de la Rejilla, de abastecimiento a la población, se almacenan los contenedores de basura de la localidad sin existir ninguna medida de protección y siendo frecuente restos de basura a su alrededor.

– Vertedero de escombros.

Ubicado (número 38 en el Mapa 2) junto al vertedero de residuos sólidos urbanos, también en granitos. No está vallado ni dispone de ninguna medida ni sistema de control del tipo de escombros vertidos.

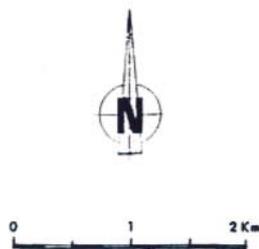
– Cementerio.

La localidad dispone de un cementerio (número 39 en el Mapa 2) ubicado en el límite nordeste de la población, que permite cubrir las necesidades de enterramiento para su población que, como se detalló anteriormente, es en el año 2001 de 1.514 habitantes y alcanzó un máximo de 1.734 habitantes en 1970, predominando el enterramiento en fosas.



Modificado de Martínez Navarrete y García García, 2001 a

Mapa 2: Mapa de focos potenciales de contaminación: agrícolas, ganaderos, industriales y urbanos.



LEYENDA

FOCOS POTENCIALES DE CONTAMINACIÓN AGRÍCOLAS

CARTOGRAFÍA DE CULTIVOS. TERRENOS

-  Sin cultivos: Montes y prados
-  Cultivo de secano: Trigo y Cebada
-  Cultivo de regadío: Fresas
-  Cultivo de secano en barbecho (octubre 2001)
-  Terrenos urbanos
-  Aeródromo e instalaciones anexas

FOCOS POTENCIALES DE CONTAMINACIÓN GANADEROS

Número de identificación 1 al 26

-  Actividad ganadera intensiva: Granjas, matadero
-  Actividad ganadera extensiva: Granjas
-  Abrevadero, estiércol y presas
-  Criadero de perros de presa (42)

FOCOS POTENCIALES DE CONTAMINACIÓN INDUSTRIALES

Número de identificación 27 al 36

-  Gasolinera (27, 28, 29, 30, 31). fábrica (32, 33)

Almacén material (34), aserradero granitos y mármoles (35), cantera (36)

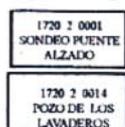
FOCOS POTENCIALES DE CONTAMINACIÓN URBANOS

Número de identificación 27 al 36

-  Vertedero R.S.U. (37). vertedero escombros (38)
-  Cementerio (39), depuradora (40)
-  Fosa séptica
-  Almacén de contenedores de basura (41)

 Límite de término municipal de Villacastín

 Divisoria hidrogeológica



 Sondeo de abastecimiento, número de identificación y nombre

 Pozo de abastecimiento, número de identificación y nombre



Depuradora de Villacastín (13).

– *Depuradora (número 40 del Mapa 2).*

Como se indicó previamente la depuradora existente (Fotografía 13), construida en una primera fase en 1982 y terminada en 1992 es de tratamiento secundario. Desde abril de 1999 está funcionando en pruebas, no encontrándose aún operativa en octubre de 2001, como demuestra el que persisten los malos olores en el arroyo de los Prados al que se vierten sus efluentes.

– *Red de alcantarillado.*

La red de alcantarillado, construida en 1942 y ampliada en fechas posteriores para extenderla a las nuevas calles incorporadas al casco urbano, cubre la mayor parte de la población al no existir urbanizaciones en el término municipal, por lo que sólo quedan fuera del casco urbano, y por tanto fuera de la red de alcantarillado, algunas casas y restaurantes que disponen de fosas sépticas.

– *Fosas sépticas.*

En el Mapa 2 se indica la ubicación de las fosas sépticas que corresponden a casas aisladas y a pequeños hostales o restaurantes ubicados junto a las carreteras.

7.2. Vulnerabilidad de las diferentes zonas

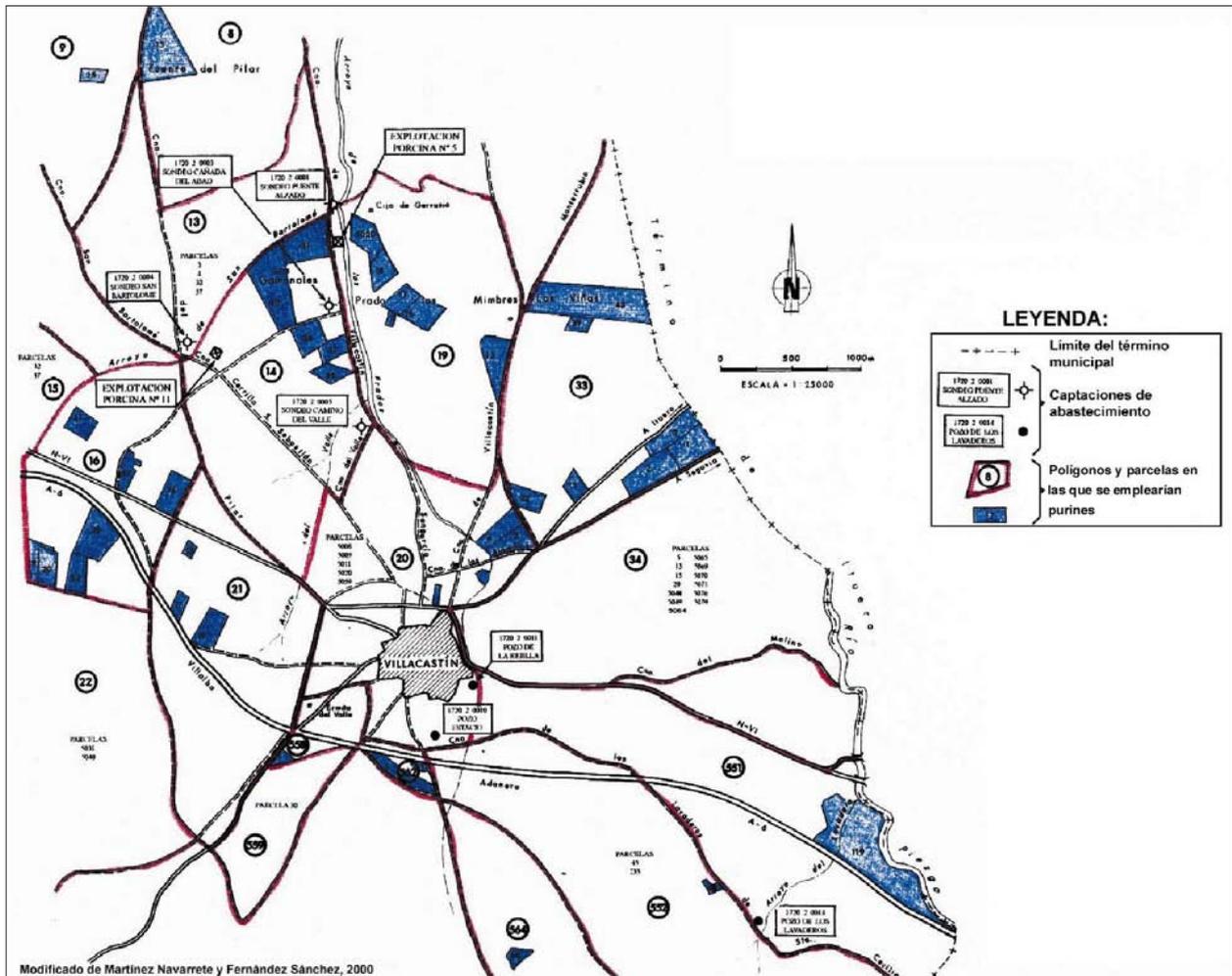
El acuífero del terciario detrítico, constituido por una serie de lentejones de arenas y gravas de extensión

variable incluidos en una matriz areno-limo-arcilloso de naturaleza semipermeable que relaciona hidráulicamente dichos lentejones, presenta una alta vulnerabilidad frente a la contaminación.

Estos materiales ocupan toda la extensión del término municipal al norte de la población y son captados por cuatro sondeos como ha sido detallado en apartados precedentes. La influencia de las actividades agrícolas existentes en el entorno de los sondeos, especialmente el efecto del abonado de los cultivos, en estos materiales de alta vulnerabilidad frente a la contaminación se pone de manifiesto en los contenidos de nitratos detectados en los sondeos de abastecimiento con concentraciones de 14, 26 y 36 mg/L en los últimos análisis químicos disponibles.

En el resto del término municipal, al sur de la población hay diversos pozos de gran diámetro y escasa profundidad que captan los aportes procedentes de la red de fracturas existentes y el material de alteración de los granitos, de escasa potencia en la zona, presentando una vulnerabilidad frente a la contaminación alta que junto a la existencia de actividades contaminantes en dichos materiales ha producido la contaminación detectada en el Pozo de la Rejilla.

El empleo de índices de vulnerabilidad como herramienta de apoyo para delimitar los perímetros de protección y su idoneidad para esta finalidad, en función del medio analizado (porosidad intergranular, kárstico o fisurado), será analizado en los capítulos 7 y 8.



Mapa 3: Mapa de las parcelas del entorno de las captaciones en las que se emplearían purines procedentes de dos explotaciones porcinas (números de identificación 5 y 11 del Mapa 2 y Tabla 17).

8. Planeamiento urbanístico

Para el análisis de la ordenación del territorio en el municipio efectuado en este trabajo se empleará la revisión de las normas subsidiarias de Villacastín (Ayuntamiento de Villacastín, 1994), que habían sido aprobadas por la Comisión Provincial de Urbanismo de Segovia. Dicha revisión recibió diligencia de acuerdo de aprobación provisional el 1 de septiembre de 1994 si está aún pendiente de su adaptación a la Ley 6/1998, de 13 de abril, sobre régimen de suelo y valoraciones (BOE, 1998 a) de ámbito estatal y a la Ley 5/1999, de 8 de abril, de urbanismo de Castilla y León (BOCYL, 1999).

En la figura 17 se muestra la distribución del suelo según las calificaciones reflejadas en las normas urbanísticas.

Estas contemplan los siguientes tipos de suelo:

"a) *Suelo urbano*, es aquel suelo consolidado por su urbanización y/o edificación, que, de conformi-

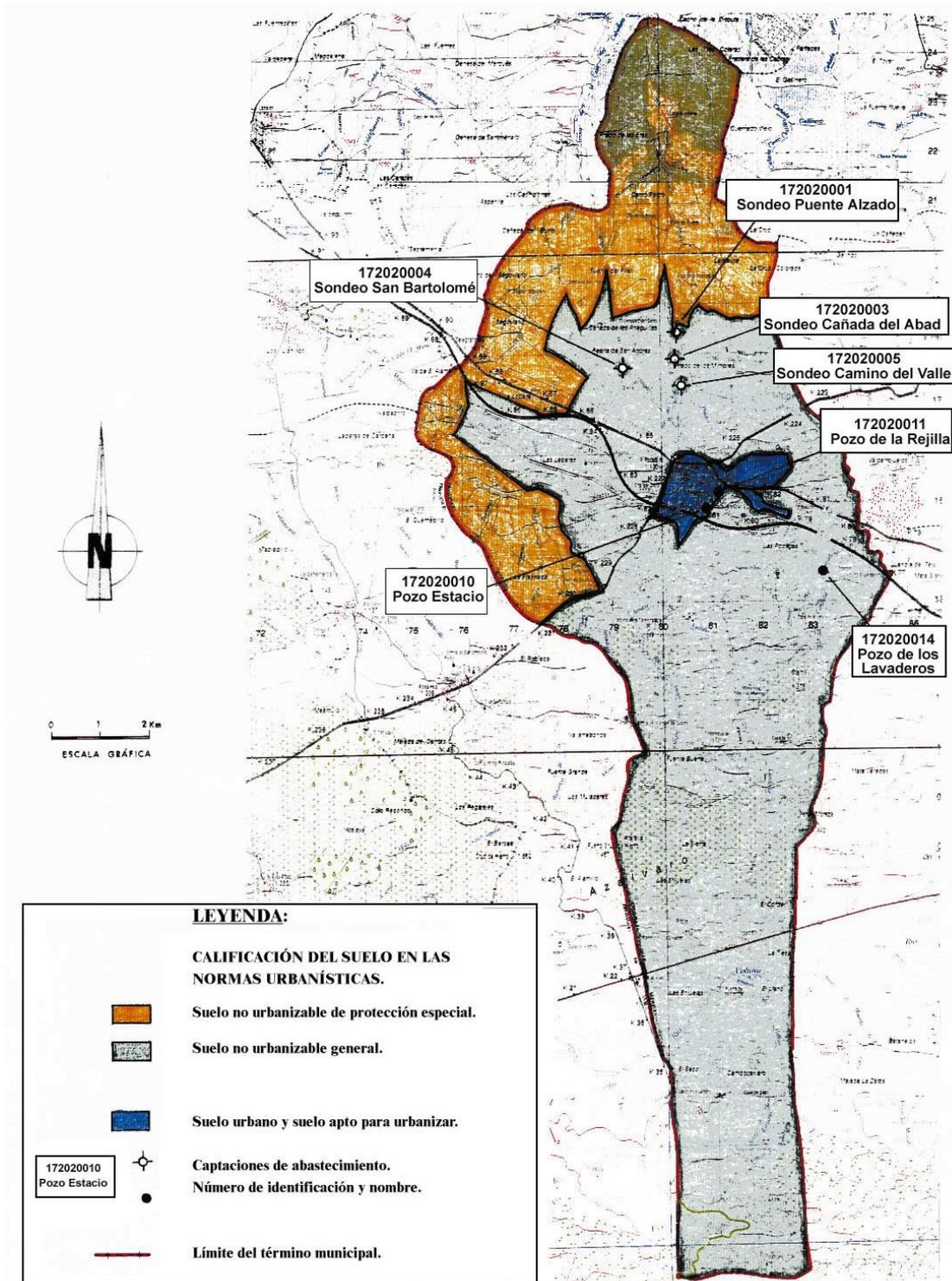
dad la Ley del Suelo, se delimita en los planos respectivos.

- b) *Suelo apto para la urbanización*, o urbanizable, es aquel suelo apto para su transformación en suelo urbano mediante la previa formulación y ejecución de los correspondientes Planes Parciales y Proyectos de Urbanización, según las especificaciones de las presentes Normas.
- c) *Suelo no urbanizable*, es aquel que se declara no apto para la urbanización o con limitaciones, y que no se halla incluido en ninguno de los dos supuestos anteriores."

Se distinguirán dos clases de suelo no urbanizable (artículo 78 de las normas urbanísticas):

- No urbanizable general.
- No urbanizable de protección especial.

Las siete captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín están ubicadas en suelo calificado como



Fuente: Modificado de Martínez Navarrete y Fernández Sánchez, 2000.

Modificado de Martínez Navarrete y Fernández Sánchez, 2000

Figura 17: Normas subsidiarias de Villacastín.

“no urbanizable general” y aunque en el caso del sondeo Puente Alzado se esté en el límite con zonas de “suelo no urbanizable de protección especial” el área de alimentación, de los cuatro sondeos existentes en el acuífero en materiales detríticos del Terciario y Cuaternario, objeto protección, está en su totalidad incluida en “suelo no urbanizable general”.

Es decir, las limitaciones que se impongan en el área definida por los perímetros de protección en los cuatro sondeos de abastecimiento urbano Puente Alzado, San Bartolomé, Cañada del Abad y Camino del Valle lo serían en suelo que tienen una calificación de “suelo no urbanizable general”.

No obstante, y a la vista de las modificaciones introducidas en la clasificación del suelo por la Ley 6/1998, de 13 de abril, sobre Régimen del Suelo y Valoraciones (BOE, 1998 a), el mantenimiento como "suelo no urbanizable" del área definida por los

perímetros de protección requeriría dotarlos de un régimen especial de protección (art. 9 de la Ley), lo que vendría justificado por la necesidad de establecer limitaciones para la protección del dominio público hidráulico.

ANEXO II

Perdurabilidad de la contaminación en el agua subterránea

El criterio más empleado para la definición de perímetros de protección es el tiempo de tránsito que, como ya se analizó, fundamenta su mecanismo de acción en asegurar que antes de llegar el contaminante a la captación pasará un tiempo suficiente para su degradación o inactivación. En este anexo se recogen tablas y datos, tomados de Moreno Merino *et al.*, 1991, que permiten conocer y cuantificar la dinámica de la mitigación de los contaminantes en el interior del acuífero.

Perdurabilidad de la contaminación bacteriológica

El origen de la contaminación bacteriológica del agua subterránea es muy heterogéneo, pudiendo considerarse:

- Industrias alimentarias (mataderos, fábricas de conservas, fábricas de embutidos, etc..).
- Explotaciones ganaderas.
- Industrias en general (vertidos de vinazas, procesamiento de grasas, etc..).
- Vertidos urbanos, líquidos (alcantarillado) y sólidos (vertederos incontrolados).

Los vertidos industriales en general producen un gran volumen de bacterias pero muy pocas especies son patógenas para el hombre, mientras que en los vertidos urbanos, además de su gran volumen está el factor añadido de presentar una enorme variedad de especies parásitas. En las tablas y figuras de este anexo se analizan en detalle las tasas de supervivencia de los parásitos más fácilmente encontrables en el agua subterránea.

Es preciso tener en cuenta que algunos de estos organismos encuentran en el medio hídrico una parte natural de su ciclo biológico, por lo que su permanencia en el agua será mucho mayor.

La cinética de degradación (eliminación en bacterias, inactivación en virus) sigue generalmente una ley exponencial del tipo:

$$C_t = C_0 \exp[-\lambda t(t - t_0)]$$

donde:

C_0 = Concentración inicial

C_t = Concentración a un tiempo t

λt = Constante de eliminación de bacterias o de inactivación de virus

$\lambda t = 0,693 / T$ siendo T el tiempo en el cual la mitad de bacterias o virus han desaparecido. T varía de 1 a 20 días para las bacterias y de 10 a 100 días para los virus.

A la vista de estos datos pudiera parecer que los tiempos de tránsito elegidos para dimensionar la zona próxima son excesivamente cortos, pero hay que considerar que los microorganismos no se encuentran simplemente en suspensión en el agua sino que también se van a producir fenómenos de interacción con el material que forma el acuífero como se analiza en las diversas tablas y figuras de este anexo.

Se indica a continuación la influencia que los factores medioambientales tienen en la supervivencia de los microorganismos.

Nutrientes

La ausencia de nutrientes actúa como factor limitante del desarrollo bacteriano, además en bacterias que compiten por un mismo nutriente, la de crecimiento más rápido suele desplazar al resto. En un estudio del IGME de 1990, *Estudio metodológico de los procesos de contaminación bacteriológica de las aguas subterráneas. Aplicación a los acuíferos del norte de España*, se encuentra una correlación entre el contenido en bacterias y fósforo en el agua estudiada, no obteniendo sin embargo, relación alguna con el contenido en nitrógeno.

Tabla 70: Relación de microorganismos patógenos y de enfermedades infecciosas que producen, en los que el agua es principal (A) o circunstancial (B) vehículo de transmisión.

A	Agente	Enfermedad
Grupo		
Vía de entrada oral		
Virus	– Virus A de la hepatitis – Coxackie	– Hepatitis endémica – Afecciones gastrointestinales
Bacterias	– Salmonella typhi – Salmonella paratyphy – Shigella disenteriae – Vibrio cholerae	– Fiebre tifoidea – Fiebres paratíficas – Disentería bacilar – Cólera
Protozoos	– Entamoeba histolytica	– Disentería amebiana
Vía de entrada cutáneo-mucosa (contacto)		
Virus	– Adenovirus	– Conjuntivitis de las piscinas
Ritcketsiales	– Chlamydia oculo-genitalis	– Conjuntivitis de las piscinas
Gusanos (cercanías)	– Schistostomas – Fasciola hepática – Dracúncula medinensis	– Schistosomiasis en países tropicales – Distomatosis – Dracunculosis
B	Agente	Enfermedad
Grupo		
Vía de entrada oral		
Virus	– Poliomiélfíticos – Echovirus	– Parálisis – Afecciones diversas
Bacterias	– Pasturella tularensis – Leptospira – Escherichia coli enteropatógena	– Tularemia – Leptospirosis – Colitis recién nacidos
Protozoos	– Balantidium coli – Leishmanias – Giardia lamblia	– Balantidiasis – Leishmaniasis – Lambliasis
Gusanos	– Ascaris – Tenia equinococo	– Ascariidiasis – Hidatidosis
Vía de entrada cutáneo-mucosa		
Rickettsiales	– Chlamydozoom trachomatis	– Tracoma
Bacterias	– Bacillus anthracis – Brucellas – Leptospiras	– Carbunco – Fiebre de Malta – Afecciones icterohemorrágicas

Fuente: Cabo de la Fuente y Catalán, 1972 en Moreno Merino *et al.*, 1991

Tabla 71: Resumen de los tipos y características de los microorganismos que pueden estar presentes en el agua.

Tipo	Célula	Tamaño	Forma	Nutrición	Condiciones de desarrollo		
					T	O ₂	pH
Bacterias	Procariótica	<1-2-1-4 µm	Esférica Helicoidal Cilíndrica	Autótrofa y heterótrofa	0-20°C (psicrófilas) 25-40°C (mesófilas) 45-60°C (termófilas)	Con O ₂ libre (aeróbicas) Sin O ₂ libre (anaeróbicas) Con/sin O ₂ libre (anaeróbicas facultativas)	4-9 (óptimo: 6,5-7,5)
Hongos	Eucariótica	>5 µm diámetro	Filamentosa	Heterótrofa	0-62°C (óptimo: 22-30°C)	Anaerobios estrictos Aerobios	2-9 (óptimo: 5-6)
Algas	Eucariótica	Variables	Esférica Bacilar Alargada	Autótrofa	0-90°C	Aerobias	
	Procariótica	Como las bacterias					
Protozoos	Eucariótica	>5 µm diámetro	Variable	Autótrofa y heterótrofa	16-25°C	Aerobios y anaerobios	3-9 (óptimo: 6-8)
Virus	Molécula orgánica de ácido nucleico	15-50 nm	Poliédrica Helicoidal	Se reproducen por replicación. Permanecen en estado latente hasta que encuentran una célula huésped idónea para su reproducción			

Fuente: IGME, 1990 en Moreno Merino *et al.*, 1991**Tabla 72:** Valores medios de número de bacterias por gramo de heces humanas y animales.

Tipo de Bacteria	Hombre	Bovino	Ovino
Eschericia coli	1,3·10 ⁷	7,2·10 ⁵	8,9·10 ⁵
Streptococos fecales	8,1·10 ⁸	7,5·10 ⁵	6,5·10 ⁵
Streptococos bovis	58	3,8·10 ⁵	7,1·10 ⁵
Bifidobacterias	5,6·10 ⁹	0	0
Rhodococus coprophilus	0	2,1·10 ⁴	1,2·10 ⁴
Micromonospora	0	2,5·10 ⁴	1,2·10 ⁴
Streptomices	2,6·10 ³	9,1·10 ⁴	6,5·10 ⁴

Fuente: Mara y Oragui, 1985 en Moreno Merino *et al.*, 1991**Tabla 73:** Virus humanos susceptibles de ser encontrados en medio hídrico.

Familia	Género	Especie	Número de serótipos	Excreción		Cultivo sobre células	Envuelta
				Orina	Heces		
<i>Picomaviridae</i>	Enterovirus	Virus polio	3	✓	✓	✓	
		Virus Corsackle A	23	?	✓	✓	
		Virus Corsackle B	6	✓	✓	✓	
		Virus Echo	32	?	✓	✓	
		Enterovirus nuevos	4	✓	✓	✓	
		Virus de la Hepatitis A	1	✓	✓	-	
<i>Reovirida</i>	Reovirus Rotavirus	Retrovirus humanos	3	-	✓	✓	
		Rotavirus humanos	3	-	✓	-	
<i>Adenoviridae</i>	Mastadenovirus	Adenovirus humanos	34	✓	✓	✓	
<i>Parvoviridae</i> o <i>Coliciviridae</i>	Parvovirus o Colicivirus	Agente de Norwalk	?	?	✓	-	
<i>Papoviridae</i>	Papillomavirus	Papillomavirus	15	-	-	-	

Fuente: Mathes *et al.*, 1988 en Moreno Merino *et al.*, 1991

Tabla 74: Supervivencia de los virus en las aguas subterráneas y en el suelo.

Virus	Aguas subterráneas	Suelo
Virus en general	≥28 días	-
Poliovirus	≥250 días	91-175 días
Coxsackie A5, A14	≥20 días	-
Colifagos X174, T4	≥7 días	-
Enterovirus	-	15-25 días en suelo seco
Echovirus 1	-	21 días en suelo seco

Fuente: Benito de Santos, 1987 en Moreno Merino *et al.*, 1991

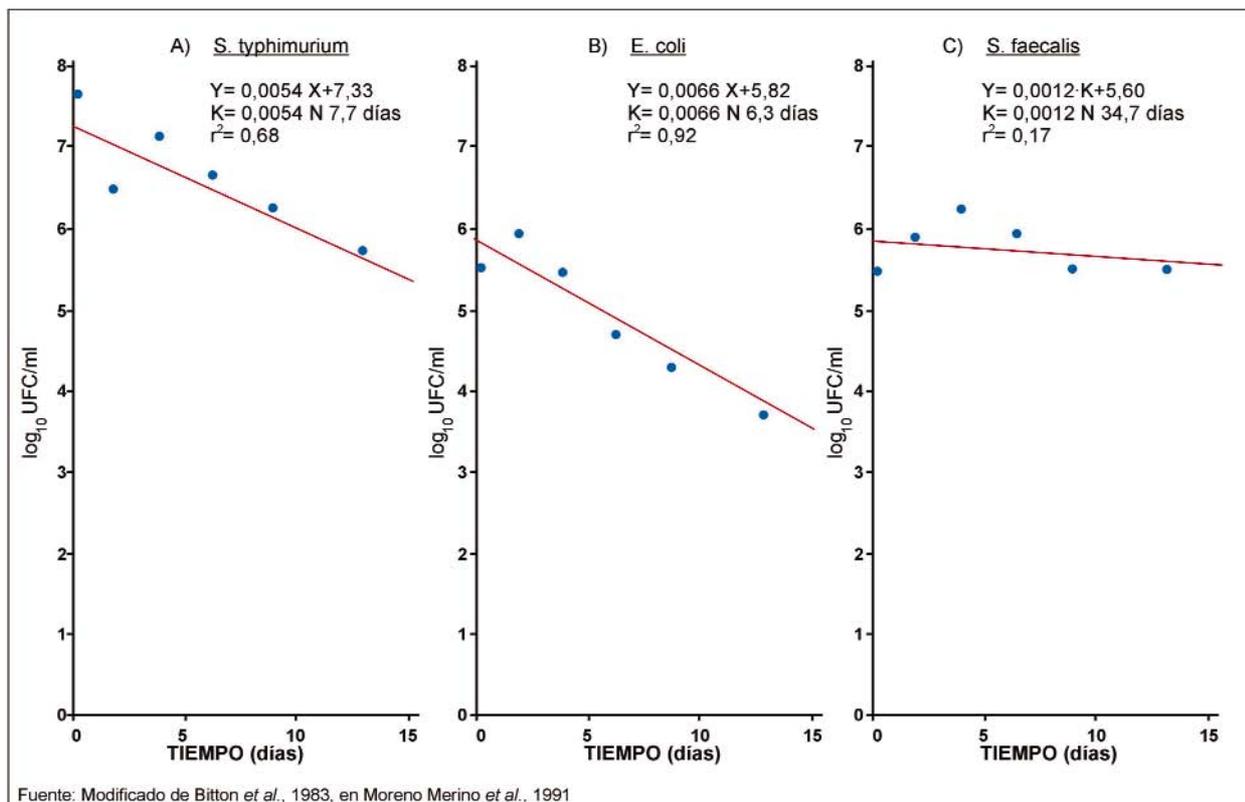


Figura 82: Supervivencia de varios tipos de bacterias (S. Typhimurium, S. Fecales y E. Coli) en aguas subterráneas (K es la velocidad de semidesaparición de los microorganismos).

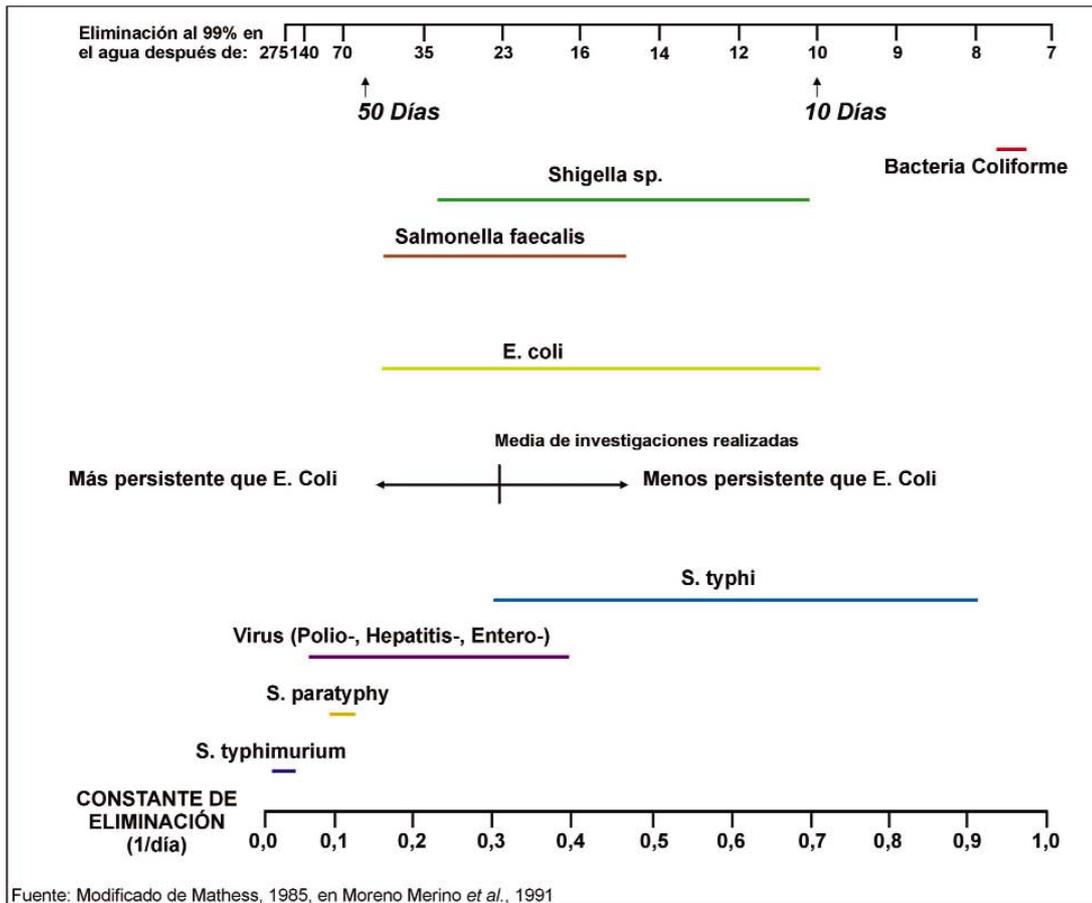


Figura 83: Constante de eliminación y eliminación al 99,9% de las principales bacterias y virus en el agua subterránea.

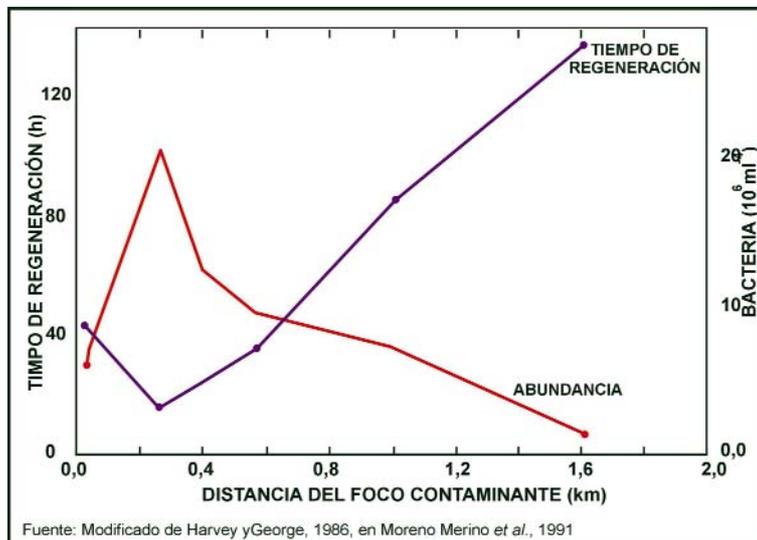


Figura 84: Variación del contenido en bacterias y de su tiempo de regeneración en las aguas subterráneas.

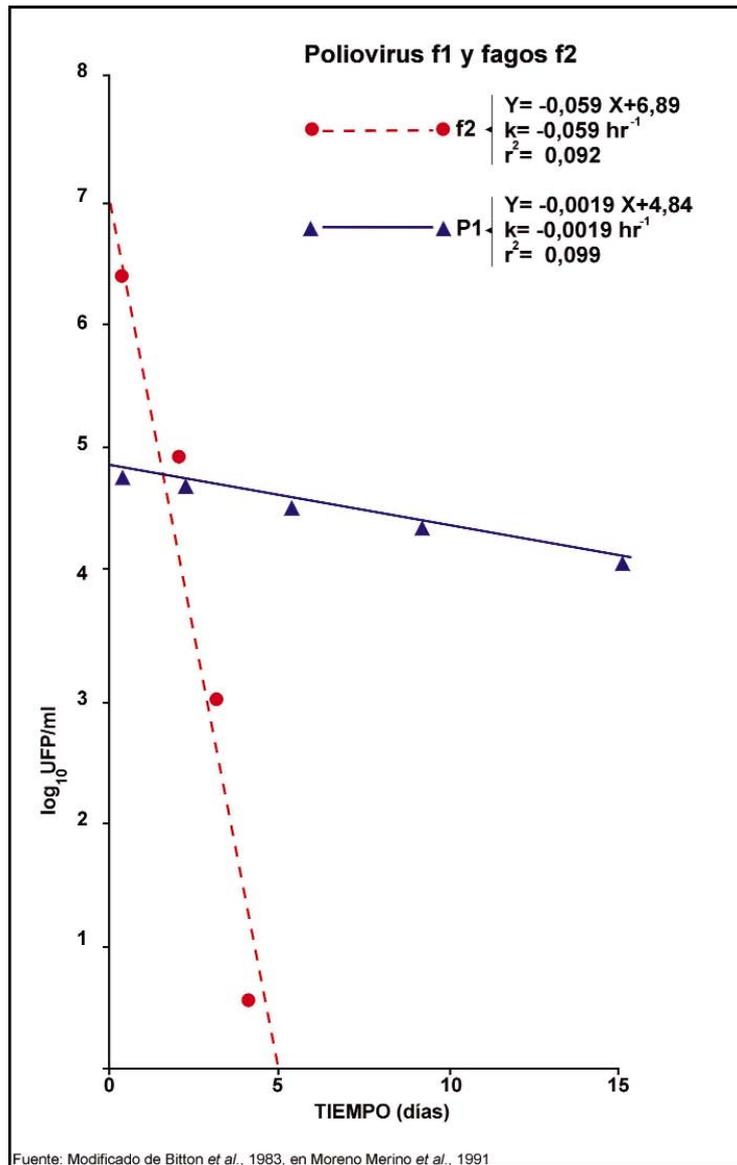


Figura 85: Supervivencia en aguas subterráneas de dos tipos de virus (Poliovirus 1 y bacteriofagos).

Temperatura

La temperatura influye de forma directa sobre la tasa metabólica bacteriana, aumentando ésta con la temperatura.

Temperatura (°C)	Tiempo de regeneración (horas)
0	18,4
6	7,0
12	2,7
25	0,77
30	0,69

Cada organismo tiene un margen de temperaturas en el cual es posible su vida y temperaturas superiores a estas son letales al causar daños irreparables en

su citoplasma. Las temperaturas por debajo del margen raramente causan la muerte de la bacteria pero provocan un estado "latente" en el cual no se multiplican.

Las bacterias parásitas del hombre encuentran en el agua subterránea un medio hostil, desapareciendo de forma más rápida al elevarse la temperatura, así los coliformes fecales desaparecen según una ley:

$$C = C_0 \cdot e^{-K \cdot T}$$

variando el factor K con la temperatura de acuerdo con la fórmula:

$$K = K_{20^\circ\text{C}} \cdot 1,047^{(T^\circ\text{C} - 20)}$$

Humedad

Las bacterias se encuentran mejor en terrenos con cierta capacidad para retener la humedad y la mayor parte mueren rápidamente con la desecación. No obstante existen especies que mediante la formación de esporas son capaces de resistir condiciones de desecación (V.G. Clostridium S.P.).

pH y potencial redox

La mayoría de las bacterias crecen sólo entre pH 4 y 9, aunque el óptimo está entre 6.5 y 8.5 que corresponde al rango de pH de las aguas naturales.

El potencial redox del agua y de los sedimentos tienen también una gran importancia ecológica requiriendo los grupos bacterianos muy diferentes condiciones de óxido-reducción. Así las bacterias aerobias requieren más altos valores de Eh que las anaerobias. La actividad bacteriana puede modificar el potencial redox del agua, por ejemplo al variar su contenido en oxígeno.

Luz

La luz solar tiene efectos inhibidores sobre bacterias no pigmentadas influyendo factores tales como la intensidad de la radiación y la turbidez del agua. Los efectos de la luz se ven modificados por otros factores como la temperatura.

Presión hidrostática

El gradiente de presión hidrostática es aproximadamente de una atmósfera cada 10 metros de profundidad. La mayor parte de las bacterias de suelos y aguas dulces no crecen a presiones superiores a doscientas atmósferas, aunque existen bacterias barófilas con óptimos cerca de las 500 atmósferas.

Experimentos realizados sobre E. Coli muestran que es capaz de sobrevivir perfectamente a sobrepresiones de 1.000 atmósferas. No obstante estas elevadas presiones provocan cambios morfológicos, disminución de la movilidad y modificación en la multiplicación al alterar las características del ADN.

Turbidez

La turbidez del agua puede deberse a varias causas:

- Partículas finas de origen mineral.
- Detritus constituidos por material inorgánico y orgánico.
- Microorganismos.

Las partículas orgánicas llevan una importante flora bacteriana y micótica en su superficie empleando la partícula como sustrato nutritivo. También las partículas minerales adsorben nutrientes en su superficie, encontrando allí los microorganismos un medio adecuado para su vida.

Puede constatarse que cuando un aumento de turbidez lleva parejo un aumento del número de bacterias se debe a materia orgánica en suspensión, si el aumento de turbidez no influye o lo hace de forma escasa sobre el número de bacterias se debe a materia inorgánica.

Materia inorgánica

La salinidad (es decir, la presión osmótica) influye de forma considerable en el tipo de microorganismos que pueblan el agua, existiendo óptimos en un amplio rango (desde bacterias halófilas estrictas, marinas, a bacterias de agua dulce que no soportan concentraciones mayores de un 1 %).

En general las bacterias de agua dulce viven en un rango óptimo de 10 a 50 gr de sales.

En vertidos urbanos y lagos contaminados se encuentran con frecuencia bacterias tolerantes a las sales (hasta 15-25%).

El amonio y nitrito juegan un papel importante en el suministro de energía a las bacterias nitrificantes, capaces de producir una desnitrificación bajo condiciones anaerobias.

Algunos metales pesados parecen tener un efecto bactericida (Cu, Hg, Ag, etc).

Gases

La mayoría de los microorganismos acuáticos son anaerobios facultativos (se adaptan a condiciones de presencia o ausencia de oxígeno) y según parece las fluctuaciones del contenido de oxígeno no afectan de forma considerable a la vida de bacterias aerobias obligatorias, que sólo se verán frenadas en su desarrollo por presiones parciales de oxígeno muy bajas. Sin embargo algunos organismos microaerófilos son inhibidos por concentraciones altas de oxígeno.

Existe un grupo de bacterias que emplean el metano como fuente de energía, mediante procesos de oxidación; otras emplean el SH, que es generalmente tóxico para el resto.

No debe olvidarse que las bacterias patógenas se encuentran en el suelo en un entorno extraño,

donde existe un fuerte competencia con las pobladoras naturales de este medio, por ello la permanencia es mayor por ejemplo es suelos previamente esterilizados.

Al discurrir por el acuífero se producen fenómenos de filtración que pueden llegar a eliminar totalmente los contaminantes biológicos, (especialmente en el caso de helmintos que son de mayor tamaño, pero también bacterias y hongos). En la figura 86 se comparan los tamaños de bacterias, protozoos y hongos con el tamaño de grano de los materiales del acuífero.

Los factores que afectan a la infiltración y movimiento de las bacterias en el suelo pueden resumirse en:

A) Características físicas del suelo

1. Textura
2. Distribución del tamaño de partículas
3. Tipo y contenido en arcillas
4. Tipo y contenido de materia orgánica
5. Capacidad de intercambio catiónico
6. Distribución del tamaño de poro

B) Factores químicos y ambientales del suelo

1. Temperatura
2. Contenido de humedad
3. Flujo de agua en el suelo
4. Tipo y concentración de iones en la solución del suelo
5. pH y potencial redox
6. Densidad y dimensiones de las bacterias
7. Naturaleza de la materia orgánica
8. Competencia con la microflora natural del suelo

La cofloculación de las bacterias con materia coloidal también puede aumentar la velocidad de filtración y sedimentación.

Estudios realizados sobre el movimiento de bacterias en acuíferos contaminados ponen de manifiesto que dicho movimiento responde a un modelo de transporte coloidal. Bajo ciertas condiciones la movilidad de algunas bacterias puede aproximarse a la de un trazador conservativo, aunque influirán también factores tales como adsorción, filtración, muerte y competencia con otros organismos.

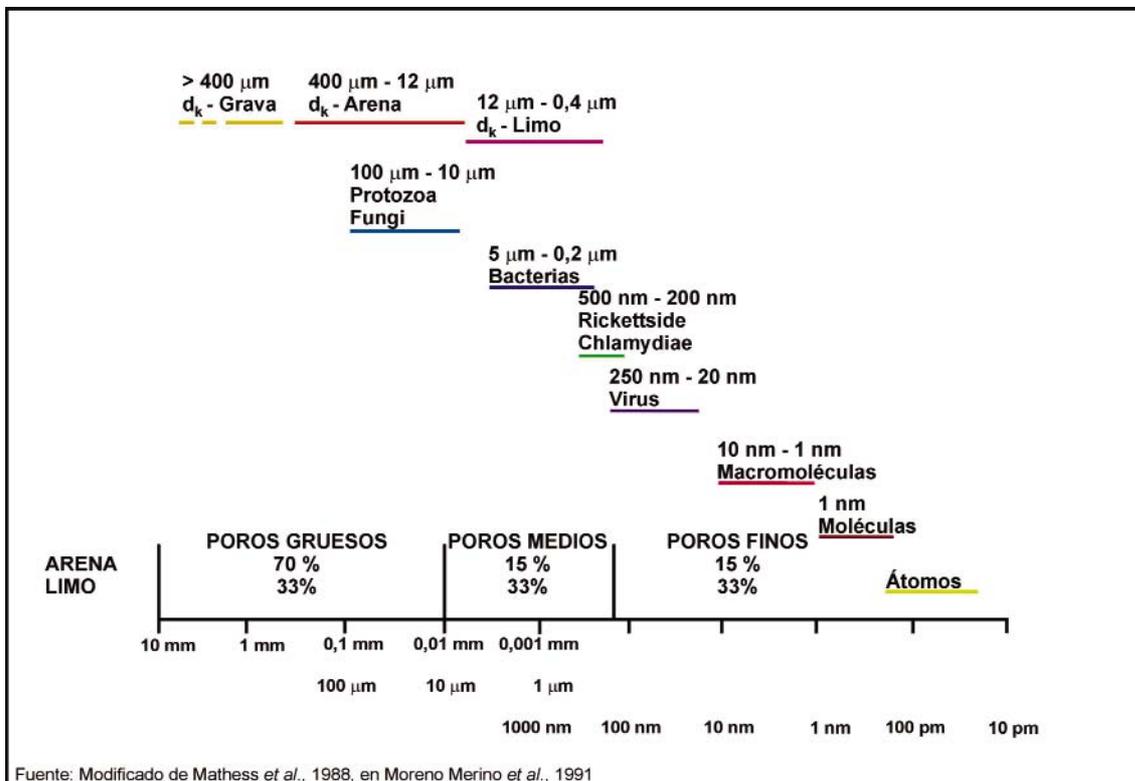


Figura 86: Comparación y tamaño de bacterias, virus y moléculas con diámetros equivalentes.

En la tabla 75 están recogidos los factores que influyen con mayor peso en el movimiento y supervivencia de estos microorganismos.

La dispersión es un mecanismo especialmente importante en la alteración del número de bacterias.

Los virus son fuertemente adsorbidos sobre materiales coloidales (menos sobre arenas), aumentando la adsorción al disminuir el pH. El contenido en cationes disminuye la movilidad de los virus.

Los virus así retenidos lo son de modo reversible de forma que una variación del pH, una fuerte lluvia etc., pueden removerlos provocando episodios de fuerte incremento en su concentración no relacionados con un hecho contaminante concreto.

Un elevado contenido en materia orgánica aumenta la permanencia de microorganismos en el agua, incluso puede permitir su reproducción. Así las bacterias, por ejemplo, no suelen encontrarse libres en el agua sino que suelen estar agrupadas alrededor de materia orgánica en suspensión que les sirve como sustrato.

La presencia de ciertos contaminantes, como metales pesados (que impiden el desarrollo bacteriano), detergentes (que provocan la inactivación de virus), entre otros, también deberá ser tenida en cuenta.

En las tablas 76 a 78 y figuras 87 a 89 se cuantifica la importancia de alguno de los factores estudiados.

La figura 87 es especialmente importante, en ella se muestra como la distancia que las bacterias pueden recorrer es muy variable y está directamente relacionada con el tipo de materiales.

En el caso de acuíferos kárstico o fisurados donde se produce una rápida circulación del agua, la mayor parte de los fenómenos depuradores anteriormente citados no existen o se dan de forma atenuada, no existe apenas filtración, el tiempo de tránsito es mucho menor impidiendo que de tiempo a la actuación de otros factores. En estos acuíferos se observa como el contenido en bacterias en el agua subterránea se encuentra estrechamente ligado a la turbidez, debido a que las características del flujo del agua influyen considerablemente en los procesos de sedimentación-movilización; así puede verse, como tras una fuerte lluvia aumentan considerablemente las bacterias en agua (arrastré desde superficie mas remoción de las sedimentadas en los huecos o fracturas), incluso fuertes bombeos tienen este efecto.

A este respecto estudios realizados en el IGME muestran como la velocidad de percolación influye notablemente sobre el contenido de microorganismos en el agua, debido sin duda a que una mayor velocidad implica una mayor facilidad para mover

Tabla 75: Factores que afectan al movimiento y supervivencia de los virus en el suelo.

Movimiento de los virus	
Factor	Efecto
Tipo de suelo	Los de textura fina retienen mejor a los virus Los óxidos de hierro aumentan la adsorción
pH	La adsorción aumenta cuando el pH disminuye
Cationes	La adsorción aumenta en presencia de cationes
Sustancias orgánicas	Compiten con los virus en la adsorción
Tipos de virus	La adsorción varía con el tipo de virus
Velocidad de flujo	A mayor velocidad menor adsorción del virus al suelo
Flujo no saturado/flujo saturado	Los virus se mueven menos en flujo no saturado
Supervivencia de los virus	
Factor	Efecto
Temperatura	Las altas temperaturas son perjudiciales
Desecación	Los virus se reducen más en suelos secos
Luz solar	Perjudicial en la superficie
Controla la adsorción de los virus al suelo	Controla la adsorción de los virus al suelo
Cationes	Contribuyen a estabilizar los virus en el suelo
Textura del suelo	Las arcillas y sustancias húmicas aumentan la retención de los virus
Factores biológicos	No hay una tendencia clara

Fuente: Bitton y Gerba, 1984 en Moreno Merino *et al.*, 1991

Tabla 76: Constantes de inactivación de virus en aguas subterráneas a $10 \pm 1^\circ\text{C}$ durante un tiempo de observación de 260 días.

Condiciones	Virus			
	Coxsackie B1	Coxsackie A9	Echo 7	Polio 1
Agua subterránea no tratada	0,0186	0,0265	0,0186	0,0129
Agua subterránea desionizada	0,0401	0,0324	0,0382	0,0322
Agua subterránea en autoclave	0,0123	0,0189	0,03220	0,0103
Agua subterránea en autoclave + arena gruesa	0,00927	0,0301	0,0123	0,0163
Agua subterránea en autoclave + arena media	0,0146	0,0311	0,0175	0,0276
Agua subterránea en autoclave + arena fina	0,0084		0,0157	0,0177

Fuente: Matthes, 1985 en Moreno Merino *et al.*, 1991

bacterias que de otra forma permanecerían sedimentadas.

En conclusión puede decirse que la zona próxima o de restricciones máximas permite (cuando es diseñada según criterios de tiempo de tránsito) una depu-

ración adecuada del agua dando un valor a este criterio de 50 días, pues no sólo se depura por la cinética normal de eliminación o inactivación, sino que también intervienen otros factores. Los medios kársticos o fisurados suponen un problema especial por sus características cinéticas.

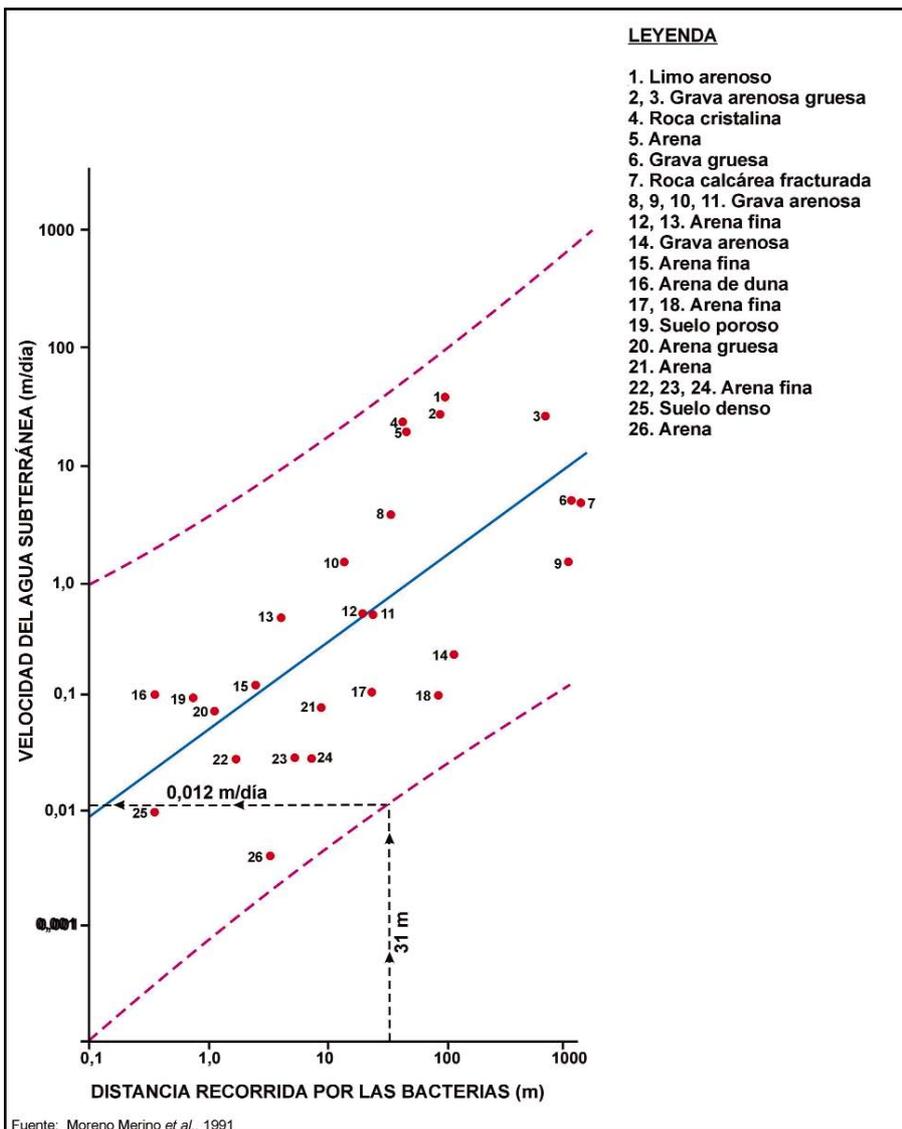


Figura 87: Distancia recorrida por las bacterias en medio saturado.

Perdurabilidad de la contaminación química

La contaminación química, al igual que la biológica, se ve afectada al atravesar el acuífero por procesos capaces de modificar, tanto su concentración inicial, como su naturaleza. En la tabla 79 se resumen para varias sustancias, cuya presencia es frecuente en el agua subterránea, los valores de permanencia. En alguna de ellas, la vida media es muy elevada, así por

ejemplo, el pesticida DBCP perdura 10 semanas en la zona no saturada, aumentando a varias decenas de años en la saturada.

La movilidad de los diferentes contaminantes químicos depende básicamente de su naturaleza y condiciones del medio que les rodea. Por su importancia se analizan tres casos:

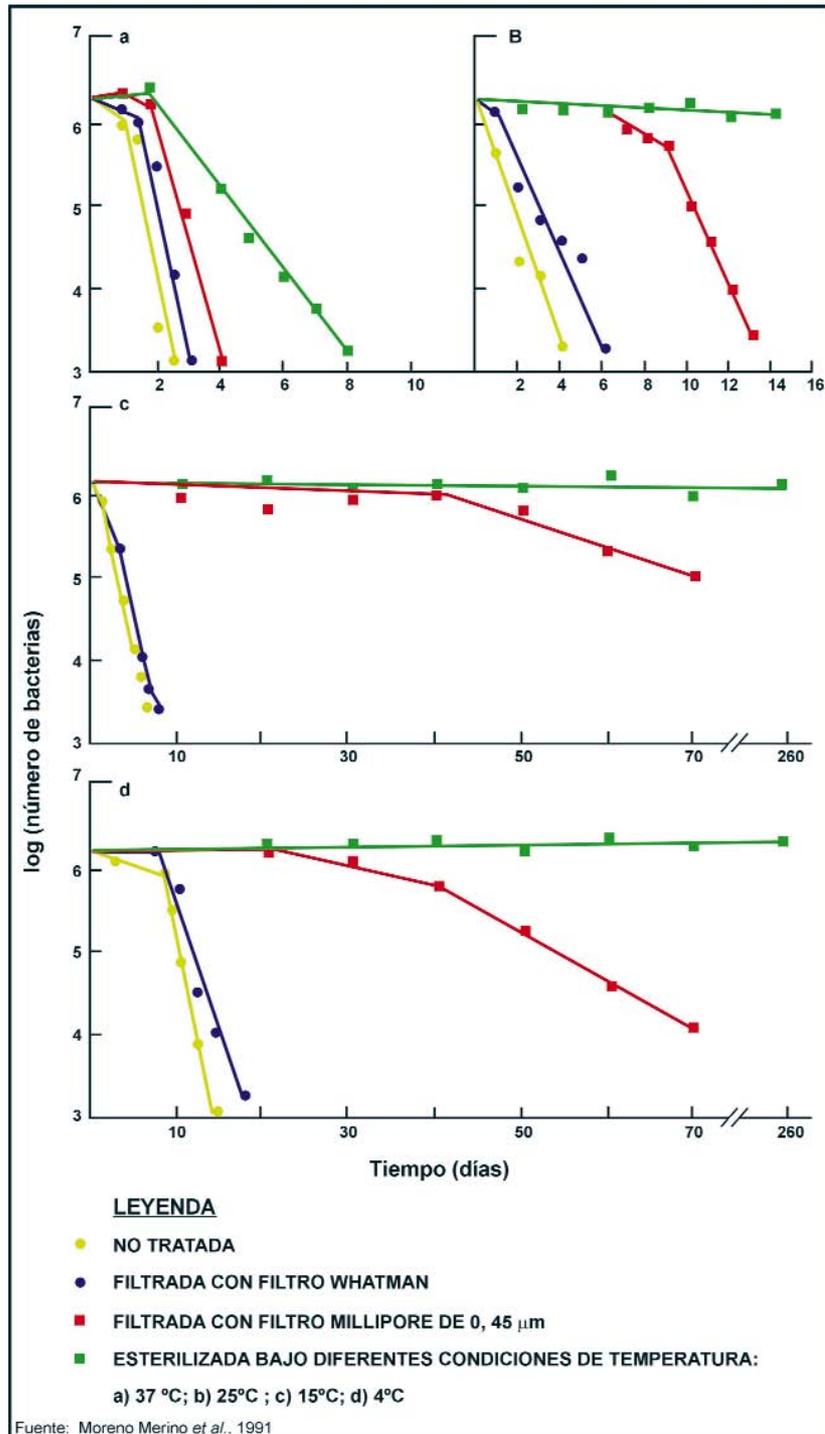


Figura 88: Supervivencia de Escherichia Coli en agua de río.

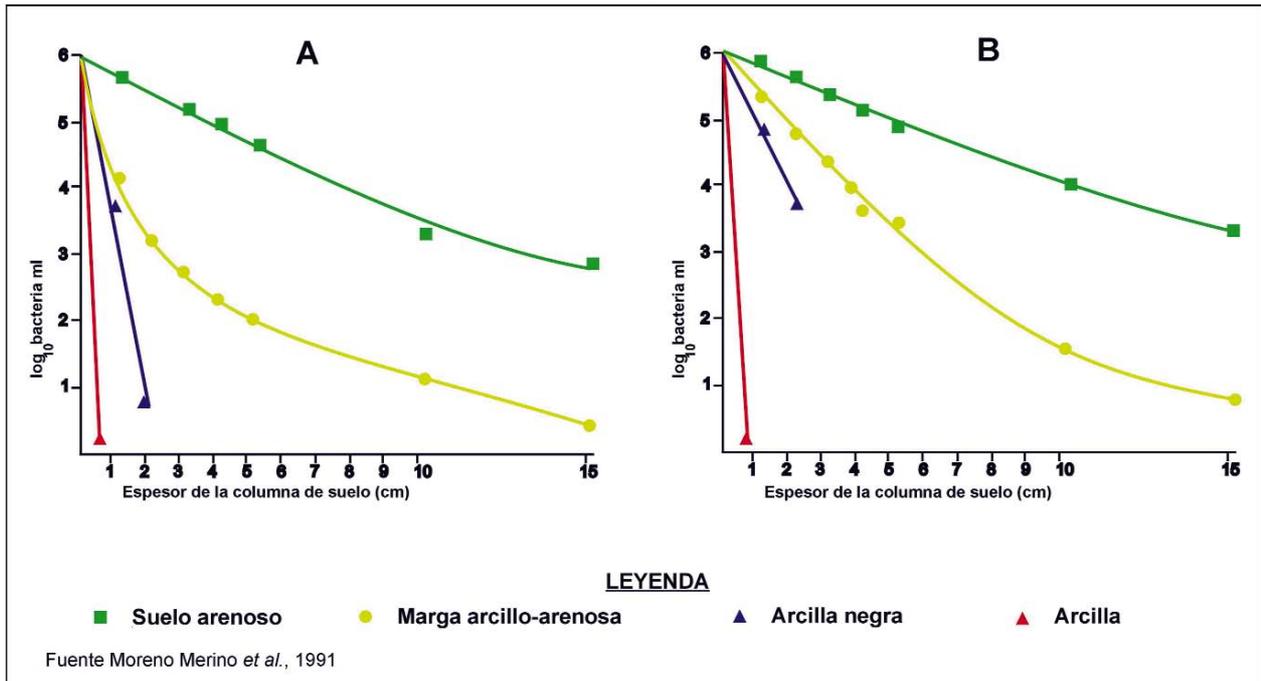


Figura 89: Disminución en el número de bacterias (*Escherichia Coli* (A) y *Streptococcus fecales* (B)) con la profundidad en suelos arenosos.

Tabla 77: Influencia del contenido en materia orgánica. Adsorción de Poliovirus 2 por los suelos y minerales.

	pH	Carbono orgánico (mg/g)	Capacidad de adsorción del poadma (mg/m ²)	% adsorción Poliovirus Vaccinal	
				Media	Mínima
Tierra arcillosa	7,6	16	1,1	75	43
Turba	7,2	200	14	79	16
Óxido de hierro hidratado	7,1	0	0,0005	99,99	99,99
Magnetita	8,9	0,4	0,06	99,98	99,94

Fuente: Matthes *et al.*, 1988 en Moreno Merino *et al.*, 1991

Tabla 78: Influencia del tipo de virus, profundidad de infiltración de enterovirus en una columna de arena 1% de virus recuperados.

Profundidad (cm)	Polio 1	Echo 7	Cox A9	Cox B1
1	26,08	58,70	7,55	30,03
2	55,05	22,30	13,60	30,00
3	14,49	10,55	28,71	30,00
4	2,61	5,86	29,00	7,90
5	1,45	1,05	15,77	1,42
6	0,26	1,05	2,87	0,30
7	0,03	0,22	0,75	0,14
8	0,026	0,1	0,75	0,14
9	0,014	0,1	0,70	0,003
10	0,003	0,06	0,29	0,001
11	< 0,0001	0,0001	0,25	0,0001

Fuente: Moreno Merino *et al.*, 1991

Metales pesados: Su mayor o menor movilidad va a depender de los aniones presentes en el medio con los que combinarán formando compuestos más o menos solubles (carbonatos, sulfatos, hidróxidos, cloruros, sulfuros, etc). También forman complejos con los ácidos húmicos quedando retenidos de forma irreversible.

Las arcillas, hidróxidos y ácidos húmicos pueden retener metales mediante procesos de adsorción y de intercambio iónico, procesos estos que presentan una cierta selectividad:

Los hidróxidos de hierro fijan preferentemente: Zn, Cu, Pb, Hg, Cr.

Los hidróxidos de aluminio: Cu, Ni, Co, Cr, Mo.

Las arcillas: Zn, Cu, Pb y Hg.

A su vez estos metales pueden ser desorbidos por otros iones competidores.

Variaciones en T, pH, Eh, etc, influyen notablemente en la dinámica de estos procesos.

Todos estos fenómenos tienen como resultado un doble efecto, por un lado los metales son retenidos de forma que su concentración disminuye en el agua subterránea, por otro cuando se trata de fenómenos reversibles se produce un retardo en el paso del contaminante a través del acuífero, viajando a menor velocidad que el agua.

Hidrocarburos: Su origen es muy diverso, pero prácticamente siempre ligado a actividades urbanas o

industriales. En un primer momento y antes de infiltrarse en el terreno se pierden gran parte de sus compuestos volátiles, siendo posteriormente la dilución (en pequeña medida) y principalmente la degradación bacteriana, los responsables de su desaparición.

El movimiento de estas sustancias en el subsuelo va a estar muy ligado a su viscosidad (frecuentemente elevada), su miscibilidad con el agua (generalmente muy baja) y la forma en que fueron vertidas (en especial cuando se vierten como emulsión en agua lo que facilita su transporte).

Como generalmente son menos densas que el agua se sitúan sobre la superficie de ésta, extendiéndose posteriormente; variaciones en el nivel piezométrico tienen como efecto que puedan llegar a lugares bastante profundos de la zona saturada.

Plaguicidas: En el transporte tendrá vital importancia su solubilidad en agua (Tabla 80) siendo más rápidamente transportados aquellos cuya solubilidad sea elevada. Los fenómenos de adsorción pueden llegar a retener algunos de forma completa, pero será la degradación bacteriana al factor predominante en su eliminación. La degradación del pesticida no siempre conduce a un compuesto menos tóxico, al contrario, es frecuente que se produzcan activaciones que dan lugar a productos más peligrosos que la sustancia madre.

En la tabla 80 se ven los procesos químicos que sufren en el suelo los principales elementos implicados en procesos contaminantes.

Tabla 79: Persistencia de sustancias orgánicas en el suelo y en el agua subterránea.

Sustancias orgánicas	Vida media estimada (años)	
	En el agua subterránea	En los suelos
<i>Hidrocarburos</i>		
Benceno		1
Tolueno		0,3
Xileno		0,3
Etilbenceno		0,3
C ₃ Benceno		0,6
Naftaleno		0,6
<i>Hidrocarburos halogenados</i>		
Diclorometano		10
Triclorometano		2
1,1,1, Triclorometano		1
Diclorobenceno		1
<i>Pesticidas* (Baja solubilidad en agua)</i>		
Clorano		2 a 4
DDT		3 a 10
Dieldrin		1 a 7
Heptacloro		7 a 12
Toxafeno		10
DDVP		0,047 (17 días)
Metil demeton S		0,071 (26 días)
Thimet		0,005 (2 días)
<i>Pesticidas** (Alta solubilidad en agua)</i>		
EDB	5,8	0,04-0,35 (2-18 semanas)
DBPC	28,5 a 140	0,2 (10 semanas)
Aldicarb	0,2 a 12, 5	0,08-0,15 (4-8 semanas)
Atrazina	0,2 a 2	0,08-11(4-57 semanas)
Carbofurano	0 a 1	0,02-0,7 (1-37 semanas)

Fuente: * Matthes, 1985 en Moreno Merino et al., 1991

** Cohen, et al., 1986 en Moreno Merino et al., 1991

Tabla 80: Componentes y procesos químicos del suelo.

Elemento	Símbolo	Soluto	Cambio iónico		Proceso químico en el suelo				
			Catiónico	Aniónico	Redox		Precipitados insolubles más comunes	Adsorción específica	Complejos insolubles orgánicos
					Forma oxidada	Forma reducida			
GRUPO PRIMERO									
Litio	Li	Li ⁺	O-I				Ninguno	No	No
Sodio	Na	Na ⁺	O-I				Ninguno	No	No
Nitrógeno	N	NH ₄ ⁺	O-I		NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻	N ₂ O, N ₂	Ninguno	M, I, V (m)	No
Potasio	K	K ⁺	O-I				Ninguno	M, I, V (m)	No
Rubidio	Rb	Rb ⁺	O-I				Ninguno	M, I, V (m)	No
Cesio	Cs	Cs ⁺	O-I				Ninguno	M, I, V (m)	No
Magnesio	Mg	Mg ⁺⁺	O-I				P, C, Sf	No	d
Calcio	Ca	Ca ⁺⁺	O-I				P, C, Sf	No	d
Estroncio	Sr	Sr ⁺⁺	O-I				P, C, Sf	No	d
Bario	Ba	Ba ⁺⁺	O-I				P, C, Sf	No	d
GRUPO SEGUNDO									
Cloruro	Cl	Cl ⁻		O-I				No	No
Nitrógeno	N	CN ⁻		O-I			Ninguno	No	No
Nitrógeno	N	NO ₃ ⁻		O-I		NO ₂ ⁻ , NH ₄ ⁺ , N ₂ O, N ₂	Ninguno	No	No
Azufre	S	SO ₄ ²⁻		O-I		S, S ₂ , S ₂ ²⁻ , SO ₂ ²⁻	Cationes divalentes	Hf (d)	No
Selenio	Se	SeO ₃ ²⁻		O-I	SeO ₄ ⁺		Cationes divalentes, Fe ³⁺	Hf (d)	No
GRUPO TERCERO									
Flúor	F	F ⁻		O-I			CaF ₂	Hf, Ha (i)	No
Fósforo	P	H ₂ PO ₄ ⁻ , HPO ₄ ²⁻		O-I			(Fe, Al, Ca)P	Ma, Hf, Ha (i)	No
Fósforo	P	Poli-P, Meta-P		O-I				Ma, Hf, Ha (i)	No
Arsénico	As	H ₂ AsO ₄ ²⁻		O-I			Coppta, con (Fe, Al, Ca)P	Ma, Hf, Ha (i)	No
Sílice	Si	Si(OH) ₄		O-I			(Fe, Al, SiO ₂)		No
Molibdeno	Mo	Mo ₄ ²⁻		O-I			Coppta, con (Fe, Al, Ca)P	Ma, Hf, Ha (i)	No
Boro	B	B(OH) ₃						Hf, Ha (d)	No
Carbón	C						CaCO ₃ , MgCO ₃		No
GRUPO CUARTO									
Aluminio	Al	Al ⁺³ , Al(OH) ⁺⁺	O-I				H, P		m
Berilio	Be	Be(OH) ⁺	O-I				H		
Vanadio	V	VO ₂	O-I				H		
GRUPO QUINTO									
Hierro	Fe	Fe ⁺³	O-I			Fe ⁺⁺	H, P, C, Sf, Sr	Ma, O (i)	i
Manganeso	Mn	Mn ⁺⁴	O-I			Mn ⁺⁺	H, Sr	Ma, O (i)	m
GRUPO SEXTO									
Plata	Ag	Ag ⁺	O-I				Ag, Cl, Sr	I-O (i)	i
Plomo	Pb	Pb ⁺⁺	O-I				H, Sf, C, Sr	I-O (i)	i
Mercurio	Hg	Hg ⁺⁺	O-I				HgO, Sr	I-O (i)	i
Cadmio	Cd	Cd ⁺⁺	O-I				Coppt (Fe, Al), H	I-O (i)	i
Cinc	Zn	Zn ⁺⁺	O-I				Coppt (Fe, Al), H	I-O (i)	i
Cobre	Cu	Cu ⁺⁺	O-I				Coppt (Fe, Al), H	I-O (i)	i
Níquel	Ni	Ni ⁺⁺	O-I				Coppt (Fe, Al), H	I-O (i)	i
Cobalto	Co	Co ⁺⁺	O-I				Coppt (Fe, Al), H	I-O (i)	i
Cromo	Cr	Cr ³⁺	O-I				Coppt (Fe, Al), H	I-O (i)	i
GRUPO SÉPTIMO									
Orgánico no descompuesto						Sí		I (i)	
Orgánico macromoléculas						Sí			
Orgánico no polar						Sí			
Orgánico polar						Sí		I (d)	
Orgánico catiónico			O-I			Sí		I (i)	
Orgánico aniónico				O-I		Sí		I-O	
Orgánico quelatos metálicos						Sí			

ABREVIATURAS:

I: Componentes inorgánicos del terreno
O: Componentes orgánicos del terreno

d: interacción débil
m: interacción moderada
i: interacción intensa
P: fosfato

C: carbonato
Sf: sulfato
Sr: sulfuro
H: hidróxido

M: mica
I: illita
V: vermiculita
Mt: montmorillonita

Ma: minerales arcillosos
Ha: hidróxido de aluminio
Hf: hidróxido de hierro

Fuente: FAO, 1975 en Moreno Merino *et al.*, 1991

ISBN 84-7840-496-1



9 788478 404964



MINISTERIO
DE CIENCIA
Y TECNOLOGÍA



Instituto Geológico
y Minero de España