

*DESARROLLO METODOLÓGICO PARA LA ESTIMACIÓN Y
CARTOGRAFÍA DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE LAS
AGUAS SUBTERRÁNEAS MEDIANTE SIG.
APLICACIÓN EN ACUÍFEROS DEL SUR DE ESPAÑA.*

JESÚS M^a VÍAS MARTÍNEZ



TESIS DOCTORAL
MEMORIA



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

María Jesús Perles Roselló, Profesora Titular de Geografía Física en el Departamento de Geografía de la Universidad de Málaga, y Bartolomé Andreo Navarro, Profesor Titular de Geodinámica Externa en el Departamento de Ecología y Geología de la Universidad de Málaga, codirectores de la tesis doctoral presentada por Jesús M^a Vías Martínez para su defensa y lectura en la Universidad de Málaga con el título de “Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España”, HACEN CONSTAR, que dicha tesis reúne las condiciones necesarias para ser defendida ante el tribunal que se designe.

En Málaga, a 29 de Marzo de 2005

Fdo. María Jesús Perles Roselló

Fdo. Bartolomé Andreo Navarro

TESIS DOCTORAL



**DESARROLLO METODOLÓGICO PARA LA ESTIMACIÓN
Y CARTOGRAFÍA DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN
DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS MEDIANTE SIG.
APLICACIÓN EN ACUÍFEROS DEL SUR DE ESPAÑA.**

AUTOR:

JESÚS M^a VÍAS MARTÍNEZ

Directores de la Tesis Doctoral:

María Jesús Perles Roselló

(Área de Geografía física, Dpto. Geografía)

Bartolomé Andreo Navarro

(Área de Geodinámica Externa, Dpto. Ecología y Geología)

DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
MARZO 2005

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis es el resultado de cuatro años de investigación en el departamento de Geografía, ámbito en el que he hecho muy buenos amigos y a quienes quiero agradecer la excelente relación mantenida durante tantas horas de convivencia.

En particular, quisiera expresar mi agradecimiento al Profesor Bartolomé Andreo Navarro y a la Profesora María Jesús Perles Roselló, directores de la tesis, por su continua e intensa dedicación en la realización de la misma y por mostrar puntos de vista tan diferentes, pero al mismo tiempo complementarios que han sido muy enriquecedores sobre el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas.

Al Grupo de Análisis Geográfico del Departamento de Geografía le quedo agradecido por permitirme el acceso a los instrumentos y el material cartográfico necesario, sin los cuales la realización de este trabajo no hubiera sido posible. En especial, a Carmen Ocaña Ocaña y Eusebio García Manrique, directores de los grupos de investigación a los que he pertenecido en los últimos años, por el inestimable apoyo que he recibido de ellos en muy diversas facetas. A Benjamín Galacho Jiménez por su permanente disposición a solventar los problemas surgidos en la elaboración de la cartografía. A María Luisa Gómez Moreno por sus acertadas sugerencias e ilustrativa conversación.

A Emilio Ferre Bueno le agradezco su apoyo inicial en la solicitud de la beca de Formación de Personal Docente e Investigador de la Junta de Andalucía y cuya posterior concesión me ha permitido realizar la presente tesis doctoral.

Al Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (GHUMA), especialmente a su responsable Francisco Carrasco Cantos, quien despertó mi interés por las aguas subterráneas, por la ayuda prestada y por las discusiones mantenidas en el marco de la Acción Europea COST 620 junto con Iñaki Vadillo Pérez y Pablo Jiménez Gavilán.

A los miembros de la Acción COST 620 en Europa, especialmente a su coordinador general François Zwhalen, les agradezco la posibilidad que me han brindado de profundizar en mis conocimientos sobre la vulnerabilidad del karst a la contaminación, gracias a la estancia de investigación realizada en el Centre d'Hidrogeologie de l'Université de Neuchâtel. Igualmente, al profesor Heinz Hötzl y a los miembros de su equipo Christoph Neukum y Heike Werz, que tan amablemente nos han acogido en la Universidad de Karlsruhe con motivo de las reuniones celebradas en el marco de la Acción Integrada hispano-alemana. Al profesor Kamal Targuisti y a todo el equipo de la Universidad de Tetuán, quienes nos han mostrado el karst del Norte de Marruecos, y en especial a Mohamed Draoui con quien he trabajado codo con codo en la cartografía de vulnerabilidad de acuíferos en Marruecos en el marco del proyecto A48/02(M) financiado por la Junta de Andalucía.

También quisiera mostrar mi agradecimiento a la colaboración recibida por parte de las Oficinas Comarcales Agrarias de Ronda, Cártama y Vélez-Málaga, a la empresa Agrogest de Vélez Málaga, a las comunidades de regantes de Vélez-Málaga, Benamargosa, Alhaurín el Grande y Alhaurín de la Torre, a los ayuntamientos y empresas de gestión del agua de Torremolinos, Benalmádena, Mijas, Alhaurín de la Torre, Vélez-Málaga, departamento de epidemiología de los distritos sanitarios de Ronda, Vélez-Málaga y Costa del Sol y, en general, a todas aquellas personas que de forma desinteresada ha aportado su granito de arena en la consecución de este trabajo.

Por último, quiero dar las gracias a mi madre, sin cuya base no hubiera logrado concluir ningún trabajo, a mi padre que no pudo ver llegar este momento, a Silvia a quien le debo los últimos meses que ha llevado este trabajo y al resto de mi familia y amigos.

La presente tesis doctoral se ha desarrollado en el seno de los grupos de investigación HUM 776 (al cual pertenezco y que en origen se denominaba RNM 138), RNM 308 de la Junta de Andalucía y es una aportación a los proyectos REN2002-01797/HID y REN2003-01580/HID de la DGI.

MEMORIA

1. Introducción y Objetivos	17
I. CONCEPTUACIÓN DEL RIESGO Y SUS COMPONENTES	
2. Evolución, conceptualización y clasificación del riesgo	25
2.1. Evolución de los estudios de riesgo	25
2.2. Concepto de riesgo	28
2.3. Tipos de riesgo. Riesgo tecnológico	29
3. Riesgo de contaminación de las aguas subterráneas	31
3.1. Antecedentes y conceptualización del riesgo de contaminación aguas subterráneas	31
3.2. Riesgo de contaminación de aguas subterráneas en el marco de la acción europea COST 620	33
3.3. Análisis y estimación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas en un contexto de sostenibilidad	34
3.3.1. Análisis del riesgo de contaminación de aguas subterráneas	34
3.3.2. Métodos de estimación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas	35
4. Componentes del riesgo de contaminación de aguas subterráneas	40
4.1. Peligros de contaminación de las aguas subterráneas	40
4.1.1. Antecedentes y concepto de peligro	40
4.1.2. Contaminantes y salud pública	42
4.1.3. Actividades humanas potencialmente contaminantes	46
4.1.4. Aproximaciones metodológicas a la evaluación y cartografía de los peligros de contaminación de las aguas subterráneas	48
4.2. Vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación	50
4.2.1. Antecedentes y concepto de vulnerabilidad del acuífero	50
4.2.2. Vulnerabilidad versus capacidad de atenuación	52
4.2.3. Aproximaciones metodológicas a la evaluación y cartografía de la vulnerabilidad del medio físico: vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos	55
4.2.4. Exposición de aguas subterráneas en los acuíferos	58
4.3. Vulnerabilidad de la población y sus bienes	58
4.3.1. Antecedentes y concepto de vulnerabilidad de la población y sus bienes	58
4.3.2. Aproximaciones metodológicas a la evaluación y cartografía de la vulnerabilidad del medio humano: vulnerabilidad de la población y sus bienes	61
II. METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN Y CARTOGRAFÍA DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUS COMPONENTES	
5. Metodologías de evaluación y cartografía de los componentes del riesgo de contaminación de aguas subterráneas	67
5.1. Método de evaluación y cartografía de los peligros de contaminación de las aguas subterráneas. Índice de peligrosidad HI (HAZARD INDEX)	67
5.1.1. Inventario de peligros	68
5.1.2. Nocividad del contaminante: Factor H	68
5.1.3. Intensidad de la contaminación: Factor Q_n	70
5.1.4. Probabilidad de ocurrencia: Factor R_f	71
5.1.5. Índice de peligro HI	71
5.2. Métodos de evaluación y cartografía de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos	72
5.2.1. Método DRASTIC	75
5.2.1.1. Parámetros del método DRASTIC	76
5.2.1.2. Índice de vulnerabilidad del método DRASTIC	78
5.2.2. Método GOD	79
5.2.2.1. Parámetros del método GOD	79
5.2.2.2. Índice de vulnerabilidad del método GOD	80

5.2.3 Método AVI	81
5.2.3.1. Parámetros del método AVI	81
5.2.3.2. Índice de vulnerabilidad del método AVI	81
5.2.4 Método EPIK	82
5.2.4.1. Parámetros del método EPIK	82
5.2.4.2. Índice de vulnerabilidad del método EPIK	84
5.2.5. Método COP	85
5.2.5.1. Factor O: Capas de protección del agua subterránea	85
5.2.5.1.1 Variable O_S : Suelo	86
5.2.5.1.2 Variable O_L : litología	86
5.2.5.1.3 Valores y clases del factor O	87
5.2.5.2. Factor C: Condiciones superficiales para la concentración de flujos de agua que recargan el acuífero	88
5.2.5.2.1. Escenario 1: áreas vertientes a un sumidero	88
5.2.5.2.2. Escenario 2: áreas no vertientes a un sumidero	90
5.2.5.2.3. Valores y clases del factor C	91
5.2.5.3. Factor P: Característica de la precipitación	91
5.2.5.3.1. Variable P_Q : cantidad de lluvia	91
5.2.5.3.2. Variable P_I : intensidad	92
5.2.5.3.3. Cálculo y clases del factor P	93
5.2.5.4. Índice de vulnerabilidad intrínseca del método COP	93
5.2.6. Factor de exposición: E_F	94
5.3. Método de evaluación y cartografía de la vulnerabilidad de la población y sus bienes (Medio Humano)	95
5.3.1. Método de estimación de la vulnerabilidad de la población y sus bienes	96
5.3.1.1. Vulnerabilidad de la población (V_P)	96
5.3.1.1.1. Factor E_P : población expuesta	97
5.3.1.1.2. Factor R_{1P} : tipología de abastecimiento	97
5.3.1.1.3. Factor R_{2P} : grupo de población vulnerable según la edad	99
5.3.1.1.4. Índice de vulnerabilidad de la población (V_P)	100
5.3.1.2. Vulnerabilidad de los bienes de la población: actividad productiva	101
5.3.1.2.1. Vulnerabilidad de la actividad agropecuaria (V_{AG})	101
5.3.1.2.1.1. Factor E_{AG} : exposición de la actividad agropecuaria	101
5.3.1.2.1.2. Factor R_{1AG} : tipo de infraestructura de abastecimiento	102
5.3.1.2.1.3. Factor R_{2AG} : rentabilidad socioeconómica de la actividad agropecuaria	102
5.3.1.2.1.4. Índice de vulnerabilidad de la actividad agropecuaria (V_{AG})	103
5.3.1.2.2. Vulnerabilidad de otras actividades productivas (V_{ST})	104
5.3.2. Método de estimación de la vulnerabilidad del medio humano. Índice VH	105
6. Método de estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas	108
6.1. Índice de estimación del riesgo	108
6.2. Cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas	111
7. Instrumentos, variables, fuentes y escala de trabajo	114
7.1. Instrumentos para la aplicación de la metodología:	114
7.1.1. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG)	114
7.1.2. Otras herramientas utilizadas en cada etapa de producción	115
7.2. Pasos metodológicos para la evaluación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas: fases de aplicación del SIG	118
7.2.1. Introducción de datos	118
7.2.1.1. Datos de naturaleza discreta	119
7.2.1.1.1. Realización de la topología, corrección de errores y asignación de atributos	120
7.2.1.2. Datos de naturaleza continua	120
7.2.1.2.1. Elaboración del modelo digital del terreno (MDT) y estimación de errores	121

7.2.2. Análisis espacial.....	122
7.2.3. Obtención de resultados y edición cartográfica.....	123
7.3. Variables para la estimación del riesgo.....	125
7.3.1. Variables utilizadas para la evaluación del peligro.....	125
7.3.2. Variables utilizadas para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero.....	126
7.3.3. Variables utilizadas para la evaluación de la vulnerabilidad del medio humano.....	127
7.4. Fuentes y escala de trabajo.....	127

III. ESTIMACIÓN Y CARTOGRAFÍA DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LOS ACUÍFEROS DE LA SIERRA DE LÍBAR, SIERRA DE MIJAS Y RÍO VÉLEZ

8. Evaluación y cartografía del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en el acuífero de la sierra de Líbar.....	133
8.1. Características del medio físico y humano de la sierra de Líbar.....	135
8.1.1. Localización de la zona de estudio.....	135
8.1.2. Relieve: altitud y pendiente.....	138
8.1.3. Clima: Precipitación.....	143
8.1.3.1. Inventario de estaciones meteorológicas.....	143
8.1.3.2. Análisis de las precipitaciones.....	144
8.1.4. Geología.....	147
8.1.4.1. Litología.....	147
8.1.4.2. Estructura geológica y tectónica.....	149
8.1.4.3. Geomorfología: modelado kárstico.....	150
8.1.4.3.1. Formas exokársticas.....	151
8.1.4.3.2. Formas endokársticas.....	153
8.1.5. Hidrografía.....	154
8.1.6. Hidrogeología.....	156
8.1.6.1. Puntos de agua.....	156
8.1.6.2. Piezometría.....	158
8.1.6.3. Parámetros hidráulicos.....	161
8.1.6.4. Funcionamiento hidrogeológico y balance hídrico.....	161
8.1.7. Suelos.....	162
8.1.8. Vegetación natural y otros usos del suelo.....	165
8.1.9. Población.....	167
8.1.9.1. Población de derecho.....	167
8.1.9.2. Población ocupada.....	171
8.1.10. Actividad agropecuaria.....	174
8.1.11. Hostelería y otras actividades productivas.....	175
8.2 Evaluación y cartografía de los peligros de contaminación sobre el acuífero de la sierra de Líbar.....	177
8.2.1. Inventario de peligros de contaminación.....	177
8.2.2. Nocividad de los peligros: Factor H.....	181
8.2.3. Intensidad de la contaminación: Factor Q_n	182
8.2.4. Probabilidad de contaminación: factor R_f	182
8.2.5. Índice de peligrosidad HI.....	183
8.3. Evaluación y cartografía de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero de la sierra de Líbar.....	185
8.3.1. Método DRASTIC.....	185
8.3.2. Método GOD.....	188
8.3.3. Método AVI.....	191
8.3.4. Método EPIK.....	193
8.3.5. Método COP.....	197
8.3.6. Análisis comparativo de resultados en la sierra de Líbar.....	200
8.4. Evaluación y cartografía de la vulnerabilidad de la población y sus bienes (medio humano) en el acuífero de la sierra de Líbar.....	205
8.4.1. Vulnerabilidad de la población (V_p).....	205
8.4.2. Vulnerabilidad de la actividad agropecuaria V_{AG} : ganadería.....	207

8.4.3. Vulnerabilidad de las actividades productivas V_{ST} : hostelería y otros	209
8.4.4. Vulnerabilidad del medio humano en la sierra de Líbar	211
8.5. Cartografía del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas del acuífero de la sierra de Líbar	213
9. Evaluación y cartografía del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en el acuífero de la sierra de Mijas	217
9.1. Características del medio físico y humano de la sierra de Mijas	219
9.1.1. Localización de la zona de estudio	219
9.1.2. Relieve: altitud pendiente	222
9.1.3. Clima: Precipitación	227
9.1.3.1. Inventario de estaciones meteorológicas	227
9.1.3.2. Análisis de las precipitaciones	228
9.1.4. Geología	231
9.1.4.1. Litología	231
9.1.4.2. Estructura geológica y tectónica	233
9.1.4.3. Geomorfología: modelado kárstico	236
9.1.5. Hidrografía	236
9.1.6. Hidrogeología	236
9.1.6.1. Inventario de puntos de agua	237
9.1.6.2. Piezometría	239
9.1.6.3. Parámetros hidráulicos	241
9.1.6.4. Funcionamiento hidrogeológico y balance hídrico	241
9.1.7. Suelos	242
9.1.7.1. Características generales	242
9.1.7.2. Características texturales	245
9.1.8. Vegetación natural y otros usos del suelo	249
9.1.9. Población	252
9.1.9.1. Población de derecho	252
9.1.9.2. Población ocupada	256
9.1.10. Actividad agrícola	259
9.1.10.1. Característica generales	259
9.1.10.2. Distribución y tipos de cultivos	259
9.1.11. Hostelería y otras actividades productivas	261
9.2 Evaluación y cartografía de los peligros de contaminación sobre el acuífero de la sierra de Mijas	264
9.2.1. Inventario de peligros de contaminación	264
9.2.2. Nocividad de los peligros: Factor H	273
9.2.3. Intensidad de la contaminación: Factor Q_n	274
9.2.4. Probabilidad de contaminación: Factor R_f	275
9.2.5. Índice de peligrosidad HI	276
9.3. Evaluación y cartografía de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero de la sierra de Mijas	279
9.3.1. Método DRASTIC	279
9.3.2. Método GOD	282
9.3.3. Método AVI	285
9.3.4. Método EPIK	287
9.3.5. Método COP	290
9.3.6. Análisis comparativo de resultados en la sierra de Mijas	294
9.4. Evaluación y cartografía de vulnerabilidad de la población y sus bienes (medio humano) en el acuífero de la sierra de Mijas	297
9.4.1. Vulnerabilidad de la población (V_P)	297
9.4.2. Vulnerabilidad de la actividad productiva V_{AG} : agricultura	300
9.4.3. Vulnerabilidad de la actividad productiva V_{ST} : hostelería y otros	302
9.4.4. Vulnerabilidad del medio humano	304
9.5. Cartografía del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas del acuífero de la sierra de Mijas	306

10. Evaluación y cartografía del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en el acuífero del río Vélez	309
10.1. Características del medio físico y humano en el acuífero del río Vélez	311
10.1.1. Localización de la zona de estudio	311
10.1.2. Relieve: altitud pendiente	314
10.1.3. Clima: Precipitación	318
10.1.3.1. Inventario de estaciones meteorológicas	318
10.1.3.2. Análisis de las precipitaciones	319
10.1.4. Geología	342
10.1.4.1. Litología	322
10.1.4.2. Estructura geológica y tectónica	324
10.1.4.3. Geomorfología	324
10.1.5. Hidrografía	325
10.1.6. Hidrogeología	326
10.1.6.1. Puntos de agua	326
10.1.6.2. Piezometría	329
10.1.6.3. Parámetros hidráulicos	331
10.1.6.4. Funcionamiento hidrogeológico y balance hídrico	331
10.1.7. Suelos	332
10.1.7.1. Características generales	332
10.1.7.2. Características texturales	334
10.1.8. Vegetación natural y otros usos del suelo	336
10.1.9. Población	338
10.1.9.1. Población de derecho	338
10.1.9.2. Población ocupada	342
10.1.10. Actividad agrícola	345
10.1.10.1. Características generales	345
10.1.10.2. Distribución y tipos de cultivo	345
10.1.11. Hostelería y otras actividades productivas	348
10.2 Evaluación y cartografía de los peligros de contaminación sobre el acuífero del río Vélez	349
10.2.1. Inventario de peligros de contaminación	349
10.2.2. Nocividad de los peligros: Factor H	357
10.2.3. Intensidad de la contaminación: Factor Q_n	358
10.2.4. Probabilidad de contaminación: Factor R_f	359
10.2.5. Índice de peligrosidad HI	359
10.3. Evaluación y cartografía de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero del río Vélez	362
10.3.1. Método DRASTIC	362
10.3.2. Método GOD	365
10.3.3. Método AVI	368
10.3.4. Análisis comparativo de resultados en el acuífero del río Vélez	370
10.4. Evaluación y cartografía de vulnerabilidad del la población y sus bienes (medio humano) en el acuífero del río Vélez	374
10.4.1. Vulnerabilidad de la población (V_p)	374
10.4.2. Vulnerabilidad de la actividad productiva: agricultura (V_{AG})	376
10.4.3. Vulnerabilidad de la actividad productiva: hostelería y otros (V_{ST})	378
10.4.4. Vulnerabilidad del medio humano	380
10.5. Cartografía del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas del acuífero del río Vélez	382
11. Análisis de los resultados obtenidos en los tres acuíferos. Comparación y valoración	385
11.1.1. Focos potencialmente contaminantes y su peligrosidad	385
11.1.2. Vulnerabilidad de los acuíferos: capacidad de protección y autodepuración	389
11.1.3. Vulnerabilidad de los elementos del medio humano dependientes de las aguas subterráneas	393
11.1.4. Riesgo de contaminación de las aguas subterráneas	395

IV. CONSIDERACIONES FINALES	
12. Consideraciones finales	399
12.1. Aspectos generales de la cartografía de riesgo de contaminación de aguas subterráneas	399
12.2. Componentes del riesgo	401
12.2.1. Peligros de contaminación.....	401
12.2.2. Vulnerabilidad intrínseca del acuífero (medio físico).....	402
12.2.3. Vulnerabilidad de la población y sus bienes (medio humano).....	403
12.3. Método de estimación y cartografía del riesgo	405
V. BIBLIOGRAFÍA	407

ANEXO METODOLÓGICO Y CARTOGRÁFICO

- **Metodologías**
 - **Esquema 1: método DRASTIC**
 - **Esquema 2: método GOD**
 - **Esquema 3: método AVI**
 - **Esquema 4: método EPIK**
 - **Esquema 5: método COP**

- **Cartografías**
 - **Mapa 1L.** Peligro de contaminación de aguas subterráneas. Acuífero de la sierra de Líbar
 - **Mapa 2L.** Vulnerabilidad intrínseca según el método DRASTIC. Acuífero de la sierra de Líbar
 - **Mapa 3L.** Vulnerabilidad intrínseca según el método GOD. Acuífero de la sierra de Líbar
 - **Mapa 4L.** Vulnerabilidad intrínseca según el método AVI. Acuífero de la sierra de Líbar
 - **Mapa 5L.** Vulnerabilidad intrínseca según el método EPIK. Acuífero de la sierra de Líbar
 - **Mapa 6L.** Vulnerabilidad intrínseca según el método COP. Acuífero de la sierra de Líbar
 - **Mapa 7L.** Vulnerabilidad de la población. Acuífero de la sierra de Líbar
 - **Mapa 8L.** Vulnerabilidad de la actividad productiva: ganadería. Acuífero de la sierra de Líbar
 - **Mapa 9L.** Vulnerabilidad de la actividad productiva: hostelería y otros. Acuífero de la sierra de Líbar
 - **Mapa 10L.** Riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Acuífero de la sierra de Líbar

 - **Mapa 1M.** Peligro de contaminación de aguas subterráneas. Acuífero de la sierra de Mijas
 - **Mapa 2M.** Vulnerabilidad intrínseca según el método DRASTIC. Acuífero de la sierra de Mijas
 - **Mapa 3M.** Vulnerabilidad intrínseca según el método GOD. Acuífero de la sierra de Mijas
 - **Mapa 4M.** Vulnerabilidad intrínseca según el método AVI. Acuífero de la sierra de Mijas
 - **Mapa 5M.** Vulnerabilidad intrínseca según el método EPIK. Acuífero de la sierra de Mijas
 - **Mapa 6M.** Vulnerabilidad intrínseca según el método COP. Acuífero de la sierra de Mijas
 - **Mapa 7M.** Vulnerabilidad de la población. Acuífero de la sierra de Mijas
 - **Mapa 8M.** Vulnerabilidad de la actividad productiva: agricultura. Acuífero de la sierra de Mijas
 - **Mapa 9M.** Vulnerabilidad de la actividad productiva: hostelería y otros. Acuífero de la sierra de Mijas
 - **Mapa 10M.** Riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Acuífero de la sierra de Mijas

 - **Mapa 1V.** Peligro de contaminación de aguas subterráneas. Acuífero del río Vélez
 - **Mapa 2V.** Vulnerabilidad intrínseca según el método DRASTIC. Acuífero del río Vélez
 - **Mapa 3V.** Vulnerabilidad intrínseca según el método GOD. Acuífero del río Vélez
 - **Mapa 4V.** Vulnerabilidad intrínseca según el método AVI. Acuífero del río Vélez
 - **Mapa 5V.** Vulnerabilidad de la población. Acuífero del río Vélez
 - **Mapa 6V.** Vulnerabilidad de la actividad productiva: agricultura. Acuífero del río Vélez
 - **Mapa 7V.** Vulnerabilidad de la actividad productiva: hostelería y otros. Acuífero del río Vélez
 - **Mapa 8V.** Riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Acuífero del río Vélez

MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Riesgo y catástrofe son términos percibidos, en ocasiones, como sinónimos. Sin embargo, estos términos difieren sustancialmente en su concepción. El riesgo es un estadio previo a la manifestación de un evento extremo y la catástrofe es el conjunto de consecuencias negativas asociadas al evento extremo¹. De esto se deduce que el riesgo es una parte importante del análisis de la catástrofe (Tobin y Montz, 1997).

La proliferación de catástrofes en los últimos tiempos es un síntoma de que los riesgos, en general, no han experimentado un proceso de disminución paralelo al desarrollo económico, sino que las consecuencias de los eventos extremos están siendo incrementadas con independencia del grado de desarrollo de los países. Este hecho está relacionado con el aumento de la exposición de la población al riesgo. En los países desarrollados, este incremento se debe a los cambios de conducta de la población, que invade espacios de riesgo por la confianza depositada en la tecnología, mientras que en los países menos desarrollados, el aumento de la población expuesta a los riesgos se caracteriza por tener menos recursos económicos y una menor capacidad de absorber y recuperarse de las pérdidas, es decir, una mayor vulnerabilidad.

Los datos de catástrofes de los últimos decenios (Cutter, 1996a, Tobin y Montz, 1997 y Olcina *et al.*, 2002 muestran que el mayor número de pérdidas humanas ocurre en los países subdesarrollados, mientras que las mayores pérdidas económicas se producen en los países desarrollados. En definitiva, las catástrofes no afectan por igual a las distintas sociedades y los casos que ponen de manifiesto este hecho son frecuentes.

Las catástrofes relacionadas con la contaminación de las aguas subterráneas han sido numerosas a lo largo del tiempo, casi siempre a consecuencia de la contaminación bacteriana del agua de las captaciones de abastecimiento. El desastre más importante tuvo lugar en 1978 en la ciudad de Love Canal, en las cataratas del Niágara, donde la población tuvo que ser evacuada al detectarse residuos peligrosos en el acuífero que abastecía a la ciudad, procedentes de las emisiones de residuos químicos (benceno, tricloroetileno, y otros hidrocarburos halogenados) durante más de 25 años (Zaporozec, 1999).

La seguridad de la población y sus bienes, frente a los eventos extremos, es una circunstancia prioritaria para las instancias públicas. El bienestar de la población y, sobre todo, la supervivencia de los habitantes que integran la comunidad se establece, en la mayor parte de las sociedades, de forma colectiva. En cambio, el aspecto individual de la seguridad se deja en un segundo plano y corre a cuenta de la iniciativa personal.

En las sociedades organizadas, las medidas de protección que se establecen frente a los eventos extremos (inundaciones, terremotos, etc) forman parte de los instrumentos de la administración pública para mantener y corregir el bienestar de la población. La protección se basa en una serie de postulados destinados a la seguridad de la comunidad pero, en ningún caso, garantizan una probabilidad de ocurrencia de un desastre igual a cero (Ewald, 2000). El

¹ Un evento extremo es un suceso con consecuencias negativas para el hombre que supera el umbral de lo aceptable para la comunidad. Este umbral no está delimitado y depende de la coyuntura del momento (motivos económicos, sociales, políticos, etc).

margen de error que estas medidas de protección poseen no llega a garantizar la seguridad individual, al no poder controlarse el comportamiento aislado de cada persona. Por ello se incorporan unos umbrales de confianza que establecen la seguridad de la colectividad por encima de la seguridad individual. Sin embargo, esta seguridad individual se queda recogida mediante las compensaciones posteriores a los afectados por una catástrofe.

Las medidas a tener en cuenta para hacer frente a una catástrofe pueden ser fundamentalmente dos: preventivas y paliativas. Las medidas preventivas tienen un carácter más conservador en la medida que se antepone a la manifestación de un fenómeno extremo, aunque sin asegurar un éxito del 100 % en su gestión dado que no se controlan todas las variables que intervienen en la naturaleza y, por tanto, los efectos sinérgicos de un suceso. En cambio, las medidas paliativas asumen de antemano una serie de pérdidas (económicas, humanas, etc) y la ocurrencia de un evento extremo. En la actualidad, los dos tipos de intervenciones se desarrollan a la par con el fin de minimizar las consecuencias de un fenómeno extremo, aunque prevalece un mayor protagonismo de las medidas paliativas frente a las preventivas. Ello se debe a que no es posible controlar el comportamiento individual, como se ha comentado anteriormente, y se hace necesario establecer medidas a posteriori. Además, el carácter más inmediato de las medidas de asistencia en catástrofes y compensatorias las hacen más atractivas como modelo de gestión del riesgo por parte de las instituciones implicadas frente a las preventivas y coercitivas. Las posibles consecuencias de mantener y llevar a cabo los dos tipos de medidas simultáneamente, es que la probabilidad de manifestación de un evento aumente dado que hay una solución posterior al desastre, por lo que las medidas preventivas pierden protagonismo. Ahora bien, si la prevención se ofrece como una alternativa frente a la catástrofe, las medidas preventivas deben pasar, inexorablemente, por un análisis del riesgo previo a la manifestación del suceso, es decir, previo a la ocurrencia del desastre. La ordenación del territorio es una forma de reducir los riesgos sin necesidad de asumirlos, es decir, de evitar la catástrofe.

La previsión del riesgo como tarea preliminar a la implantación de medidas preventivas, es el aspecto que centra el presente trabajo. La previsión cumple "...la necesidad de cubrir cada vez más eficazmente la laguna de incertidumbre que caracteriza a los riesgos..." Ortega (1991,102).

El riesgo, en general, es un concepto que deja de tener vigencia en el momento en que se produce un suceso extremo, es decir, es un fenómeno virtual. En cuanto se materializa deja de ser un riesgo para convertirse en un siniestro. El riesgo es la anticipación a un acontecimiento futuro (Ewald, 2000). Esa anticipación puede ser medida y/o catalogada siempre desde un punto de vista teórico o potencial pero nunca aplicado, ya que entonces se estaría midiendo un siniestro.

Una premisa que debería centrar el debate de la gestión del riesgo, en general, es el principio de precaución (Ramos, 2000). Bajo esta denominación hay toda una metodología y filosofía de trabajo que limita, en cierta medida, el desarrollo tecnológico, un proceso intrínseco a las sociedades desarrolladas. La tecnociencia, en principio, permite al hombre establecer medidas que minimicen el riesgo y asegurar o garantizar, en un futuro inmediato, el correcto funcionamiento de los sistemas. Sin embargo, la crisis de estos sistemas tecnológicos puede implicar un aumento del riesgo y convertirse en la causa del mismo por dos motivos: porque su propia implantación en el medio supone un impacto al mismo y porque los sistemas

tecnológicos no escapan de ese grado de incertidumbre inherente al funcionamiento correcto de las cosas. La confianza depositada en la tecnología es, en ocasiones, injustificada sobre todo en el caso de los riesgos inducidos. El interés material de la sociedad actual ciega toda actitud práctica en un tema tan delicado como es la propia supervivencia del hombre. En palabras de Ewald (2000), la sociedad, en general, y el hombre, en particular, se caracterizan por correr riesgos. El riesgo es una característica intrínseca a la vida humana (Dinman, 1980) lo cual se deduce de su capacidad para aceptarlo con un cierto grado de independencia (Dudreuil, 1997).

La presente memoria pretende establecer los pasos previos a la instauración de medidas reguladoras destinadas a reducir el riesgo. Conocer el riesgo para poder enfrentarse a él, con las máximas garantías de éxito, es una tarea que poco a poco está calando en la sociedad y se aleja, cada vez más del concepto de catástrofe como circunstancia inevitable e imprevisible.

En el ámbito de las aguas subterráneas, para conocer el riesgo de contaminación se debe analizar, en primer lugar, el estado de la cuestión y, en segundo lugar, examinar la problemática desde una perspectiva integradora, que tenga en cuenta todos los elementos que intervienen para mostrar soluciones y alternativas reales y efectivas. Un enfoque integrador del riesgo supone complementar el análisis sectorial de la peligrosidad junto con el papel que tienen los elementos expuestos al riesgo y su vulnerabilidad. La Directiva Marco del Agua de la UE intenta hacerse eco de esta nueva perspectiva integradora mediante el estudio de acuíferos para establecer las pautas a seguir en cuanto al análisis y gestión de sus recursos hídricos.

El agua es un tema central de muchos debates, a escala local y global, sobre el que se discute intensamente, con especial énfasis en áreas de elevada problemática como la mediterránea. Tradicionalmente, la gestión del agua en este espacio ha estado orientada hacia la cuantificación de los recursos hídricos superficiales (ríos y embalses). Estos recursos, en particular, sufren los avatares de las características climáticas de la región, es decir, una fuerte irregularidad estacional y anual, que se traduce en escasez de recursos en determinados periodos de tiempo. La escasez de recursos hídricos superficiales conlleva, en algunos casos, el uso de las aguas subterráneas, especialmente, en las épocas de sequía.

La importancia que adquieren las aguas subterráneas para el abastecimiento de la población, ante la falta de otros recursos hídricos hace que, en un breve espacio de tiempo, puedan ser necesarias unas condiciones de calidad para su utilización, equiparables a otros recursos puestos en explotación. El agua subterránea es un recurso latente que para ser utilizado debe cumplir con una reglamentación sanitaria, equiparable a la de las aguas superficiales. Por tanto, la actividad humana debería ser respetuosa y sostenible en su área de influencia. ¿Acaso se admitiría como normal, o cuando menos inocua, la instalación de un vertedero o una gasolinera junto a un embalse? Esta misma consideración debería plantearse a la hora de dar luz verde a la instalación de ciertas actividades sobre los acuíferos que, en un momento dado, pueden constituir una fuente de abastecimiento. Caso más grave es cuando un acuífero no es una alternativa a la escasez de recursos sino que es la única fuente de abastecimiento.

Cuando la presión del hombre sobre el territorio es tan fuerte que no se puede frenar su avance, el estudio de los riesgos que conlleva la actividad humana sobre el territorio y sobre ella misma, se torna como un paso ineludible para el desarrollo sostenible y para la seguridad de la propia sociedad. Incluso, desde un punto de vista puramente economicista, podría

plantearse cuánto de rentable es el riesgo de contaminación del agua subterránea en un espacio netamente turístico como la Costa del Sol.

La protección de los recursos naturales, en particular de los recursos hídricos, forma parte de la organización humana en el territorio, no sólo como un punto más en la conservación del medio ambiente, dentro de una línea ecologista y/o economicista, sino que trasciende hacia la propia implantación del hombre en el territorio. La protección de los recursos hídricos subterráneos, como elemento singular del conjunto de los recursos hídricos, tiene una especial trascendencia en el uso del territorio y, por tanto, debería ser considerada en la ordenación del mismo. Como señala Cendrero (1987, 327) “la consideración de los riesgos es un aspecto esencial dentro de los esquemas de ordenación y protección del entorno ambiental”.

Los acuíferos tienen una elevada capacidad de protección natural del agua subterránea que no está exenta de alteración, de ahí el elevado interés por desarrollar herramientas que ayuden a reforzar esa protección natural de las aguas. La elevada presión que sobre estos recursos ejerce la sociedad desarrollada ha dejado atrás una situación, que aun permanece en el inconsciente colectivo, en la que el recurso se ofrece como un bien protegido de forma natural con alta capacidad de regeneración y autodepuración.

El avance tecnológico no ha comportado un aumento paralelo de la protección frente al riesgo y ha supuesto, en el caso de las aguas subterráneas, un aumento de los focos potencialmente contaminantes. En consecuencia, las medidas de protección frente al riesgo deben orientarse hacia el principio de precaución y basarse en medidas preventivas. Además, en el contexto del sur de la península, la presión a la que está sometido el recurso hídrico, dada la variedad de actividades dependientes, hace que adquiera un valor cercano al estratégico. Esta circunstancia, dirige la cuestión hacia la necesidad de considerarlo como factor clave en la ordenación del territorio.

Por todo ello, en este trabajo se ha planteado como objetivo general la propuesta de un **método de estimación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas aplicable y útil para la implantación de medidas preventivas en el marco de la ordenación del territorio**. Este objetivo conlleva el análisis de los focos de peligrosidad y de la vulnerabilidad de los acuíferos, así como el diseño de un método fundamentado en la dimensión cartográfica del riesgo como vía más útil para la intervención sobre el territorio. Se trata de diseñar una cartografía de riesgo en la que cada documento utilizado adquiera un sentido preciso en el marco de la ordenación y gestión del riesgo. La implementación y automatización mediante un SIG confiere, a estos documentos, un carácter dinámico y actualizable que cumple igualmente con el objetivo de operatividad en el contexto de la ordenación del territorio.

Como una necesidad más de la previsión del riesgo, la realidad impuesta por el patrón territorial en contextos como el del sur peninsular, orienta el análisis hacia la gestión del riesgo. En este sentido, existe un elevado grado de desconocimiento en lo que se refiere a las consecuencias de un evento de contaminación sobre la población y al tipo de actividades afectables. Dada esta carencia, en el presente trabajo se ha planteado como objetivo el **análisis y evaluación de la vulnerabilidad de la población y sus bienes** frente al peligro, como medida potencial del distinto grado de afectación.

Por último, ante las deficiencias de una larga trayectoria de estudios que identificaban el peligro con el riesgo, esta tesis plantea un **método integral de análisis del riesgo de**

contaminación de las aguas subterráneas, que considera los distintos componentes del riesgo y permite utilizar los resultados de forma versátil para distintos objetivos. Este hecho ha condicionado en gran parte la metodología propuesta y su complejidad.

Los objetivos planteados, de forma concreta, son los siguientes.

- 1) Diseñar un método para la estimación y análisis integral del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas. El método debe ser útil, tanto para la toma de medidas preventivas, como es el caso de la ordenación del territorio, como para la gestión de un posible evento de contaminación (medidas paliativas y compensatorias). Este objetivo general implica los siguientes objetivos específicos:
 - 1.1) Establecer los **factores** que determinan la evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas.
 - 1.2) Evaluar el papel de la actividad humana como elemento desencadenante de un potencial evento de contaminación (**peligros** de contaminación).
 - 1.3) Definir el o los métodos de evaluación y cartografía de **vulnerabilidad de los acuíferos** frente a la contaminación que mejor se adecuan a las características tipológicas de los mismos (kársticos, fisurados y detríticos). Proponer un método de elaboración propia ajustado a las necesidades y características específicas de medios kársticos.
 - 1.4) Realizar una primera aproximación metodológica a la estimación de la **vulnerabilidad del medio humano** frente a la contaminación de las aguas subterráneas.
 - 1.5) Valorar la importancia de cada componente en la evaluación del riesgo y proponer un algoritmo de cálculo que permita conjugar los factores de **riesgo** que concurren en cada sector del territorio.
- 2) Aplicar y ensayar la metodología en acuíferos de distinta naturaleza (detríticos, fisurados, karstificados), con diferente utilización del recurso y desigual nivel de dependencia por parte de los elementos del medio humano, para contrastar la idoneidad de cada propuesta en distintas situaciones.

**CONCEPTUACIÓN DEL RIESGO
Y SUS COMPONENTES**

2. EVOLUCIÓN, CONCEPTUACIÓN Y CLASIFICACIÓN DEL RIESGO

2.1. EVOLUCIÓN DE LOS ESTUDIOS DE RIESGO

El concepto de riesgo ha ido evolucionando progresivamente desde la Grecia Clásica hasta nuestros días, pero ha sido a partir de los tres últimos siglos cuando ha recibido un significativo avance en su conceptualización. Durante este largo proceso de variaciones en las tendencias epistemológicas sobre la temática del riesgo, se pueden marcar tres hitos fundamentales a la hora de analizarlo (Perles 2002 y 2004). En primer lugar la desmitificación de la catástrofe como un hecho divino. En segundo lugar, la inclusión del hombre como sujeto activo en el riesgo y la incorporación de su tecnología como instrumento capaz de reducir y, a su vez, provocar el riesgo. En tercer lugar, la comprensión del riesgo como una consecuencia de las características intrínsecas de la sociedad, dadas por el contexto social, económico y político y no limitar el riesgo a la existencia de eventos extremos.

Las catástrofes han sido atribuidas, históricamente, a un mal divino, es decir, fuera del control del hombre y relacionadas con manifestaciones extremas de la naturaleza. El diluvio universal, la destrucción de Sodoma y Gomorra, las plagas de Egipto o la Atlántida son ejemplificadas por Ayala (2002) como mitos de la antigüedad que responden a la necesidad humana de encontrar un sentido a los hechos (Eliade, 1951; en Ayala, 2002).

Hasta el siglo XVIII no se produjeron una serie de acontecimientos sociales que acercaron el significado del riesgo a su concepción actual. El control de epidemias por parte de los gobiernos europeos del siglo XVIII (Jones, 1990), el concepto de seguridad durante el siglo XIX apoyado en la idea de fraternidad de la ilustración francesa (Bailliy, 1994) y los efectos devastadores de sucesos extremos durante la época del colonialismo, como fueron la explosión del Krakatoa en 1883 o la sequía de la India entre 1896 y 1897 (Olcina y Ayala 2002), fueron hitos claves para llegar a la idea actual del riesgo (Perles, 2002 y 2004).

De forma simultánea, la idea de progreso que se desarrolló durante los primeros tiempos de la modernidad tuvo como resultado una interferencia acentuada del hombre y su tecnología sobre el medio ambiente. En Estados Unidos, el *Flood Control Act* En este proyecto se incorporó un nuevo concepto de seguridad basado en el control del medio natural (White, 1975), sustentado en la idea de seguridad a través de la innovación tecnológica, tan enraizada durante los primeros decenios del siglo XX. Esta idea de control de la peligrosidad del medio a través de la tecnología se desarrolló hasta los años cincuenta. A la par que esta tendencia surgió, igualmente en Estados Unidos, una idea del riesgo derivada de las relaciones del hombre con el medio, como consecuencia de los planteamientos de Barrows (1923).

A partir de los años sesenta, se empezó a tomar conciencia de la importancia que tiene el hombre y su tecnología como elemento dinamizador del riesgo además de receptor del mismo. La elevada capacidad que el hombre, cada vez más tecnificado, tenía y tiene para interferir negativamente en el medio quedó reflejada, a escala internacional, por la creación del Plan de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la conferencia de las Naciones Unidas sobre los recursos naturales en Estocolmo.

Los trabajos de Burton, Kates y White fueron los primeros en manejar un tratamiento global de los fenómenos extraordinarios. Así, Burton y Kates (1964) hicieron una primera definición del riesgo que se ha tomado como paradigma en la investigación geográfica sobre riesgos naturales (Saurí, 1988). La obra de Gilbert White (discípulo de Barrows) sobre los riesgos naturales demostró la ineficacia de las medidas de control amparadas únicamente en la tecnología, tras observar el fracaso de la política de grandes obras de la *Flood Control Act*. Las medidas de control del riesgo quedaban sin efectividad en el momento que no se analizaba el comportamiento de hombre en el medio, la percepción del individuo y de la sociedad sobre un determinado fenómeno. De esta manera, adquirieron especial importancia los estudios del riesgo que tomaron el comportamiento social o individual de la población como factor de análisis. *The environment as hazard* (Burton *et al.*, 1978) recogió esta tendencia del análisis del riesgo bajo la perspectiva de percepción humana del riesgo. Este giro metodológico del estudio de los riesgos desde el punto de vista del comportamiento del hombre, dio lugar a los estudios de percepción de diversos tipos de riesgo.

A partir de los años setenta, la geografía radical irrumpió en los estudios de riesgo. Como resume Saurí (1988); por un lado, había una falta de análisis riguroso del contexto socioeconómico y político en el que situar la percepción y el comportamiento frente al riesgo y una elevada tendencia a analizar el riesgo, únicamente, bajo aspectos del medio físico. Por otro lado, la gestión del riesgo se llevaba a cabo con medidas paliativas una vez producida la catástrofe, no había una anticipación a la catástrofe basada en el análisis preventivo. La aportación radical quedaba recogida por autores como Susman *et al.* (1983), Watts (1983), Marston (1983), Smith (1984) y Peet (1985). Estos autores propusieron la búsqueda de una teoría social que explicara la desigualdad frente a la catástrofe y, para ello, se apoyaron en otras disciplinas como la historia, la antropología o la sociología. El concepto de adaptación y ajuste frente al medio, de la Geografía de la Percepción se sustituyó por el de vulnerabilidad. Esa perspectiva tuvo como resultado la reorientación de los estudios de riesgo hacia los estudios de la vulnerabilidad. La ordenación del territorio tomó cada vez más fuerza como vía para corregir las situaciones sociales potencialmente catastróficas y, de este modo, aumentó el protagonismo de las medidas preventivas frente a las paliativas.

Hasta la década de los años ochenta, la producción científica fuera del ámbito anglosajón, fue escasa y estuvo centrada en la denominada Geografía de las Calamidades Buj (1997). A partir de este momento, es cuando el estudio del riesgo adquirió una nueva dimensión gracias a las aportaciones de la Geografía Francesa, que incorporó la perspectiva física y humana en su análisis Perles (2002 y 2004). Esta nueva tendencia procedía de las aportaciones de Bertrand y, más concretamente, de Tricart, y Faucher, aunque el germen de esta nueva tendencia surgió de las propuestas de Tricart en el coloquio de Geografía Aplicada de Estrasburgo de 1961 (Saurí y Ribas, 1994; Aneas de Castro, 2000 y Phlipponneau, 2001).

En España, debido a la influencia de la Geografía Francesa, el interés por los estudios de riesgo bajo una perspectiva integradora tuvo su inicio en la segunda mitad de la década de los ochenta, si bien los primeros antecedentes fueron en los años setenta como parte del análisis de las inundaciones. En el IX y XII congreso de la Asociación de Geógrafos Españoles se incluyeron ponencias específicas sobre los riesgos naturales a cargo de Calvo García Tornel y Ortega Alba, respectivamente, con especial vinculación en la gestión de los mismos y la ordenación del territorio. El interés por los riesgos, bajo una perspectiva integradora, fue

consecuencia de un progresivo desarrollo de la temática en otras líneas de investigación sectoriales, pero que tenían como hilo conductor, igualmente, el riesgo. La importancia que adquirió la temática de los riesgos también quedó manifiesta con la edición de un número monográfico en el décimo boletín de la AGE de 1990.

En la década de los noventa, a escala internacional, surge la aproximación contextual al análisis del riesgo (Mitchel *et al.*, 1989; Palm, 1990; Kirby (comp), 1990; Ribas y Saurí, 1996). El contexto político, social y económico determinó, en gran medida, la respuesta humana y el modelo de gestión del riesgo. Paralelamente, se produjeron otra serie de aportaciones teóricas del riesgo bajo una perspectiva social (Krimsky y Holding (comps), 1992), de la vulnerabilidad humana (O'Riordan, 1986; Blaikie *et al.*, 1994) y sobre la amplificación social de los riesgos (Kasperson, 1992).

Desde un punto de vista institucional, el interés por el estudio de los riesgos quedó recogido internacionalmente por la ONU y la UE. Por un lado, la ONU con la proclamación del decenio 1990-1999 como "Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales". Este programa, según Cutter (1996a), pretendió centrar el análisis del riesgo desde la planificación, preparación y prevención de la catástrofe. Se reforzaron las medidas de anticipación de la catástrofe mediante el análisis del riesgo como herramienta de prevención. Por otro lado, en el marco de la UE, el cuarto Programa de Acción Comunitaria en materia de Medio Ambiente (DOCE 1987, 328/3) recogió, de forma indirecta, la necesidad establecer medidas que minimizaran el impacto de las catástrofes sobre el medio humano y natural. En el quinto programa se estableció ya específicamente la gestión del riesgo y de la catástrofe, una gestión preventiva del riesgo como vía de control de las interferencias y la vulnerabilidad.

Los puntos que faltaban para llegar a una concepción actual del riesgo fueron dados por el carácter global en que se circunscriben y por la distribución de las consecuencias de un suceso extremo. Con la expresión "sociedad del riesgo" (Beck, 1992, 1993, 2000) hizo referencia a un estadio de desarrollo de la organización social en el que se asume el riesgo derivado de la toma de decisiones de relevancia pública. Los riesgos modernos tienen una elevada resonancia al enmarcarse dentro de la globalidad y cambio ambiental. Ante esta situación, el estado adquiere el papel de entidad subsidiaria y de ofrecer protección frente al riesgo.

El carácter global y complejo del riesgo necesitaba de un enfoque transversal y holístico (Ortega, 2000; Philipponneau, 2001; Calvo, 2001). El análisis del riesgo experimentó otra vía de impulso en la línea de articular los estudios de riesgo hacia una ciencia transversal denominada Ciencia Cindínica (expresión utilizada en principio por Faugères en 1987 en la reunión de la UNESCO celebrada tras el desastre de Chernobil) cuyo cuerpo teórico fue abordado en primer lugar por Kervern y Rubise (1991). La Ciencia Cindínica utiliza su propia metodología para abordar la diversidad de estudios de riesgo a través de la secuencia riesgo - peligro - crisis (Calvo, 2001). La aproximación geográfica a este nuevo enfoque transversal se encuentra en Faugères (1995) y su propuesta de Ciencia Geocindínica o Geociencia del riesgo.

En los últimos tiempos se ha producido un receso en los avances metodológicos para analizar el riesgo (Aneas de Castro, 2000). Los esfuerzos han estado orientados a analizar las consecuencias de los peligros y la prevención del riesgo. La gestión y evaluación de los riesgos ha sido abordada, tradicionalmente, por geólogos e ingenieros, bajo una perspectiva centrada en aspectos del medio físico, que ha derivado en una carencia de aspectos que traten el análisis de los riesgos con una perspectiva global (Pita (coord.) 1999; Calvo, 2001;). La

percepción social de los riesgos, la vulnerabilidad del medio humano, análisis histórico-cultural de las poblaciones, valoración de las consecuencias del riesgo o la mitigación de los daños ocasionados son aspectos a tener en cuenta en un análisis integrador del riesgo (Calvo, 2000), facetas que, en muchos casos, aun siguen constituyendo hoy una asignatura pendiente. En esta misma línea, Perles (2004) realiza una recensión de las carencias y necesidades actuales de los trabajos de riesgo, y apunta a la realización, entre otros, de estudios integrados de los distintos componentes del riesgo como una de las temáticas a desarrollar en el ámbito aplicado.

2.2. CONCEPTO DE RIESGO

El riesgo ha sido definido por distintos especialistas desde puntos de vista muy diferentes, tantos como escuelas y tendencias epistemológicas. Algunas definiciones de riesgo, con repercusión a escala nacional e internacional, quedan recogidas en el cuadro 2.1.

Burton y Kates (1964)	Conjunto de elementos del medio físico y biológico nocivos para el hombre y causados por fuerzas ajenas a él.
Rowe (1977)	Probabilidad de ocurrencia de un peligro por el valor del daño. Se mide en unidades monetarias.
Varnes (1984)	Pérdidas debidas a un fenómeno natural concreto. Es función de la probabilidad de ocurrencia, de la vulnerabilidad del elemento afectado y de la cantidad de elementos expuestos al riesgo.
ONU (1984)	Grado de pérdida previsto a causa de un fenómeno natural determinado.
Calvo (1985)	Situación concreta en el tiempo de un determinado grupo humano frente a las condiciones de su medio, en cuanto que este grupo es capaz de aprovecharlas para su supervivencia o incapaz de dominarlas a partir de determinados umbrales.
Cendrero (1987)	Posibilidad de daño a personas, instalaciones o actividades para lo que además de la peligrosidad, habrá que considerar la existencia de poblaciones, infraestructuras, etc.
Panizza (1988)	Probabilidad de que las consecuencias económicas y sociales de un cierto fenómeno peligroso supere un determinado nivel.
Ortega (1991)	Eventualidad de que ocurra un daño para las personas o sus bienes en un espacio afectado por un proceso natural que puede desencadenarse en un futuro.
Pita (coord.) et al. (1999)	Todo fenómeno extremo y coyuntural que produce impactos negativos sobre el medio y la sociedad. Resultaría de multiplicar el valor de la peligrosidad por los daños causados. Se suele medir en unidades monetarias.
Aneas (2000)	Probabilidad de un individuo o grupo de estar expuesto y afectado. Probabilidad de ocurrencia de un peligro.
Olcina y Ayala (2002)	Daño o pérdida esperable a consecuencia de una acción de un peligro sobre un bien a preservar, sea la vida humana, los bienes económicos o el entorno natural.

Cuadro 2.1. Definiciones de riesgo (Perles, 2002).

En todas estas definiciones se repiten aspectos como probabilidad de ocurrencia de un suceso extremo, carácter negativo del mismo y producción de pérdidas.

La probabilidad de que se produzca un acontecimiento de cualquier índole en el tiempo y en el espacio tiene una componente estocástica. La ocurrencia de un suceso es fruto del azar y, por tanto, desconocida a priori su manifestación. La incertidumbre que rodea a un evento extremo, solo queda despejada por las secuelas que puede provocar sobre la población o sobre el medio. El concepto de riesgo está ligado a las consecuencias negativas que puede provocar un evento extremo.

De un modo genérico, el riesgo se puede definir como la probabilidad de que se produzca un daño social a consecuencia de un suceso extremo. En esta definición quedan recogidas las tres características básicas del riesgo que subyacen en la mayoría de las definiciones: la estocástica (probabilidad) la negativa (daño) y la humana (social).

Las relaciones del hombre con el medio son el resultado de aspectos asociados al nivel cultural y tecnológico de la sociedad y, de igual modo, el concepto de riesgo ha tenido y tiene distinto significado en culturas y momentos históricos diferentes. Por ejemplo, en el antiguo Egipto la población tenía conocimiento de los periodos de inundación del lecho del río Nilo, lo cual utilizaban como método de enriquecimiento de la tierra de labranza (Cardona, 2001). En cambio, el auge de los procesos urbanísticos en detrimento de las áreas de cultivo, ha provocado la aparición de zonas de riesgo cuando en otros tiempos eran zonas de provecho. De este modo, los cambios en el contexto social pueden provocar comportamientos muy distintos de un mismo evento de riesgo.

2.3. TIPOS DE RIESGO. RIESGO TECNOLÓGICO

El origen del riesgo permite distinguir entre riesgos naturales y tecnológicos. Burton y Kates (1972) definieron el riesgo natural como “todo fenómeno extremo de la naturaleza que resulta perjudicial para el hombre y que está originado por fuerzas externas a él, incontrolables e imprevisibles, de manera que otorgan al desastre un carácter azaroso que lo convierte en riesgo para la sociedad”. Los riesgos tecnológicos son definidos como un accidente del aparato productivo que, además de azaroso e imprevisible, resulta dañino para el medio y la sociedad (Pita (coord.), 1999).

Un grupo de riesgos que se sitúa entre los naturales y los tecnológicos son los inducidos. Los riesgos inducidos son aquellos en los que el hombre actúa como detonante de un riesgo natural. Para Olcina y Ayala (2002, 60) los riesgos naturales inducidos son aquellos que “cursan una dinámica plenamente natural una vez desencadenados por la acción humana”.

Pita (coord.) (1999) clasificaron los riesgos, una vez diferenciados por su origen, en función del agente físico que los activa. En cambio, Olcina y Ayala (2002) los clasificaron, en primer lugar, en función del medio donde se localiza el riesgo y, seguidamente, por el agente activador. Una clasificación detallada de los riesgos fue elaborada por Ortega (1991) en la que, junto a los criterios anteriores, se añadieron aspectos relacionados con la velocidad de implantación, la capacidad de previsión y el tipo de prevención que se adecua a cada riesgo.

La clasificación del riesgo en natural, tecnológico o inducido sirve para diferenciar la posición que el hombre toma frente a él, ya sea activa o receptora. Receptora, o pasiva, es cuando el origen del riesgo es natural, activa y, a la vez, receptora en el caso de los riesgos inducidos y tecnológicos. No obstante, en la actualidad, muchos autores consideran que, en la

mayoría de los casos, no puede hablarse de una postura pasiva por parte del hombre dado que interactúa en el proceso, al menos, a través de la exposición.

Los riesgos naturales son coetáneos a la existencia del hombre, pero los riesgos tecnológicos son muy recientes en la escala temporal de la humanidad. Con la Revolución Industrial en el siglo XVIII surgió un nuevo concepto de riesgo, que dejó de lado postulados anteriores sobre calamidades con un origen divino y consideró al hombre como principal inductor de los desastres debido fundamentalmente a dos aspectos. En primer lugar, se amplió la tipología de riesgos al incorporarse nuevos sistemas de producción con una mayor capacidad de interferencia en el medio natural. Conforme se desarrolló la tecnología, aumentó la capacidad de impacto del hombre. En segundo lugar, la Revolución Demográfica, paralela a la Revolución Industrial motivó el crecimiento exponencial de la población, por lo que el número de personas expuestas al peligro (como elemento básico en la estimación del riesgo) también aumentó de forma exponencial, sobre todo al producirse este incremento de forma concentrada (crecimiento de ciudades, áreas industriales, etc).

Todos los riesgos tecnológicos no implican eventos súbitos e intensos sino que también los hay con un carácter difuso. Pita (coord.) (1999) diferenció dentro de los riesgos tecnológicos: los intensos, que son los derivados de un accidente o de una situación coyuntural y los difusos, que son aquellos asociados a procesos de deterioro del medio que no implican una alarma social.

En la actualidad, la gestión de los riesgos tecnológicos, o causados por el hombre, se desarrolla mediante planes de emergencia, los cuales buscan la salvaguardia de las personas tras un evento catastrófico. En el ámbito español esta tarea ha recaído en Protección Civil, entidad que ha diseñado una serie de procedimientos para actuar frente a accidentes de consecuencias negativas. En los últimos tiempos se ha avanzado en la línea de analizar las catástrofes antes de su manifestación, para lo cual se fomenta la evaluación del riesgo como medida a tener en cuenta en la prevención. Así, la propia Protección Civil y el Centro Europeo de Investigación Social de Situaciones de Emergencia, han desarrollado diversas conferencias bajo esta temática e impulsado estos estudios mediante la dotación de premios económicos a tesis doctorales que estudien los riesgos bajo esta perspectiva.

En el caso concreto de las aguas subterráneas, los estudios llevados a cabo en España, y prácticamente en la totalidad de la comunidad internacional, han sido poco desarrollados. Actualmente, se está produciendo un giro importante en temáticas como la estimación y análisis del riesgo, desde un punto de vista integrador, en la que se analiza al hombre como elemento activo y pasivo del problema de contaminación de las aguas subterráneas.

3. RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

3.1. ANTECEDENTES Y CONCEPTUACIÓN DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El riesgo de contaminación de aguas subterráneas es una línea de investigación que cuenta con una historia relativamente reciente. En el ámbito internacional se obtuvieron, a finales de la década de los sesenta, los primeros resultados en esta temática, que recogían solamente la perspectiva física del problema. Al igual que ocurre con otros estudios de riesgo, como pudiera ser el relacionado con la erosión, las características físicas del medio se analizaron en primer lugar para evaluar el riesgo, concretamente, los parámetros hidrogeológicos de los acuíferos para definir su susceptibilidad frente al peligro. Esta tendencia ha estado motivada por la adscripción científica de los especialistas que han trabajado inicialmente esta temática. La contaminación de los acuíferos ha sido un campo tratado mayoritariamente por hidrogeólogos, bajo una perspectiva focalizada en los aspectos intrínsecos de los acuíferos. A finales de la década de los noventa se incorporó un nuevo aspecto en la evaluación del riesgo: la influencia del hombre como desencadenante de los procesos de contaminación y de incremento del riesgo. El avance se produce nuevamente desde el campo de la Hidrogeología pero ya se empieza a notar un incremento de geógrafos y otros especialistas de la rama de ciencias ambientales que se interesan por la cuestión.

El principal avance en los estudios del riesgo de contaminación de aguas subterráneas procede del campo de la Hidrogeología, como se deduce de las numerosas aportaciones presentadas en los congresos de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH) y en diversas conferencias internacionales sobre el tema. Esta inquietud a escala internacional sobre el problema de contaminación de las aguas subterráneas, también ha sido recogida por organismos como la UNESCO (PICG 448), que ha realizado, igualmente, jornadas y programas de investigación sobre dicha temática. En el ámbito europeo, el interés por el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas ha tenido como consecuencia las Acciones COST 65 y 620, dedicadas a establecer un marco de actuación común para los países europeos, frente a la vulnerabilidad y riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en acuíferos kársticos.

Dentro del campo de la Hidrogeología, se han realizado las primeras definiciones sobre el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas. Así, por ejemplo, Foster (1987) lo definió como la interacción entre la vulnerabilidad natural de un acuífero y la carga contaminante aplicada en el medio subsuperficial por la acción humana. Para Robins *et al.* (1994), el riesgo a la contaminación es la interacción de la vulnerabilidad natural del acuífero y la carga contaminante generada por la actividad humana. Las dos definiciones anteriores son muy similares y recogen un sesgo muy importante en los estudios de riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, según el cual el análisis se centra en los parámetros del medio físico, y considera el riesgo estrictamente sobre el acuífero, sin tener en cuenta las consecuencias de la contaminación sobre la sociedad afectada. En estas definiciones se contempla como receptor del riesgo el propio acuífero y las aguas subterráneas, sin ser valoradas éstas como un recurso natural, del cual la población presenta cierta dependencia. Sin embargo, en el presente trabajo, sí se considera que el objeto puesto en riesgo constituye un recurso estratégico para el

desarrollo humano. Para su estimación es necesario valorar las consecuencias negativas sobre la población y las actividades dependientes del agua subterránea (Perles *et al.*, 2004). Así, en el contexto de esta tesis, el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas es la **probabilidad de que ocurra un daño social como consecuencia de la contaminación de las aguas subterráneas a causa de la actividad humana**. Esta concepción del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, al centrarse en las consecuencias sobre la sociedad, permite utilizar el resultado de su evaluación tanto en el contexto de la prevención del riesgo como en el de gestión de la catástrofe.

El riesgo de contaminación de aguas subterráneas reúne varios aspectos que lo caracterizan singularmente en el ámbito de los riesgos tecnológicos.

En primer lugar, el riesgo tecnológico puede clasificarse como intensivo o penetrante según las características del suceso de contaminación. Esta doble caracterización propuesta por Pita (coord.) (1999), está muy condicionada, en el caso de la contaminación de las aguas subterráneas, por el tipo de acuífero que se analice, puesto que cada acuífero responde de diferente forma ante un mismo evento de contaminación. No obstante, en contra de lo que es habitual en los riesgos tecnológicos, normalmente asociados a accidentes mayores y de carácter intensivo, la contaminación de acuíferos suele ser un proceso difuso que caracteriza al riesgo como penetrante (Pita (coord.) 1999).

En segundo lugar, el riesgo de contaminación de aguas subterráneas es una temática compleja que aborda el estudio de los riesgos sin presentar un único agente activador del mismo. Los riesgos naturales tienen su origen en un elemento del medio natural como ocurre en el caso de los huracanes, inundaciones, terremotos. Los riesgos tecnológicos, normalmente, también tienen un agente concreto detonante del problema. En cambio, el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas solo mantiene fijo el elemento que va a soportar el riesgo pero no el origen de la contaminación, de manera que se tiene en cuenta un amplio espectro de actividades humanas. Los contaminantes que el hombre utiliza son muchos por lo que hacer una cartografía para cada tipo o grupo de contaminante sería una tarea, prácticamente, inabarcable.

En tercer lugar, las dos principales clases de riesgo, natural y tecnológico, son extrapolables al caso concreto de la contaminación de aguas subterráneas. El riesgo de contaminación de las aguas subterráneas puede presentar ambas perspectivas, es decir, puede tener un carácter natural, caso de la salinización por disolución de evaporitas existentes en un acuífero, o puede deberse a un vertido incontrolado de contaminantes. El riesgo que se va a estudiar en este trabajo es el derivado de la actividad humana que pone en peligro la calidad de las aguas.

En resumen, el riesgo de contaminación de aguas subterráneas es un proceso natural y/o tecnológico, penetrante y/o intensivo, sin un único agente activador del riesgo y donde el daño se produce, tanto en el medio natural (recurso hídrico), como en el social (población y sus bienes).

3.2. RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL MARCO DE LA ACCIÓN EUROPEA COST 620

El programa para la cooperación europea en el campo de la investigación científica y técnica, denominado COST, fue fundado en 1971. Este programa está basado en acciones que funcionan a modo de redes de trabajo entre miembros del espacio europeo. La Acción COST 620 (*Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonated, karst, aquifers*) se desarrolló entre 1998 y 2003 y en ella se analizó la vulnerabilidad y el riesgo sobre los acuíferos kársticos para su posterior protección.

La Acción COST 620 fue la continuación de la Acción COST 65, desarrollada entre 1995 y 1997, en la cual se abordaron los aspectos hidrogeológicos a tener en cuenta para la protección de acuíferos kársticos. Su objetivo era establecer una aproximación metodológica para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos kársticos, como herramienta de protección de los mismos. Paralelamente, se comprobó la aplicabilidad de los métodos desarrollados en los países de la Unión Europea.

En el marco de la Acción COST 620 el riesgo de contaminación del agua subterránea se ha evaluado a partir de los factores de peligro (*source*) y vulnerabilidad del medio físico del acuífero (*pathway*). La contaminación del agua subterránea (*target*) representa el último estadio de un proceso en el que el acuífero se comporta como el medio donde se desarrollan y tienen lugar los factores anteriores (Daly *et al.*, 1997, Daly *et al.*, 2002):

Source → Pathway → Target

En este modelo las fuentes potenciales (*source*) son los peligros de contaminación. Los principales contaminantes de las aguas subterráneas (epígrafe 4.1.2) son metales pesados, compuestos químicos orgánicos, fluidos orgánicos inmiscibles, fertilizantes, pesticidas, bacterias y virus (Matthess y Millar, 1994). Según De Keteleare *et al.* (2004) los contaminantes proceden de:

- emisión de efluentes gaseosos
- vertido de aguas residuales y líquidos orgánicos no acuosos
- almacenamiento y depósito de residuos sólidos
- minería, industria y construcción
- uso de fertilizantes y pesticidas en la agricultura.

El acuífero es el medio por donde circula el contaminante (*pathway*) hasta llegar al agua subterránea; tiene unas características intrínsecas que condicionan el comportamiento de los contaminantes, es decir, presenta una determinada susceptibilidad a ser afectado. El objetivo del contaminante (*target*) es el agua subterránea y queda definido por el riesgo de contaminación. Para ello, es necesario especificar cual es el objetivo, puesto que en relación con las aguas subterráneas hay varios elementos que se pueden considerar (Daly *et al.*, 1997):

áreas de recarga del acuífero, superficie piezométrica, flujo de agua subterránea o áreas y/o puntos de descarga (manantiales, pozos y sondeos).

Del modelo anterior se desprende el esquema conceptual representado en la figura 3.1, donde la estimación del riesgo es el resultado del análisis del peligro, de la vulnerabilidad (entendida en el sentido estrictamente físico) y de las consecuencias o daños (Daly *et al.*, 1997). La estimación de las consecuencias alude a las repercusiones del peligro de contaminación sobre la población, al entenderse el agua subterránea como un recurso de uso humano.

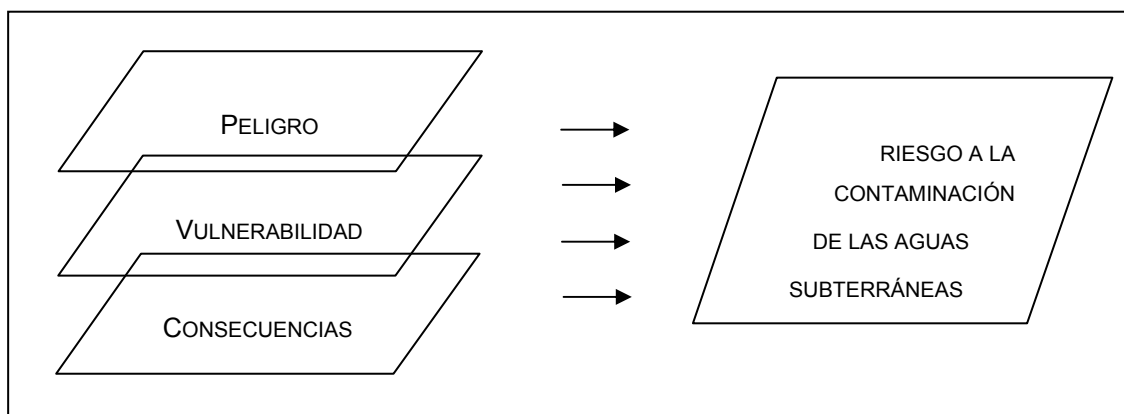


Figura 3.1. Esquema conceptual de la estimación del riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas en el marco de la Acción Europea COST 620 (Daly *et al.*, 1997).

Este enfoque de análisis del riesgo considera en su planteamiento las consecuencias del evento de contaminación sobre la población, junto con los peligros y la vulnerabilidad del acuífero, lo que permite una aproximación actual al riesgo. Según este modelo el objeto final de la evaluación del riesgo es el agua, como recurso humano y la dependencia social. Sin embargo, son muy escasas las aproximaciones que han desarrollado este último aspecto dentro de la Acción Europea COST 620, en el marco de la cual se ha primado la peligrosidad y los aspectos determinantes de la vulnerabilidad del acuífero en el análisis del riesgo.

3.3. ANÁLISIS Y ESTIMACIÓN DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN UN CONTEXTO DE SOSTENIBILIDAD

3.3.1. ANÁLISIS DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El análisis del riesgo se puede realizar en distintos niveles diferenciados por el grado de complejidad implícito a cada uno de ellos. Estos niveles de análisis se asocian con las medidas a adoptar frente al riesgo: de previsión, prevención y gestión de la catástrofe.

La previsión es un nivel de análisis del riesgo que presenta un territorio frente a uno o varios procesos naturales y/o tecnológicos. Según Ortega (1991), la previsión de los riesgos tiende, por un lado, al conocimiento de los fenómenos naturales susceptibles de originar catástrofes, a lo que se le puede añadir la resultante del comportamiento humano, como medida de reducir el

riesgo derivado de la incertidumbre del mismo. Por otro lado, tiende a la evaluación de las consecuencias económicas y humanas que conllevan los sucesos extremos naturales. Los componentes que se deben utilizar en la evaluación del riesgo, como medida de previsión del mismo, pueden ser varios. Ayala (1993) estableció la peligrosidad, la vulnerabilidad y la exposición como los componentes de evaluación del riesgo. En cambio, Cendrero (1987) y Barberi (1995) utilizaron la peligrosidad, la vulnerabilidad y el valor de la pérdida para evaluar el riesgo. No hay una clara definición de cuáles son los componentes que se deben emplear en el análisis del riesgo, pero sí se observa un denominador común en relación al significado de los mismos, de manera que siempre hay un componente referido al agente que desencadena el riesgo y otro que indica características del elemento receptor del peligro y las consecuencias que tienen lugar sobre él.

Otro nivel de análisis, la prevención, está relacionado con el análisis de las medidas de atenuación del riesgo, tanto estructurales como no estructurales. La prevención del riesgo de contaminación de aguas subterráneas es un campo todavía por explorar, prueba de ello es la ausencia de directrices que especifiquen los planes de emergencia a adoptar en caso de siniestro o desastre sobre este tipo de riesgo tecnológico. Protección Civil ha desarrollado cuatro directrices frente a riesgos naturales clásicos en nuestras latitudes, como son el riesgo de incendio, inundación, sísmico y volcánico, y dos frente a riesgos tecnológicos que son los del transporte de mercancías peligrosas y de la industria química.

La presente tesis se ha centrado, en primer lugar, en la evaluación del riesgo como técnica de previsión del mismo y diagnóstico previo a la implantación de medidas preventivas. Como indicó Ewald (1986) “el cálculo del riesgo permite desarrollar formas y métodos para hacer predecible lo impredecible”, se busca conocer cuáles son las zonas en riesgo para así evitarlo y no asumirlo según el principio de precaución. En este sentido, ya se han desarrollado las primeras líneas de actuación por parte de los organismos implicados en la gestión del territorio para proceder a la previsión del riesgo, como se desprende de la Ley de Ordenación Urbanística de Andalucía (2002) que obliga a declarar como no urbanizable, en el planeamiento sectorial, o en el propio Plan General de Ordenación Urbana, aquellos sectores que registren riesgos naturales y/o tecnológicos. El espíritu de esta normativa propicia que, a partir de la previsión de un riesgo, se tomen una serie de medidas preventivas basadas en la precaución frente a la compensación. En segundo lugar, mediante el análisis de la afectación concreta que puede tener un evento de contaminación sobre los distintos sectores sociales (población y bienes), en esta memoria se intenta aportar un instrumento de ayuda a la gestión de la catástrofe, mediante la definición de los sectores prioritarios a la hora de establecer medidas paliativas y/o compensatorias.

3.3.2. MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Las técnicas empleadas en la elaboración de los índices de riesgo son diferentes según el autor y el tipo de riesgo. No existe un consenso sobre el método de evaluación, número y tipo de componentes empleados en su análisis. A continuación, se citan algunos métodos de evaluación del riesgo recopilados en distintos trabajos.

- Riesgo = $PT = CG \cdot PA \cdot CP \cdot FC \cdot FS$; donde CG = índice de coste geológico (pts/suceso/persona), PA = índice de población, CP = coeficiente de proximidad, FC = componente de catástrofe, FS = frecuencia de sucesos, Alfors *et al.* (1973) (en González, 1987 y Pita (coord.) 1999⁽²⁾)
- Riesgo = $Pc \cdot C(v)$; donde Pc = probabilidad de ocurrencia, C(v) = Valor del daño, Rowe (1977).
- Riesgo = $V \cdot (v / P)$; donde V = valor económico, v = vulnerabilidad (%) y P = periodicidad, Fournier (1979)
- Riesgo = $P \cdot E \cdot V$; donde P = probabilidad anual de excedencia, E = exposición (personas y valor económico), V = vulnerabilidad (tanto por uno de la pérdida), Varnes (1984)
- Riesgo = $P \cdot V$, donde P = Peligro y V = vulnerabilidad, Panizza (1988) y Van Diseen y Mcverry (1994)
- Riesgo = $P \cdot E \cdot V \cdot R$, donde P⁽³⁾ = peligro, E = exposición, V = vulnerabilidad y R = respuesta, Mitchell (1990)

Estos métodos se han utilizado en el cálculo de los riesgos en general. En ellos se evalúan componentes relacionados con el peligro, la vulnerabilidad, la exposición de personas y el valor de los bienes expuestos al peligro. Las últimas tendencias de evaluación del riesgo están enfocadas hacia la utilización de sistemas basados en la inteligencia artificial y redes neuronales, tal y como se recoge, por ejemplo, en los trabajos de Cardona (2001) y Liesch y Hötzl (2004).

En el campo de las aguas subterráneas, las primeras aproximaciones a la evaluación del riesgo de contaminación se realizaron a partir de los años setenta, bajo el enfoque de la vulnerabilidad de los acuíferos. No es hasta la década de los ochenta cuando se consideraron otros factores con incidencia en el riesgo al margen de las características de los acuíferos como por ejemplo la exposición.

Una de las aportaciones iniciales al análisis del riesgo fue de Aller *et al.* (1987), a partir de una serie de factores cuyas iniciales forman el acrónimo IMPACT: el tiempo de paso del contaminante a través del acuífero, distancia de la población a los puntos de abastecimiento, volumen de población expuesta, periodicidad de la actividad contaminante, concentración de contaminantes y toxicidad del contaminante. En función de estos factores se pondera el índice de vulnerabilidad del acuífero para cada contaminante y situación concreta.

La metodología planteada por Foster (1987) para la evaluación del riesgo tiene en cuenta, además del peligro y de la vulnerabilidad, la magnitud del evento y la importancia del recurso a partir de parámetros como tipo de abastecimiento, calidad del agua del acuífero y volumen de población existente.

² Pita (coord.) (1999) hace referencia a las pérdidas por suceso como $PS = CG \cdot PA \cdot CP \cdot FC$

³ En la fórmula original se utiliza *risk* como sinónimo de peligro y *hazard* como riesgo.

Foster e Hirata (1988) analizaron el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas a partir de los peligros y la vulnerabilidad de los acuíferos (figura 3.2). Según es método, el objeto del estudio son las consecuencias sobre el medio natural, sin tener en cuenta a la población.

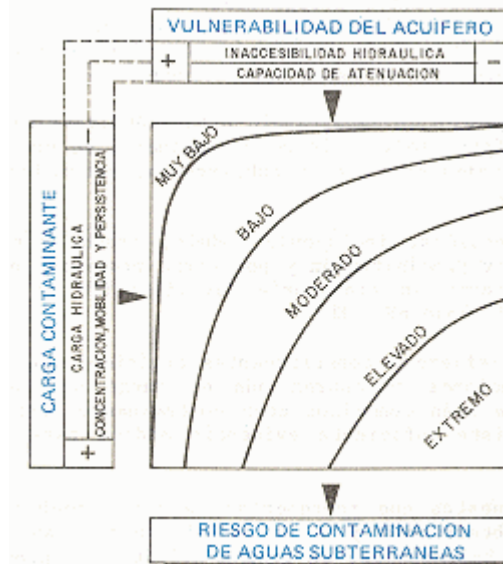


Figura 3.2. Riesgo de contaminación de aguas subterráneas según Foster y Hirata (1988).

Algunas aproximaciones realizadas para el cálculo del riesgo de contaminación de aguas subterráneas establecen un sistema de matrices o tablas cruzadas, como por ejemplo la recogida en el cuadro 3.1, a partir de los peligros de contaminación y de la vulnerabilidad del acuífero mediante un sistema de matrices de 3×3 .

	I			
H	I1	I2	I3	
H1	R1	R1	R2	
H2	R1	R2	R3	
H3	R2	R3	R3	

Cuadro 3.1. Evaluación del riesgo; I = Vulnerabilidad del acuífero, H = Peligro de contaminación y R = Riesgo de contaminación. Modificado de Hötzi *et al.* (2004).

Un modelo más completo fue el diseñado por Civita y De Maio (1997a) (también en Ducci, 1999) mediante una matriz de tres entradas (cuadro 3.2) que tiene en cuenta la vulnerabilidad del acuífero, la importancia socioeconómica del recurso y la peligrosidad de las actividades humanas.

V	Muy Bajo (mb)				Bajo (b)				Medio (m)				Alto (a)				Muy Alto (ma)				Extremo (e)			
	B	M	A	MA	B	M	A	MA	B	M	A	MA	B	M	A	MA	B	M	A	MA	B	M	A	MA
1								mb			mb	mb			mb	b	mb	mb	b	m	mb	mb	m	a
2			mb	mb		mb	mb	mb	mb	mb	mb	b	mb	mb	b	m	mb	mb	m	a	b	b	m	a
3	mb	mb	mb	mb	mb	mb	mb	b	mb	mb	b	b	mb	mb	b	m	mb	b	a	a	b	m	a	ma
4	mb	mb	mb	mb	mb	mb	b	b	mb	b	b	m	mb	b	m	a	b	m	a	ma	b	m	a	ma
5	mb	mb	b	b	mb	mb	b	m	mb	b	b	m	b	b	m	a	b	m	a	ma	b	a	ma	ma
6	mb	mb	b	m	mb	b	b	m	b	b	m	a	b	m	a	ma	b	a	ma	ma	b	a	ma	ma
7	mb	b	b	m	b	b	m	a	b	m	a	ma	b	m	a	ma	b	a	ma	e	m	ma	ma	e
8	b	b	m	a	b	b	ma	ma	b	m	a	ma	b	a	ma	e	m	ma	ma	e	m	ma	e	e
9	b	m	a	ma	b	m	ma	e	m	a	ma	e	m	ma	e	e	m	e	e	e	a	e	e	e

Cuadro 3.2. Estimación del riesgo según Civita y De Maio (1997a). Leyenda: V = vulnerabilidad del acuífero; Vr = vulnerabilidad socioeconómica; DCI = índice de Peligro.

Darmendrail (2001) propuso una estimación del riesgo a partir de un índice obtenido mediante una sumatoria lineal ponderada que puede ser resumida de la siguiente forma:

$$\text{Riesgo} = 3 P + A + 6 E + 6 I$$

donde P = peligro, A = vulnerabilidad del acuífero, E = exposición de personas e I = impacto por la contaminación.

Hötzl *et al.* (2004) establecieron el riesgo como el cociente de la vulnerabilidad entre el peligro de contaminación

$$RI = 1/HI \cdot \pi$$

donde RI es el valor de riesgo, HI el índice de peligro y π la vulnerabilidad del acuífero. El valor obtenido está en consonancia con la evaluación del riesgo descrita en Foster y Hirata (1988) y Morris y Foster (2000), en la medida que no se tienen en cuenta factores relacionados con el medio humano. Frente a este problema, Hötzl (2004) y Hötzl y Neukum (2004) propusieron estimar el riesgo de contaminación de aguas subterráneas agregando el valor económico y ecológico del acuífero al valor de riesgo derivado del peligro y la vulnerabilidad (figura 3.3). El método propuesto es un sistema de matrices de 3x3 en el que se combinan la intensidad del riesgo (risk intensity), determinada por la vulnerabilidad y el peligro, con la sensibilidad del mismo (risk sensitivity), definida por el valor ecológico y económico.

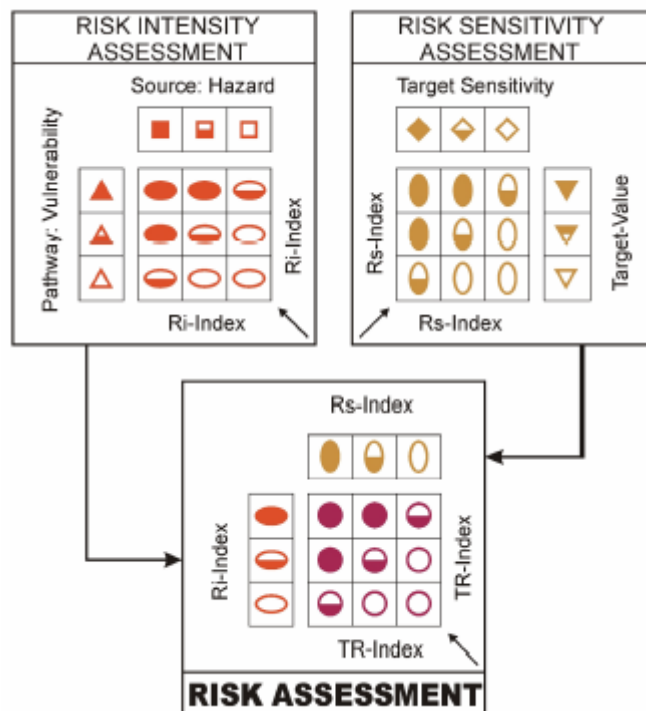


Figura 3.3. Esquema de evaluación del riesgo según Hötzl (2004) y Hötzl y Neukum (2004).

4. COMPONENTES DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El riesgo, en general, se ha interpretado como una función del peligro (parte activa) y de la vulnerabilidad del elemento receptor (componente pasiva). En el caso concreto de las aguas subterráneas la vulnerabilidad, ha estado referida, tradicionalmente, al acuífero. En la definición de riesgo propuesta en el epígrafe 2.2, se hace referencia a que un suceso extremo produzca un daño social. Olcina y Ayala (2002) diferenciaron distintos tipos de daños en función del elemento receptor del peligro: humano, económico, estructural y ecológico.

En un evento de contaminación se produce un daño medioambiental, previamente al daño social. Dado que el agua subterránea es un recurso natural y, como tal, tiene un valor económico, puede ser considerado como un bien a proteger y su protección será mayor o menor en función, entre otros aspectos, de la utilización del recurso. El análisis de la vulnerabilidad en el contexto del riesgo de contaminación de agua subterránea tiene una doble vertiente, según que el elemento considerado en riesgo sea el agua subterránea o la sociedad dependiente del recurso. Así, se puede diferenciar entre la vulnerabilidad del medio físico del acuífero y la vulnerabilidad del medio humano dependiente del recurso (Perles *et al.*, 2004).

Las últimas tendencias en el análisis del riesgo establecen la evaluación del mismo desde una perspectiva contextual, por la que se tiene en cuenta el estado de la sociedad dependiente de los recursos hídricos como una componente más del riesgo. En el presente trabajo se sigue una pauta de análisis que integra, además de la vulnerabilidad del acuífero, factores que determinan la vulnerabilidad de la sociedad, ahondan así en el enfoque contextual del riesgo.

En consecuencia, los componentes de evaluación del riesgo que se han empleado en este trabajo son tres: peligro de contaminación, vulnerabilidad del acuífero (medio físico) y vulnerabilidad de la población y sus bienes (medio humano). Los peligros cumplen la función de agente desencadenante del proceso de contaminación de las aguas subterráneas y la vulnerabilidad del medio humano es el elemento receptor de las consecuencias negativas. La susceptibilidad del medio físico es la vulnerabilidad del acuífero a verse afectado por el contaminante debido a su capacidad de autodepuración.

4.1. PELIGROS DE CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

4.1.1. ANTECEDENTES Y CONCEPTO DE PELIGRO

El peligro es el componente de riesgo que con mayor frecuencia y exahustividad ha sido estudiado, tradicionalmente, en los trabajos de riesgo. La amplia difusión de este tipo de estudios ha motivado que exista un elevado número de definiciones de peligro y peligrosidad como sinónimos de riesgo y peligro, respectivamente. En el siguiente cuadro 4.1 se muestran algunas de las definiciones que mayor repercusión han tenido a escala nacional e internacional.

USGS (1977) (USGS: <i>United States Geological Survey</i>)	Peligro geológico	Condición geológica, proceso o suceso potencial que supone una amenaza para la salud, seguridad o bienestar de un grupo de ciudadanos o para las funciones o economía de una comunidad o entidad gubernamental mayor.
Kates (1979)	Peligro	Amenaza potencial que enfrenta al hombre con la naturaleza por eventos que se originan o son transmitidos por el ambiente natural o artificial.
Varnes (1984)	Peligro	Probabilidad de ocurrencia dentro de un periodo de tiempo determinado y en un área específica, de un fenómeno potencialmente dañino.
Martín (1984)	Peligrosidad	Probabilidad de que se supere en el emplazamiento considerado una intensidad dada.
Lundgren (1986)	Peligro geológico	Proceso natural que provoca un suceso de consecuencias negativas sobre la población.
	Peligro	Potencial de producir daño que se pone de manifiesto en interacciones entre hombre y naturaleza.
Rahn (1986)	Peligro	Peligro potencial para la vida humana o propiedad.
Udias y Mezcua (1986)	Peligrosidad	Probabilidad de ocurrencia de una cierta intensidad o movimiento del suelo.
Cendrero (1987)	Peligrosidad	Mayor o menor probabilidad de que un determinado proceso afecta a una zona con cierto nivel de intensidad, independientemente de que afecte o no a los seres humanos.
Ayala (1988)	Peligro geológico	Todo proceso, situación o suceso en el medio geológico, natural, inducido o mixto, que puede generar un daño económico o social para alguna comunidad
Smith (1992)	Peligro	Amenaza potencial para los seres humanos y su bienestar.
Pita (coord.) (1999)	Peligrosidad	Probabilidad de ocurrencia o periodo de retorno de un determinado peligro.
Aneas de Castro (2000)	Peligro	Ocurrencia o amenaza de ocurrencia de un acontecimiento natural o antrópico dañino.
Olcina y Ayala (2002)	Peligro	Proceso o fenómeno de carácter natural o tecnológico que puede originar daños a la población, los bienes materiales o el medio ambiente
	Peligrosidad	Conjunto formado por la severidad y la probabilidad de un peligro.

Cuadro 4.1. Definiciones de peligro.

Por regla general, los peligros están relacionados con el proceso natural o tecnológico que propicia la existencia de un riesgo y la peligrosidad es función de la probabilidad y severidad con que un determinado peligro se manifiesta en el territorio.

En el informe final de la Acción COST 620 se definió el peligro como fuente potencial de contaminación resultante de la actividad humana sobre el territorio (De Keteleare *et al.*, 2004). Estas fuentes pueden ser tanto puntuales o concentradas como difusas o dispersas en el espacio y pueden provocar tanto vertidos accidentales como procesos de deterioro progresivos.

Las definiciones anteriores tratan aspectos básicos que permiten definir los peligros de contaminación de las aguas subterráneas. Así, un peligro de contaminación para el agua subterránea es un **evento o proceso continuo en el tiempo, resultante de una actividad humana puntual o dispersa en el territorio, con capacidad para degradar, directa o**

indirectamente, la calidad de las aguas subterráneas. Por tanto, un peligro de contaminación puede ser la presencia en el medio natural de una sustancia contaminante o la actividad humana susceptible de generarla. La peligrosidad asociada a la actividad humana como consecuencia de la emisión de efluentes gaseosos, descarga de aguas residuales y líquidos orgánicos, almacenamiento y depósito de residuos sólidos, excavaciones mineras o utilización de fertilizantes y pesticidas.

La amenaza a los recursos naturales, y en general al medio ambiente, puede originarse con cualquier tipo de actividad, que a menudo es agravada por accidentes que pueden liberar elementos tóxicos y materias peligrosas. La contaminación del agua subterránea está relacionada, de manera directa o indirecta, con procesos naturales y, principalmente, antrópicos. Las variaciones que se producen en la calidad natural de las aguas pueden perjudicar su utilización como recurso natural pero no ser, necesariamente, peligrosas para la salud (Matthess y Miller, 1994), lo cual podría llevar a distintas interpretaciones sobre para qué es necesario el agua: ¿para la subsistencia del hombre?, ¿para la sociedad? o ¿para la economía? Estas cuestiones tienen su interés para la posterior estimación de las medidas de mitigación del riesgo, ya que inducen a un análisis de la vulnerabilidad humana desde diversos puntos de vista, por ejemplo de las pérdidas económicas frente a humanas. No obstante, esta observación sería matizable en estructuras sociales menos desarrolladas, donde la necesidad de agua para la subsistencia eliminaría cualquier otro motivo de discusión y análisis, como puede ser el caso de multitud de pueblos donde las necesidades primarias están muy por encima de intereses económicos.

4.1.2. CONTAMINANTES Y SALUD PÚBLICA

La contaminación del agua subterránea por la actividad humana es consecuencia, principalmente, de la presencia de metales pesados, compuestos químicos orgánicos, fluidos orgánicos inmiscibles, bacterias y virus. La cantidad necesaria para considerar cada uno de estos elementos como contaminante varía en función de la toxicidad del mismo, por lo que no es posible establecer un umbral universal para todos los tipos de contaminantes. De esta manera, se considera contaminante a toda sustancia cuya cantidad sobrepasa los límites establecidos por ley. En este apartado se tratarán aquellas sustancias que son detectadas como contaminantes debido a la elevada toxicidad que conllevan. Por otra parte, una condición común que los hace peligrosos en las aguas subterráneas es su capacidad para infiltrarse con el agua de lluvia. Esto quiere decir que los contaminantes pueden ser todos aquellos susceptibles de ser transportados por el agua de lluvia, tanto sólidos y líquidos como gaseosos, lo cual aumenta las fuentes potenciales de contaminación.

Los principales tipos de contaminantes pueden ser agrupados en microorganismos, compuestos orgánicos, inorgánicos e isótopos radiactivos (cuadro 4.2). Algunos autores como Almeida *et al.*, 1995 y Matthess y Miller, 1994, han diferenciado los compuestos inorgánicos metálicos en un grupo denominado metales pesados. Matthess y Miller, 1994 denominaron a los compuestos orgánicos como compuestos químicos orgánicos y fluidos inmiscibles (también denominados líquidos hidrofóbicos según Domenico y Schwartz, 1998). Estos últimos compuestos son principalmente hidrocarburos (según la clasificación de Almeida *et al.*, 1995)

como fenoles, bencenos, etc, que se introducen en los ciclos geoquímicos de la Tierra por los residuos urbanos, industriales y agrícolas, transportados mediante las aguas contaminadas.

Autores como Brown *et al.*, 1983, Aller *et al.*, 1987 han agrupado los contaminantes pertenecientes a compuestos orgánicos e inorgánicos. El grupo de los microorganismos procede de la clasificación realizada por Matthes y Millar (1994) y el grupo de isótopos radiactivos procede de la clasificación de Almeida *et al.*, 1995.

Grupo	Subgrupo	Contaminante
Microorganismos	Bacterias	Escherichia coli, Salmonella Typhi
	Virus	Enterovirus
Compuestos Orgánicos	Compuestos Alifáticos	Propano, Etano
	Compuestos aromáticos	Benceno, Tolueno
	Compuestos oxigenados	Metanol, Propanol
	Compuestos: halogenados	DDT, PCBS
Compuestos Inorgánicos	Metálicos	Cromo, Cobre, Mercurio
	No metálicos	Nitrógeno, Fósforo, Arsénico
Isótopos	Radiactivos	Cesio ¹³⁷ , Iodo ¹³¹

Cuadro 4.2. Contaminantes en aguas subterráneas.

Para valorar la peligrosidad de los distintos contaminantes es necesario conocer las posibles consecuencias sobre la salud humana. Las afecciones que pueden causar en las personas son muy diversas y algunas de ellas no son consecuencia únicamente de la ingestión de aguas contaminadas, sino también del contacto con ellas. Un desarrollo más profundo de todas las infecciones originadas por estos contaminantes puede ser consultado en los dos manuales que han sido utilizados en este capítulo: Lozano *et al.* (1989) y Piedrola (coord.). (1992).

Los **microorganismos** se dividen en dos grandes grupos: bacterias y virus. Las bacterias que mayor transmisión tienen en el agua son la Salmonella, Yersinia, Escherichia, Legionella y los virus que pueden causar mayores infecciones son el de la hepatitis y el de la polio (Gerba y Keswick, 1981 y Althaus *et al.*, 1982).

Las bacterias provocan en su gran mayoría infecciones intestinales del tipo diarreas, vómitos, disentería, molestias abdominales, fiebre entérica o tenesmo. Dichas enfermedades están relacionadas con aquellos agentes cuyos principales reservorios se encuentran en el hombre y no con los que proceden de alimentos contaminados. Por ejemplo, la brucelosis es una enfermedad extendida en el medio rural, que la desarrolla el ganado y éste la transmite al hombre, de ahí que las personas que trabajan en contacto con el ganado sean más susceptibles de contraer esta enfermedad (granjeros, matarifes, veterinarios,...). El agente causante de la enfermedad es el ganado y no la ingestión o contacto con el agua; por ello, no es una enfermedad analizada en este apartado, de lo contrario, habría una gran diversidad de enfermedades que deberían ser analizadas pues en origen la causa del problema puede ser el agua contaminada.

Los cocos (estreptococos y estafilococos) son parásitos muy comunes en el cuerpo humano que pueden provocar infecciones cutáneas. Salmonella, Shigella, Campylobacter *jejuni*, Escherichia *coli*, Yersinia *enterocolíca* o Vibrión *colérico* son bacterias que afectan, en mayor medida, a personas ancianas y niños, sobre todo, en los meses de verano. Además de

infecciones gastrointestinales, pueden causar enfermedades más graves como la tuberculosis y fiebre tifoidea (*Salmonella*), disentería (*Shigella*) y cólera (*Vibrión*) que, en algunos casos, son consecuencia de habitar en ambientes de poca higiene y bajo nivel socioeconómico. *Clostridium perfringens*, *Bacillus cereus* o *Cryptosporidium* también son enterobacterias causantes de colitis y diarreas entre otras enfermedades gastrointestinales.

Los virus se pueden clasificar en tres grupos. Los Rotavirus y los Norovirus (virus tipo *Norwalk* y *Norwalk-like*) causan fiebre, vómitos, dolor abdominal, y diarreas, principalmente en la población infantil y anciana, debido a la disminución general de las defensas inmunitarias. Los picos de morbilidad son en la estación invernal de los países templados y, excepcionalmente, en verano. Los Enterovirus, al margen de generar infecciones gastrointestinales, en niños más que en adultos, pueden provocar hepatitis y poliomelitis. Se caracterizan porque pueden recorrer grandes distancias desde la fuente de contaminación y mantener su nocividad. Estos virus pueden entrar en el organismo humano mediante las aguas residuales, a pesar de estar tratadas con cloro, método que no garantiza su eliminación total.

Los **compuestos orgánicos** son todos aquellos derivados del carbono. En función de la estructura molecular se pueden establecer diferentes grupos: Alifáticos, aromáticos, oxigenados, y halogenados; compuestos comúnmente englobados en el grupo de los hidrocarburos y pesticidas. Los *compuestos alifáticos* o alcanos pueden ser saturados, como el etano, propano, metano y los naftanos, y no saturados, como los etilenos. Los *compuestos aromáticos* son estructuras de seis átomos de carbono en forma de anillo, también conocidos como BTEX (benceno, tolueno, xileno) se caracterizan por tener menor densidad que el agua, por lo que normalmente se encuentran en el contacto entre la zona saturada y la no saturada. Estos compuestos son utilizados como disolventes, caso los fenoles usados para desinfectar, y están muy presentes en residuos industriales derivados del manejo del carbón y del petróleo. Los *compuestos oxigenados* son alcoholes que se pueden diferenciar entre aldeidos y ketones. Los primeros suelen utilizarse para fragancias por sus características aromáticas y los segundos como disolventes industriales. La oxidación de estos compuestos da lugar a ácidos orgánicos muy presentes en ceras, grasas y aceites industriales. Los *compuestos halogenados*, comúnmente utilizados como pesticidas, son muy resistentes a la degradación. Uno de los compuestos halogenados que mayor impacto ha provocado es el DDT (diclorodifeniltricloroetano), muy utilizado en los años 60 y 70 en la agricultura y, actualmente, prohibido por su alto poder cancerígeno. Los compuestos halogenados también son usados como refrigerantes y antidetonante en gasolinas. Los PCBs, otro grupo de compuestos halogenados, son muy utilizados en plásticos, pinturas y ceras, por su alta persistencia y solubilidad en las grasas. Estos compuestos tienen mayor densidad que el agua por lo que tienden a hundirse y actúan como una fuente continua de contaminación (Fetter, 2003).

Las intoxicaciones por compuestos orgánicos son múltiples. En general, los disolventes orgánicos causan alteraciones del sistema nervioso, del hígado, riñón, sangre y piel (neuritis, hepatitis crónica, nefrosis, anemia, trombocitopenia, leucemia, dermatitis y alergias) y los pesticidas provocan enfermedades cardiovasculares, hepáticas, neuronales y gastrointestinales. En cualquier caso, los compuestos orgánicos son una de las principales causas de cáncer entre la población: leucemia, mama, tiroides, pulmón y gastrointestinal representan el 80 % de los casos de cáncer.

Los **compuestos inorgánicos** se dividen en metálicos y no metálicos. Los *metálicos* son el cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, manganeso, plata, oro, talio, hierro y zinc (Brown *et al.*, 1983). Estos metales son utilizados en una amplia gama de productos como baterías, pigmentos, plásticos, pinturas, pegamentos, galvanizados, cosmética, tratamiento de pieles, textiles, fertilizantes, herbicidas, pesticidas, equipos electrónicos, papel o vidrio. Estos compuestos se fijan en los órganos del cuerpo humano como riñones, hígado, bazo, colon y pulmones a consecuencia de intoxicaciones crónicas, de manera que son muy raros los casos de intoxicación aguda, es decir, en altas concentraciones. Los síntomas de una intoxicación por metales son muy variadas pero destacan los vómitos, cólicos, hemólisis, estreñimiento y problemas circulatorios, alteraciones renales, fiebre, además de cefalea, vértigo e insomnio. Algunos metales provocan enfermedades específicas como la *argiria* (intoxicación por plata) o *tialismo* (intoxicación por talio).

Los metales pesados son aquellos con una densidad superior a 5 g/cm^3 y, generalmente, proceden de la actividad humana, aunque también pueden estar presentes de forma natural por la meteorización química y la lixiviación. Las dos principales fuentes antrópicas de metales pesados son la industria y la agricultura. Las aguas residuales industriales, los residuos mineros y la siderurgia son fuentes habituales de altas concentraciones de este tipo de contaminantes (Mathess, 1974). La actividad agrícola puede ser fuente de metales pesados por el empleo de fertilizantes y pesticidas. La actividad urbana también es fuente de metales pesados por los residuos gaseosos emitidos precedentes del tráfico (Golwer y Schneider, 1973).

Respecto a los compuestos inorgánicos *no metálicos*, los principales son el nitrógeno, fósforo, boro, azufre, flúor, cloro, arsénico y selenio. El nitrógeno, en sus diferentes formas (nitrato, amonio, nitrito, óxido nitroso), es el más común de los contaminantes inorgánicos debido al uso de fertilizantes y de aguas residuales. El fósforo no es un elemento muy peligroso, pero su presencia a través de la actividad agrícola, efluentes de fosas sépticas y la descomposición de residuos orgánicos, puede causar problemas medioambientales significativos debido a la reducción de oxígeno en el agua con la consiguiente aparición de algas y plantas acuáticas. El boro procede de la descomposición de materiales orgánicos. El azufre es un elemento relacionado con residuos industriales procedentes de fábricas de refinado de azúcar, refinerías de petróleo y extracción de cobre y carbón. El cloro, en forma de cloruro, es un elemento muy soluble en agua, que procede de derrames o fugas de salmuera, y del uso generalizado de sales para evitar el hielo y reducir la nieve en las carreteras (Golwer y Schneider, 1973). El arsénico se encuentra en los residuos de pesticidas, herbicidas, pigmentos (para preservar la madera, las pieles y en la industria textil) colorantes y vidrios. El selenio es un elemento presente en vidrios, aceros, componentes electrónicos, caucho y material fotográfico. Estos minerales se acumulan en órganos del cuerpo humano como hígado, riñones, bazo y pulmones y la intoxicación crónica por estos compuestos da origen a diversos problemas digestivos (estomatitis y gastritis), hepáticos (cirrosis, fibrosis, síntomas renales), cardiovasculares (trombosis y miocardiopatía) y epidérmicos (melanomas).

Los **isótopos radiactivos** afectan a las aguas subterráneas de los acuíferos kársticos en mayor medida que los detríticos, por la ausencia, generalmente, de una capa edáfica y materia orgánica que absorba los radioisótopos. La afección a las aguas subterráneas se puede

producir en zonas alejadas de un accidente nuclear debido al transporte de estos elementos hacia las áreas de descarga. Los radioisótopos de mayor nocividad son Cs¹³⁴, Cs¹³⁷ y I¹³¹.

Los efectos agudos por exposición ante agentes radioactivos son, de forma general, náuseas, vómitos y alteraciones hematopoyéticas que producen eritemas, hiperemia y edemas, si la irradiación es local, e incluso úlceras y necrosis en función del grado de exposición. Los efectos crónicos se producen por acumulación durante largo tiempo, lo que desemboca en tétanos del sistema nervioso, hipoplasia de la médula ósea, anemia, radiodermatitis, úlceras y, con el tiempo, cáncer.

4.1.3. ACTIVIDADES HUMANAS POTENCIALMENTE CONTAMINANTES

Los estudios de contaminación de aguas subterráneas han estado relacionados, hasta finales del siglo XIX y principios del XX, con la presencia de bacterias patógenas en el agua. Tras la segunda guerra mundial, el peligro de contaminación ha tenido su principal foco en las sustancias procedentes de la industria química (Breeuwsma y Duijvenbooden, 1987). En la actualidad, puede ser considerada como fuente potencial de contaminación toda actividad humana susceptible de producir sustancias nocivas en su funcionamiento. Las principales fuentes de contaminación se asocian con el manejo de sustancias peligrosas en distintas fases del engranaje socioeconómico, como pueden ser la producción, almacenamiento, distribución y aplicación en un amplio rango de actividades. Las actividades humanas que generan contaminantes son muy variadas y, de acuerdo con Drew y Hötzl (eds) (1999) se pueden clasificar en actividades agropecuarias, industriales y urbanas.

Las **actividades agropecuarias** generan cambios en la composición química de las aguas por el empleo de sustancias potencialmente contaminantes como fertilizantes y pesticidas (Coxon, 1999). El empleo de fertilizantes (origen de los nitratos), pesticidas, herbicidas, insecticidas (origen de dioxinas y otros compuestos cancerígenos) y la presencia de residuos orgánicos ocasionan problemas de contaminación por la infiltración de estos compuestos. De forma puntual se puede producir contaminación en las zonas de descanso y alimentación de animales de granja, al generarse concentraciones elevadas de excrementos. En acuíferos kársticos adquiere especial relevancia la cercanía a conductos de flujo rápido (sumideros kársticos), no solo por la probabilidad de infiltración de los residuos, sino por la utilización realizada de este tipo de geoforma kárstica para arrojar todo tipo de residuos. El ganado y fosas sépticas son causas comunes de contaminación por la presencia de bacterias (coliformes fecales) y nitratos como resultado de la oxidación del nitrógeno orgánico o amonio (Aller *et al.*, 1987). La industria agroalimentaria es origen de importantes residuos tóxicos como el alpechín derivado de la moltura de las aceitunas u otros compuestos orgánicos derivados de las fábricas de refinado de azúcar. Las industrias lácteas dan origen a depósitos de suero y aguas residuales. Las serrerías producen residuos orgánicos e inorgánicos al utilizar compuestos como creosotas, para evitar la putrefacción de la madera, y cromo y cobre para su preservación.

La **actividad urbana** (en la cual cabe incluir el turismo) es generadora de multitud de residuos tóxicos para las aguas subterráneas por la emisión de efluentes gaseosos, descarga de aguas residuales y compuestos orgánicos (hidrocarburos), almacenaje y depósito de residuos sólidos (Hötzl, 1999). Algunos procesos de la actividad urbana, como la construcción

de edificios o carreteras, no tienen una implicación directa con la contaminación de las aguas subterráneas, pero, indirectamente, es causa de la creación de canteras, deforestación, pérdida de ecosistemas.

Las aguas residuales domésticas procedentes de los baños, duchas y lavadoras tienen un alto contenido en cloruros, nitratos y amonio, además de materia orgánica en descomposición que eleva los valores de DBO. Otros contaminantes procedentes de las aguas residuales domésticas son los microorganismos que provocan enfermedades epidémicas a partir de bacterias y virus. Fosas sépticas, pozos negros o la red de alcantarillado son fuentes importantes de contaminación microbiológica.

Aguas residuales de especial toxicidad son las derivadas del lixiviado de vertederos de residuos sólidos con un alto contenido de metales pesados. Los vertederos incontrolados son la máxima expresión en cuanto a contaminación potencial derivada de los residuos sólidos urbanos. En menor magnitud, pero también con una elevada peligrosidad, se encuentran los depósitos puntuales de escombros y de chatarra, donde se acumulan todo tipo de enseres domésticos, materiales de construcción, componentes electrónicos, etc. En la fabricación de estos utensilios hay una elevada presencia de compuestos orgánicos e inorgánicos que, al entrar en contacto con el medio, son liberados por los distintos procesos geoquímicos.

El turismo es una actividad particular en cuanto a su capacidad para generar contaminantes según sea: turismo deportivo o turismo clásico (de viaje de ocio, cultural, paisajístico). En ambos casos pueden darse los problemas de contaminación derivados de la actividad urbana (construcción de hoteles, casas, carreteras,...). Además, en los campos de golf se emplean fertilizantes y pesticidas en el mantenimiento de la vegetación. En las pistas de esquí se utilizan fertilizantes en la recuperación de vegetación tras efectuar movimientos de tierra o cloruros en la producción de nieve artificial (Zojer, 1999).

Los residuos originados por la **actividad industrial** (y urbana) pueden proceder del arrastre de contaminantes por el agua de lluvia. Los tejados de ciertas industrias acumulan un alto volumen de metales pesados e incluso compuestos orgánicos que, posteriormente, son lavados por la lluvia. Estos compuestos pueden ser arrastrados desde carreteras y superficies pavimentadas donde se acumulan residuos procedentes de la combustión de los motores de los vehículos y del caucho de los neumáticos. La emisión de efluentes gaseosos está directamente relacionada con el dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (VOC). Los agentes causantes de generar estos compuestos son las centrales eléctricas que utilizan carbón, fundición de cobre, refinerías de petróleo y los medios de transporte con combustibles fósiles. El transporte ocasiona el 40 % de la emisión de NO_x y VOC (Kresic *et al.*, 1999).

Las aguas residuales de la industria tienen una toxicidad muy variable en función del tipo de industria que las genere. Las industrias papeleras, químicas, farmacéuticas y mineras son las que generan mayor concentración de sustancias altamente tóxicas por compuestos halogenados, aromáticos y metales pesados.

La extracción de petróleo, destilación, transporte, almacenaje y depósito de remanentes son acciones susceptibles de originar daños que tienen su origen en las refinerías, oleoductos, carreteras, vías férreas, industrias, viviendas y gasolineras. En los tres últimos casos cabe la posibilidad de generar contaminación por filtraciones de gasolineras y gases en los depósitos

subterráneos. Otros compuestos orgánicos, además de los destilados del petróleo, son los compuestos aromáticos, halogenados y alifáticos y tienen su principal origen en el empleo de disolventes, desengrasantes, refrigerantes, desinfectantes y para la preservación de materiales industriales y de construcción.

La minería, en general, presenta grandes problemas por la emisión de metales pesados. Los residuos mineros pueden provocar cambios en la composición química de las aguas y en el pH. Altas concentraciones de hierro y aluminio disminuyen el pH del agua, lo cual perjudica la salud (Hess y Slattey, 1999). En acuíferos carbonáticos, la afección por el drenaje de líquidos ácidos desde una mina produce una disminución del pH, aumento de sulfatos y alcalinidad nula, que repercute en un aumento del grado de disolución (Wicks y Groves 1993).

La extracción de áridos para la construcción de carreteras, edificios, monumentos, etc, puede generar problemas de contaminación al eliminar el suelo y disminuir el espesor de la zona no saturada e, incluso, por dejar descubierto el agua subterránea. La actividad extractiva en medios carbonáticos puede dar lugar a la presencia de arena limosa que se introduce en el agua subterránea provocando una elevada turbidez (Drysdale *et al.*, 2001). De los carbonatos también se obtienen calcio y magnesio para la elaboración de fertilizantes (Hess y Slattey, 1999). La extracción de áridos en canteras implica el empleo de maquinaria pesada (camiones, tractores, etc) que generan los mismos problemas referidos a la automoción pero, además, se introducen elementos provenientes de los explosivos utilizados para la ampliación y desarrollo de la actividad minera. Los explosivos son compuestos formados a partir de trinitrotolueno (TNT), gelignita (dinamita formada por una mezcla de nitrógeno, colodión, nitrato de potasio y serrín) y ANFO (emulsión explosiva mezcla de nitrato amonio y fuel oil) Gunn y Hobbs, (1999). El abandono de la actividad extractiva en canteras reduce su nivel de nocividad pero la afección sigue existiendo por la pérdida de zona no saturada. La probabilidad de contaminación del agua continua, sobre todo si ha quedado al descubierto el agua de la zona saturada (Hess y Slattey, 1999).

4.1.4. APROXIMACIONES METODOLÓGICAS A LA EVALUACIÓN Y CARTOGRAFÍA DE LOS PELIGROS DE CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Los estudios de los peligros de contaminación se pueden dividir en dos categorías según el objetivo marcado para su análisis: estudios de carácter específico y de carácter general.

Los de carácter específico son los que primero se llevaron a cabo. A partir de la década de los años setenta se empezó a evaluar la peligrosidad de las distintas sustancias utilizadas por el hombre. Estos primeros métodos fueron desarrollados para analizar el peligro de contaminación de las aguas subterráneas frente a un contaminante determinado. En el quinto Programa Internacional auspiciado por la UNESCO (*International Hydrological Programme: IHP-V*), Johansson y Hirata (2002) realizaron una recopilación de distintos métodos utilizados para evaluar la peligrosidad de las aguas residuales, pesticidas, nitratos, acidificación de suelos o vertido de sustancias peligrosas en accidentes de tráfico.

El peligro de contaminación, analizado desde un punto de vista genérico, es decir, para cualquier tipo de sustancia, ha sido abordado desde los años 90 por diversos autores. Foster *et al.*, (2001) desarrollaron el método POSH (*Pollutant Origin and Hydraulic Sucharge*), basado en

una propuesta de Foster e Hirata (1988). Este método clasifica la carga contaminante de una treintena de actividades humanas, incluyendo fuentes de carácter difuso y concentrado, a las cuales les asigna un valor cualitativo de elevado, moderado o reducido potencial de generar carga contaminante. Civita y De Maio (1997a) propusieron el índice de peligro de contaminación (DCI: *Danger Contamination Index*) para cartografiar los peligros de contaminación de las aguas subterráneas. Este índice DCI es el resultado de combinar la peligrosidad intrínseca (ICEI: *Inner Causes Environment Impact*) de los distintos tipos de contaminantes que genera la actividad humana. Se diferencian un total de 41 actividades potencialmente contaminantes y se clasifican en función de la unidad de medida, por ejemplo, hectáreas en el caso de la actividad agrícola o kilogramos para la ganadería.

Por otra parte, Darmendrail (2001) utilizó, junto con la peligrosidad de cada contaminante o actividad humana, la cantidad de sustancia que puede ser vertida. Para valorar la peligrosidad diferenció un total de 67 tipos de peligros. En cuanto a la cantidad de contaminante distinguió tres categorías, cuyos valores varían en función de que la referencia se haga al volumen, al peso o a la superficie afectada.

En el seno del grupo de trabajo de la Acción COST 620 se ha desarrollado un método de evaluación de los peligros que incorpora, junto a los parámetros antes citados, la probabilidad de ocurrencia de un vertido. En el informe elaborado con motivo de la Acción COST 620, las principales fuentes contaminantes fueron resumidas por De Keteleare *et al.*, (2004) tal y como se muestra en el cuadro 4.3.

Nivel I	Nivel II
Actividad urbana	Aguas residuales
	Residuos municipales
	Combustibles
	Tráfico y transporte
	Instalaciones recreativas
	Varios
Actividad industrial	Minería
	Excavaciones
	Explotaciones de gas y petróleo
	Plantas industriales
	Centrales energéticas
	Almacenaje industrial
	Desvío y tratamiento de aguas residuales
Actividad agropecuaria	Ganadería
	Agricultura

Cuadro 4.3. Fuentes potenciales de contaminación (De Keteleare *et al.*, 2004).

Con el método propuesto por De Keteleare *et al.* (2004), se pueden diferenciar la mayoría de las actividades potenciales de contaminación. En los casos en que hay varias actividades con la misma nocividad, éstas se diferencian en función de la cantidad de contaminante susceptible de ser vertida. La componente intensidad permite establecer diferencias dentro de la misma clase de peligro. Por último, la probabilidad de ocurrencia (periodo de retorno en la estimación de otros riesgos como el de inundación) de un suceso de contaminación está definida por la seguridad que presentan las actividades humanas. En este sentido, la

probabilidad puede ser evaluada a partir del estado de conservación de las infraestructuras o edad de las mismas.

4.2. VULNERABILIDAD DE LOS ACUÍFEROS A LA CONTAMINACIÓN

4.2.1. ANTECEDENTES Y CONCEPTO DE VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO

La vulnerabilidad de los acuíferos, como concepto metodológico, aparece en la literatura científica a finales de la década de los sesenta. Los trabajos del hidrogeólogo francés Jacques Margat son pioneros en este campo al introducir el término vulnerabilidad de los acuíferos en la literatura científica (Margat, 1968). Previamente, habían sido desarrollados trabajos relacionados con las condiciones de protección de los acuíferos frente a la contaminación, entre los cuales cabe citar el trabajo de Vladimirkij (1960).

Desde principios de los setenta y hasta mediados de los ochenta, los estudios de vulnerabilidad estuvieron centrados en la definición y elaboración de mapas de vulnerabilidad. A partir de la segunda mitad de la década de los ochenta hubo un giro en la tendencia de los estudios de vulnerabilidad y se inició un periodo en el que predominó el desarrollo de metodologías para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos, aunque sin tener en cuenta un consenso bajo ningún aspecto conceptual. Así, surgieron diversas metodologías como las de Zaporozec (1985) y Aller *et al.* (1987) en Estados Unidos, Foster (1987) en el Reino Unido, Bachmat y Collins (1987) en Israel o Anderson y Gosk (1987) en Dinamarca. En la década de los noventa tuvo lugar un nuevo cambio en la investigación sobre la vulnerabilidad, que se centró en la puesta en común de las metodologías de evaluación de la vulnerabilidad y en establecer criterios comunes sobre dicha temática.

En el ámbito español, los estudios de vulnerabilidad de contaminación de aguas subterráneas no tuvieron un fuerte empuje hasta finales de los años noventa. Hasta esa fecha caben citarse los trabajos de cartografía realizados por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y por Custodio (1990), desde un punto de vista epistemológico y aplicado. A finales de los noventa se empezaron a desarrollar estudios relativos a la vulnerabilidad de los acuíferos como único factor de evaluación del riesgo de contaminación. En este sentido caben citarse los trabajos de Monterde (1999), Longo (2000), Vías *et al.* (2001, 2002), Brechenmacher (2002) y Mugerza (2002) sobre metodologías de evaluación de la vulnerabilidad, tanto desde un punto de vista teórico, como aplicado. En el ámbito aplicado destacan los trabajos realizados por el IGME, como el mapa de vulnerabilidad de los acuíferos de España a escala 1/1.000.000 en la década de los setenta, o el mapa de vulnerabilidad del País Vasco a escala 1/25.000 emprendido por el gobierno autonómico a mediados noventa.

La vulnerabilidad de un acuífero frente a la contaminación ha sido definida por diversos autores, hecho que ha motivado una gran dispersión conceptual sobre el tema (cuadro 4.4).

Margat (1968)	Vulnerabilidad	Protección que ofrece el medio al agua subterránea contra las actividades humanas susceptibles de contaminar y que pueden penetrar en la subsuperficie.
Albinet y Margat (1971)	Vulnerabilidad del agua subterránea	Probabilidad de infiltración y difusión del contaminante en el acuífero, según el tipo de afloramiento geológico y condiciones hidrogeológicas.
Olmer y Rezác (1974)	Vulnerabilidad del agua subterránea	Grado de peligrosidad determinado por las condiciones naturales e independientemente de la fuente de contaminación.
Villusem <i>et al.</i> (1983)	Vulnerabilidad	Riesgo de que las sustancias químicas, usadas en o cerca de la superficie, puedan afectar a la calidad de las aguas subterráneas.
Foster (1987)	Vulnerabilidad de acuíferos	Características intrínsecas que determinan la sensibilidad de varias partes de un acuífero a ser afectado adversamente por un contaminante.
Bachmat y Collin (1987)	Vulnerabilidad	Sensibilidad de la calidad del agua subterránea frente a actividades antrópicas contaminantes.
Sotornikova y Vrba (1987)	Vulnerabilidad	Características naturales del sistema hidrogeológico invariables, normalmente, a escala humana.
	Vulnerabilidad del acuífero	Capacidad de un sistema hidrogeológico para protegerse de impactos externos, tanto antrópicos como naturales, que afectan a su estado y características en el tiempo y en el espacio
Civita (1988)	Vulnerabilidad intrínseca	Posibilidad de infiltración y percolación de líquidos o soluciones acuosas de contaminantes a través de la zona no saturada.
Zaporozec (1994)	Vulnerabilidad	Propiedad intrínseca de un sistema de aguas subterráneas que depende de la sensibilidad de este sistema a impactos naturales y/o humanos.
	Vulnerabilidad intrínseca (natural)	Es función de factores hidrogeológicos (características de un acuífero) del suelo y de los materiales geológicos.
	Vulnerabilidad específica (integrada)	Complemento de las propiedades intrínsecas de un sistema de aguas subterráneas según el uso presente o futuro de los recursos hídricos subterráneos.
Robins <i>et al.</i> (1994)	Vulnerabilidad del acuífero	Es el resultado de la superposición de las propiedades intrínsecas del suelo y la zona no saturada del acuífero.
Daly y Warren (1994)	Vulnerabilidad intrínseca	Características geológicas e hidrogeológicas que determinan la sensibilidad de las aguas subterráneas a la contaminación por actividades antrópicas.
Daly <i>et al.</i> (1997, 2002)	Vulnerabilidad intrínseca	Características del entorno del acuífero (geológicas, hidrogeológicas, climáticas, biológicas) que determinan la sensibilidad del agua subterránea a la contaminación por la actividad humana, independientemente del tipo de contaminante y del tipo de acuífero.
	Vulnerabilidad Específica	Susceptibilidad ante un contaminante o grupo de contaminantes concreto teniendo en cuenta las propiedades del contaminante y la vulnerabilidad intrínseca.

Cuadro 4.4. Definiciones de vulnerabilidad del medio físico o vulnerabilidad de los acuíferos.

Frente a esta diversidad de definiciones, la UE ha llevado a cabo una serie de programas de investigación a partir de los cuales se ha llegado a un consenso, al menos en el ámbito europeo, sobre el concepto de vulnerabilidad. En las Acciones COST 65 y 620 se han establecido las bases para la evaluación y cartografía de la vulnerabilidad a la contaminación. En este ámbito de trabajo se han elaborado las definiciones propuestas por Daly *et al.* (1997) y

Daly *et al.* (2002) de vulnerabilidad intrínseca y específica, también consideradas por otros autores como interna (o natural) e integrada, respectivamente.

La vulnerabilidad intrínseca en los términos de Daly *et al.* (1997) y Daly *et al.* (2002), presenta limitaciones en su concepción porque hablar de un contaminante universal y un escenario modelo tiene poca base científica. Los resultados pueden variar según el tipo de contaminante que afecte al acuífero (Adams y Foster, 1992). Frente a estas limitaciones, los mapas de vulnerabilidad intrínseca deben ser siempre interpretados con mucha precaución (Foster y Hirata, 1988). El concepto de una "vulnerabilidad genérica a un contaminante universal en un escenario típico de contaminación" no tiene validez desde un punto de vista científico (Anderson y Gosk, 1987). Sin embargo, no se debe olvidar que el fin de la cartografía de vulnerabilidad es la gestión de los riesgos y la planificación del territorio y, por tanto, se convierte en un instrumento que debe ser ágil, eficaz y apto para la gestión del territorio. Hacer una cartografía específica para cada contaminante es una tarea que desbordaría a cualquier equipo de trabajo ya que son muchas las sustancias que pueden afectar al agua, lo que eliminaría su cualidad de eficaz.

Hasta aquí se ha interpretado la vulnerabilidad del acuífero como una característica del medio natural que determina la capacidad de protección del agua subterránea, pero no se hace referencia a la cantidad de agua que es susceptible de ser contaminada, es decir, a la exposición. Ello forma parte de la tradición de los estudios de vulnerabilidad de los acuíferos que analizan las variaciones de este factor dentro de un mismo acuífero, siempre que éste tenga importancia como recurso hídrico para la población. Sin embargo, en esta memoria se ha establecido una gradación de la importancia de los acuíferos en función de la cantidad de recursos disponibles para ser utilizados por el hombre. Esto se integra en la tendencia marcada por la UE y su Directiva Marco de Aguas, según la cual, se considera acuífero a un medio que aporte 10 m³/día o que abastezca a más de 50 habitantes, lo que amplía el análisis más allá de los acuíferos que tienen una gran importancia y, por tanto, del riesgo de contaminación se puede extender a materiales de baja permeabilidad.

4.2.2. VULNERABILIDAD VERSUS CAPACIDAD DE ATENUACIÓN

La vulnerabilidad de un acuífero es inversamente proporcional a la capacidad de protección del agua subterránea. En la medida que se conozca la capacidad de atenuación de los contaminantes se puede estimar si el recurso está lo suficientemente protegido o si la contaminación es un hecho inevitable. Los procesos físicos, químicos y biológicos que modifican las propiedades de los contaminantes son los procesos que permiten medir, directamente, cuál es la capacidad de atenuación y protección del agua subterránea y, paralelamente, cuánto y cómo de vulnerable es el acuífero frente a los contaminantes.

Aller *et al.* (1987) citan diversos procesos que afectan al transporte y comportamiento de los contaminantes en un acuífero: sorción, reacciones redox, biodegradación, hidrólisis, volatilización, neutralización, dilución y filtración mecánica. Cada contaminante reacciona en mayor o menor medida frente a estos procesos y la eficacia de las reacciones biogeoquímicas es proporcional al tiempo de permanencia del contaminante en el acuífero, es decir, a mayor tiempo de paso mayor atenuación del contaminante.

La **sorción** engloba dos procesos: adsorción según la cual las moléculas o iones de una sustancia se adhieren a la superficie de una partícula, y absorción, cuando las moléculas se introducen o penetran en la estructura de la partícula. Los procesos de sorción se incrementan con el aumento de la superficie de la roca, lo cual es a su vez función del tamaño de grano. A menor tamaño de grano, aspecto favorecido por la presencia de partículas coloidales, como arcillas, en las fisuras y huecos de la roca, mayor sorción. El intercambio iónico es un proceso similar a los de sorción, la principal diferencia radica en que solo se producen en presencia de arcillas debido a la carga eléctrica de las mismas. La fuerza de atracción que ejerce la carga eléctrica de la arcilla hacia otros minerales es variable según el tipo de arcilla, de manera que conocer el tipo de arcilla del medio puede dar información sobre las condiciones existentes para que se produzca intercambio iónico que reduzca la contaminación, por ejemplo, debido a metales pesados. La materia orgánica, como raíces y humus, también presenta una elevada capacidad e intercambio iónico (Mathess y Harvey, 1982).

Las reacciones de reducción y oxidación (**redox**) son los principales procesos de atenuación de la carga contaminante en los acuíferos. Estas reacciones son siempre parejas y controlan el intercambio de electrones entre las sustancias líquidas y gaseosas en el agua en función del oxígeno disuelto. La oxidación es la pérdida de electrones, la sustancia cede electrones al medio, mientras que con la reducción la sustancia gana electrones. Estas reacciones favorecen la atenuación de la carga contaminante de sustancias orgánicas e inorgánicas. Los microorganismos son los responsables en un porcentaje muy elevado de las reacciones redox que tienen lugar en el agua, principalmente, las bacterias y sus enzimas para producir la energía necesaria en la síntesis de sus células (Freeze y Cherry, 1979). Los mecanismos redox conllevan una reducción de la solubilidad de la sustancia en el agua y en consecuencia la precipitación de las mismas.

La **biodegradación** es la transformación de los compuestos orgánicos por la actividad de microorganismos, principalmente, bacterias, hongos y algas. El metabolismo de estos microorganismos requiere de sustancias como carbono, nitrógeno, fósforo y metales, además de oxígeno y el agua para su desarrollo. No todos los compuestos orgánicos pueden ser biodegradados y por ello se les denominan refractarios o resistentes, como los compuestos halogenados (pesticidas, disolventes) y alifáticos.

La **hidrólisis** es el proceso por el cual se produce la rotura de enlaces iónicos en una sustancia mediante el agua y se liberan los minerales insolubles. La hidrólisis es una reacción básica en los procesos de meteorización de las rocas que dan origen a suelos y arcillas. Este proceso es importante para la atenuación de los pesticidas.

La **volatilización** es la pérdida de un componente a la atmósfera, por efecto de la presión del compuesto, humedad del aire y temperatura del suelo. Este proceso afecta a compuestos resistentes a la degradación y poco solubles. Los compuestos volátiles son hidrocarburos, alcoholes, aldehídos y ketones.

Neutralización es el cambio de pH, o de la concentración del ion hidrógeno, en el agua para obtener una solución neutra. Este proceso genera agua y una sal de carga neutra. El limo es un elemento de neutralización de líquidos residuales ácidos. Un proceso relacionado con la neutralización es el *buffering* que hace referencia a la capacidad de una sustancia de mantener constante un pH en un amplio rango de concentraciones. Los procesos de neutralización y

buffering son en ocasiones un paso previo obligado para que puedan tener lugar procesos de biodegradación de compuestos orgánicos (Brown *et al.*, 1983).

La difusión mecánica y molecular de una sustancia en el agua se produce mediante la **dispersión**, tanto vertical, como horizontal. En horizontal es función del gradiente y de la velocidad del agua. En vertical depende de la densidad del contaminante y de la velocidad del agua. La dispersión se manifiesta a través de la pluma contaminante, que en un medio isótropo adquiere una forma elíptica. Los medios porosos son aquellos donde predominan las formas elípticas, según el grado de homogeneidad que presente. La **dilución** es un mecanismo de dispersión resultado de la adición de agua al acuífero. Este proceso aumenta conforme aumenta la distancia desde el punto origen de la contaminación y es el principal proceso de atenuación de la carga contaminante de una sustancia una vez que ha penetrado en la zona saturada (Todd, 1980).

La **filtración mecánica** hace referencia a la retención de sustancias en el medio. Los acuíferos donde predominan partículas coloidales, arcillas, suelos, tienen una mayor capacidad de filtrado. La capacidad e filtración mecánica aumenta con la reducción de huecos y fisuras. Las rocas consolidadas no fisuradas son las que aportan una mayor capacidad de filtración en comparación con acuíferos aluviales formados por gravas y cantos rodados.

La estimación de la vulnerabilidad mediante parámetros referidos a cada uno de estos procesos es una tarea inabarcable en la medida que las combinaciones son infinitas para cada tipo de contaminante, además son parámetros cuyos valores no se obtienen con facilidad. Para ello se utilizan variables que indirectamente proporcionan información sobre estos procesos, como por ejemplo el tipo de litología, tipo de suelo, permeabilidad, etc.

Los principales procesos que tienen lugar en las distintas capas de los acuíferos son resumidos en la figura 4.1 (Golwer, 1983).

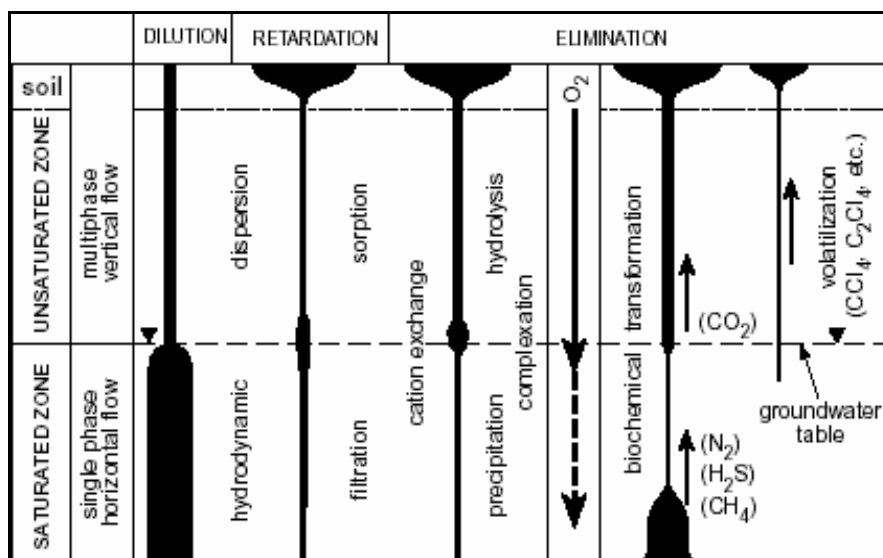


Figura 4.1. Procesos de atenuación de la contaminación en acuíferos (Golwer, 1983).

Estos procesos de atenuación afectan a la concentración y transporte de contaminantes y se pueden clasificar en cuatro grandes grupos, en función de su naturaleza: geoquímicos, bioquímicos, físicos y biofísicos (Matthess y Miller, 1994).

Los procesos geoquímicos que principalmente actúan en los acuíferos son: reacciones de adsorción-absorción, solución-precipitación, fenómenos de oxidación-reducción y complejación. Los procesos bioquímicos tienen su origen en la descomposición de los componentes orgánicos por los microorganismos, para obtener, de esta manera, el carbono e hidrógeno necesario. Los procesos físicos son la advección, dispersión, retardación, filtración y transporte de gases y los procesos biofísicos están relacionados con la presencia de microorganismos patógenos en el agua (bacterias y virus).

4.2.3. APROXIMACIONES METODOLÓGICAS A LA EVALUACIÓN Y CARTOGRAFÍA DE LA VULNERABILIDAD DEL MEDIO FÍSICO: VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DE LOS ACUÍFEROS

En la actualidad, hay una gran variedad de métodos para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación que pueden agruparse en tres categorías básicas (Gogu y Dassargues, 2000): modelos de simulación que dan soluciones analíticas o numéricas a ecuaciones matemáticas de los procesos que ocurren en el transporte de contaminantes, modelos estadísticos basados en el análisis de una variable dependiente y modelos de superposición basados en la combinación de mapas de diversos atributos de un área concreta.

Los métodos de evaluación de la vulnerabilidad aplicados en el presente trabajo se incluyen dentro del grupo de superposición cartográfica. Según Vrba y Civita (1994), los métodos de superposición se pueden agrupar en tres categorías: métodos de control de escenarios hidrogeológicos (HCS: *Hydrogeological Complex and Settings*), métodos de relaciones analógicas (AR: *Analogical Relations*) y métodos paramétricos.

Los métodos del tipo HCS están basados en un criterio cualitativo de vulnerabilidad para un área determinada con unas condiciones medioambientales conocidas, que se compara con el resto de la zona de estudio. Estos métodos son apropiados para grandes áreas con una alta variabilidad en términos hidrogeológicos, estructurales y morfológicos.

Los métodos numéricos y de relaciones analógicas (AR) están basados en operaciones matemáticas con los valores de diversos parámetros y tienen como resultado un índice de vulnerabilidad. Por tanto, son métodos que sólo utilizan variables cuantitativas.

Los métodos paramétricos emplean variables o factores con un rango definido y dividido en intervalos jerárquicos. A cada intervalo se le asigna un valor cualitativo a semicuantitativo, valor ordinal o puntuación, que refleja un grado relativo de susceptibilidad a la contaminación. La puntuación se asigna en función de la contaminación potencial, al igual que los valores de ponderación de las variables. Dentro de este tipo de métodos, Vrba y Civita (1994) diferencian los sistemas de matrices (MS: *Matriz System*), de clases (RS: *Rating System*) y de clases ponderadas (PCSM: *Point Count System Model*).

Los sistemas de matrices se basan en combinaciones de un número limitado de parámetros (al menos dos) y dividido en clases cuidadosamente seleccionadas, de las cuales se obtiene el grado de vulnerabilidad.

En los sistemas de clases, cada variable está dividida en intervalos cuyas puntuaciones tienen un recorrido común a todas las variables. La puntuación de dichos intervalos se realiza según su vulnerabilidad relativa. La suma final de las puntuaciones da un índice cuantitativo de que, posteriormente, se clasifica en clases con un valor cualitativo de vulnerabilidad.

Los sistemas de clase y ponderación se diferencian del método anterior en la asignación de un factor de ponderación a cada variable según la importancia de ésta. Cada variable está multiplicada por un peso o factor de ponderación y la suma final de los parámetros ponderados es el índice de vulnerabilidad.

En el cuadro 4.5, se recogen algunos métodos de evaluación de la vulnerabilidad intrínseca, el tipo al que pertenece según la clasificación anterior y los parámetros empleados.

Método		Parámetros básicos													
Referencia	Tipo	Precipitación y composición química	Superficie topográfica. Pendiente	Características del suelo				Conexión hidrológica	Red de recarga	Características de la zona no saturada	Profundidad del nivel piezométrico	Variación del nivel piezométrico	Características hidrogeológica	Conductividad hidráulica	Usos del suelo
				Esesor, textura y mineralogía	Humedad eficaz	Permeabilidad	Propiedades físicas y químicas								
Albinet y Margat (1970)	HCS							•		•	•		•	•	
Fenge (1976)	RS			•					•	•	•	•	•	•	
Josopait y Szhwerdtfeger (1979)	HCS								•	•	•		•	•	
Zampetti (1983)	AR									•	•				
Villumsen <i>et al.</i> (1983)	RS			•						•	•	•	•	•	
Haertle (1983)	MS									•	•				
Vrana (1984)	HCS	•		•						•			•		
Subirana y Casas (1984)	HCS							•		•	•		•	•	
Engelen (1985)	RS							•		•	•		•		
Zaporozec (1985)	RS			•	•	•	•			•	•		•		
Breeuwsma <i>et al.</i> (1986)	HCS			•	•	•	•	•	•	•	•			•	
Sotornikova y Vrba (1987)	RS					•					•	•	•		
Ostryt <i>et al.</i> (1987)	HCS			•			•				•		•		
Goossens y Van damme (1987)	MS			•			•				•		•		
Carter <i>et al.</i> (1987)	MS			•		•	•						•		
Marcolongo y Pretto (1987)	RS			•				•	•	•					
Marcolongo y Pretto (1987)	AR				•				•	•	•				
GOD - Foster (1987)	RS									•	•		•		
Schmidt (1987)	RS			•				•		•	•				
Aller <i>et al.</i> (1987)	PCSM		•	•					•	•	•		•	•	
Trojan y Perry (1988)	PCSM	•	•			•			•	•	•		•		
Civita y Benacchio (1988)	HCS						•	•		•	•		•	•	
Civita (1990)	PCSM		•	•				•	•	•	•		•	•	
Van Stempvoort <i>et al.</i> (1993)	AR			•		•				•	•				
De Regibus (1994)	PCSM			•			•		•	•	•		•		•

Cuadro 4.5. Métodos de evaluación de la vulnerabilidad intrínseca. Modificado de Civita (1993).

La selección de un método u otro está influenciada, en parte, por la información disponible. Frente a la falta de datos de parámetros como permeabilidad, conductividad hidráulica, entre otros, pueden utilizarse métodos indirectos de estimación, por ejemplo valores estandarizados de un parámetro para un tipo de litología o de suelo. Este procedimiento tiene limitaciones dado que los valores responden, en la mayoría de los casos, a condiciones concretas de campo y a zonas específicas de estudio. La extrapolación a entornos con una casuística diferente puede adolecer de rigor, en cuanto que siempre serán valores aproximados. Sin embargo, el empleo de datos tomados en campo no siempre es posible, aunque se presenten, a priori, como más fiables.

Los métodos numéricos tratan de cuantificar el tiempo que un contaminante tarda en llegar al recurso hídrico, es decir, a mayor tiempo de paso se presupone una mayor capacidad de autodepuración. Según el cuadro 4.5, donde se recoge una amplia variabilidad de métodos utilizados internacionalmente, los métodos que utilizan sistemas numéricos equivalen al 10% del total, en cambio los métodos basados en puntuaciones de variables del acuífero abarcan el 50%. Esta cifra es indicativa de la falta de datos numéricos de campo suficientes para valorar una variable y/o de la dificultad de evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos a partir de datos concretos tomados en campo.

La mayoría de los métodos de vulnerabilidad intrínseca se caracterizan por ser de aplicación genérica a cualquier medio y su aplicación en acuíferos carbonáticos no permite obtener una cartografía con suficiente detalle de las variaciones en la vulnerabilidad del acuífero, como se ha podido constatar a partir de los trabajos realizados, en el acuífero carbonatado de Torremolinos, por Vías *et al.* (1999); Vías (2000), Vías *et al.* (2001) y Longo *et al.* (2001).

La Unión Europea a través de la Acción COST 620, ha planteado la necesidad de desarrollar un método, de aplicación en todo el ámbito comunitario, que recoja aspectos de especial influencia en la vulnerabilidad de los acuíferos carbonáticos. De acuerdo con el modelo europeo de gestión ambiental descrito en el epígrafe 3.1, HAZARD-PATHWAY-TARGET (Daly *et al.*, 1997), se pueden diferenciar dos tipos de vulnerabilidad de los acuíferos (figura 4.2) según se evalúe el recurso o la fuente de abastecimiento (Daly *et al.*, 2002). Los métodos que se han utilizado en este trabajo están enfocados a evaluar la vulnerabilidad del recurso y en otros casos de la fuente de abastecimiento.

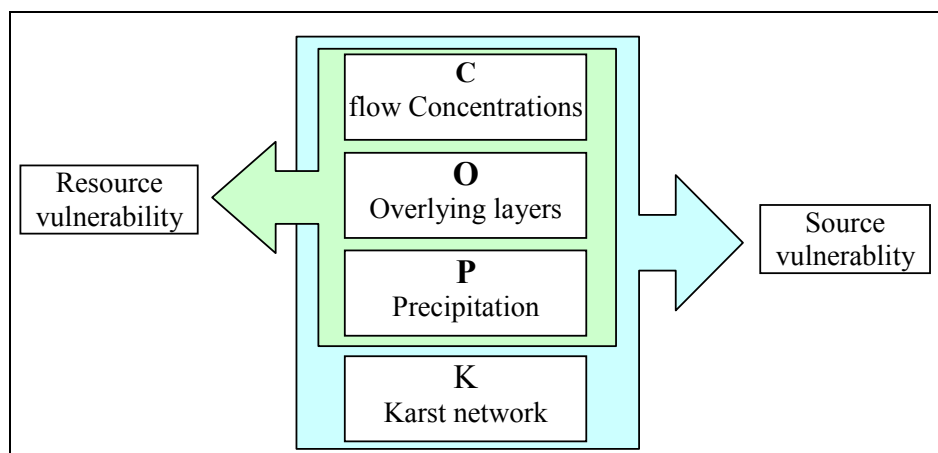


Figura 4.2. Esquema conceptual de vulnerabilidad de acuíferos kársticos en el marco de la Acción COST 620 (Daly *et al.*, 2002).

4.2.4. EXPOSICIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LOS ACUÍFEROS

Tradicionalmente, los estudios de riesgos de contaminación de aguas subterráneas han centrado su análisis en los peligros y, sobre todo, en la vulnerabilidad del medio físico de los acuíferos. En esta tesis doctoral, bajo un enfoque integrador del riesgo de contaminación, se ha considerado interesante añadir el concepto de exposición o volumen de recursos hídricos expuestos a la contaminación. La inclusión de un indicador para evaluar el riesgo, que tome en consideración la calidad y/o cantidad del recurso expuesto a la contaminación, permitirá comparar situaciones de similar vulnerabilidad del medio físico del acuífero en las que la pérdida esperada, en caso de contaminación, sea distinta según el volumen de agua afectado.

Los métodos más habituales de estimación de la vulnerabilidad del medio físico no contemplan este concepto de forma explícita. Sin embargo, algunos autores apuntan nociones similares a la hora de estimar el riesgo, caso de Foster (1987) que observa la oportunidad de incluir un indicador de calidad del agua expuesta.

4.3. VULNERABILIDAD DE LA POBLACIÓN Y SUS BIENES

4.3.1. ANTECEDENTES Y CONCEPTO DE VULNERABILIDAD DE LA POBLACIÓN Y SUS BIENES

El análisis y evaluación de la vulnerabilidad del medio humano es el aspecto del riesgo que mayor atención está reclamando en los últimos tiempos, por parte de la comunidad científica y la propia población, que observa cómo los fenómenos extremos afectan con mayor crudeza a las sociedades menos desarrolladas. Cada vez hay una mayor conciencia de que el riesgo no depende únicamente de la existencia del peligro, sino de las condiciones en que se expone la población y sus bienes a los eventos extremos. Las limitaciones demostradas por modelos basados en la peligrosidad, como predictores del riesgo en su conjunto, están orientando las investigaciones y su aplicación hacia el análisis de la vulnerabilidad del medio humano.

La estimación de la vulnerabilidad de la población y sus bienes se encuentra en una fase de estudio incipiente, que adolece de carencias a la hora de establecer un campo de actuación común entre los investigadores. En el cuadro 4.6 se recogen algunas definiciones como muestra de la elevada disparidad de criterios que posteriormente inciden en la forma de interpretar la vulnerabilidad humana y, por consiguiente, el riesgo.

Desde las primeras definiciones surgidas en la década de los ochenta, las principales diferencias observadas en el concepto de vulnerabilidad del medio humano proceden, tanto de las distintas orientaciones epistemológicas y sus consiguientes metodologías de análisis, como del tipo de riesgo analizado. Aun así, en las definiciones citadas hay un dato subyacente y común que está relacionado con una concepción reciente del riesgo: la seguridad frente a un suceso en función de las condiciones económicas, sociales, políticas y ambientales (Blaikie *et al.*, 1994).

Timmerman (1981)	Reacción de un sistema frente a un evento. Medida que establece la capacidad de un sistema para absorber y recuperarse de un evento extremo.
UNDRO (1982)	Grado de pérdida de un conjunto de elementos en riesgo desde la aparición de un fenómeno natural con una cierta magnitud.
Kates (1985)	Capacidad para soportar un peligro y reaccionar.
Panizza (1988)	Vulnerabilidad territorial es el complejo formado por la población, la construcción, la infraestructura, la actividad económica, la organización social y la ordenación del territorio.
Mitchell (1989)	Pérdida potencial.
Liverman (1990)	Distingue entre vulnerabilidad como una condición biofísica y otra función de las condiciones de la sociedad. La vulnerabilidad está referida tanto al espacio geográfico (donde se localiza la población) como al espacio social (quién o qué es más vulnerable).
Dow (1992)	Es la capacidad de un grupo o individuo para hacer frente un peligro, en función de su posición física y social en el mundo.
Smith (1992)	Margen de tolerancia social y económica frente a un desastre.
Alexander (1993)	Es una función del coste-beneficio de evitar un desastre natural en una zona de riesgo.
Cutter (1993)	Probabilidad de un individuo o grupo de estar expuesto y afectado adversamente por un desastre. Es la interacción del desastre en un lugar con el perfil social de la comunidad.
Blaikie <i>et al.</i> (1994)	Capacidad de una persona o grupo de personas de anticiparse, resistir y recuperarse de un desastre natural.
Bohle <i>et al.</i> (1994)	Una medida que integra la exposición medioambiental, social, económica y política frente a una evento peligroso. La vulnerabilidad es un espacio social multivariable y multidimensional definido por una determinada capacidad política, económica e institucional.
Dow y Downing (1995)	Es la diferente susceptibilidad de circunstancias que contribuyen a la vulnerabilidad. Factores biofísicos, demográficos, económicos, sociales y tecnológicos son examinados junto a los desastres naturales.

Cuadro 4.6. Definiciones de vulnerabilidad del medio humano. Modificado de Cutter (1996b).

Los estudios de la vulnerabilidad del medio humano presentan tres tendencias diferentes según los distintos condicionantes que se analicen (Cutter, 1996b):

- estudios sobre la **exposición** al peligro
- estudios sobre la vulnerabilidad como **respuesta social**
- estudios de la vulnerabilidad desde un punto de vista **territorial**

Los primeros analizan la vulnerabilidad del medio humano teniendo en cuenta la cantidad de personas y/o bienes expuestos al peligro. La **exposición** es un factor que define el elemento receptor del riesgo. Si el referente es la colectividad, a mayor número de personas y bienes expuestos mayor riesgo, pero si se trata la exposición en términos individuales, el hecho de que solo un elemento estuviera expuesto ya sería un signo de riesgo. En relación con esta tendencia se han analizado conceptos como el de umbral admisible de riesgo por parte de la comunidad, es decir, cuál es la cantidad permisible de población expuesta. Ayala (2000) distinguió entre poblaciones con niveles de riesgo admisibles y no admisibles, bajo la premisa de que el riesgo cero no existe y marcó como riesgo admisible el que no es catastrófico y

puede ser asumido. Wrigley y Tromp (1995) y Helm (1996) mostraron el nivel de riesgo tolerable en función de la severidad de fenómenos extremos a partir del número víctimas mortales y la frecuencia de un suceso catastrófico. Conforme aumentan las pérdidas, aumenta el número de años entre suceso y suceso para que el riesgo se considere aceptable, es decir, disminuye la frecuencia de ocurrencia de un evento. Esta capacidad de elección (aceptabilidad del riesgo) depende, en primer lugar, de la información disponible por parte de las personas expuestas y, en segundo lugar, del nivel de conocimiento en la toma de decisiones (Dubreuil, 1997).

El segundo grupo de estudios de vulnerabilidad humana está dirigido hacia el análisis de la **respuesta de la sociedad**, es decir, hacia su capacidad de resistencia y resiliencia frente a un peligro. La resistencia es la capacidad del hombre o la sociedad para hacer frente a un peligro. De un modo genérico, se puede hacer equivaler la resistencia con las medidas estructurales desarrolladas frente a los riesgos. La resiliencia es la capacidad de adaptarse y rehacerse de los efectos de un desastre, de recuperar el estado o nivel de vida previo a la consecución de la catástrofe. Al contrario que ocurre con el factor de resistencia, la resiliencia se fundamenta en el empleo de medidas no estructurales. Los primeros estudios bajo este epígrafe y que posteriormente han desembocado en el concepto actual de vulnerabilidad fueron abordados por Burton, Kates y Whites. Estos autores analizaron las causas de porqué las medidas adoptadas para reducir el riesgo no resultaban efectivas bajo parámetros jerárquicos y secuenciales de adaptación al medio hostil como absorción, aceptación, reducción y cambio desde el punto de vista de la percepción (Burton *et al.*, 1978). La Geografía Radical de los años ochenta introdujo un cambio brusco en la concepción del riesgo, pues sustituyó el concepto de adaptación al medio por el de vulnerabilidad. El nuevo enfoque situó al hombre y el papel que éste juega frente a los riesgos como principal desencadenante de los mismos.

A partir de los factores de resistencia y resiliencia se tiene en cuenta la dimensión social del riesgo y no solo las condiciones físicas frente al peligro, centradas en el análisis de la exposición. Esta perspectiva necesita del conocimiento de los procesos históricos, sociales y económicos para responder adecuadamente a los desastres.

En tercer lugar, los estudios de la vulnerabilidad desde una perspectiva **territorial** son los que integran un mayor volumen de información, al combinar la respuesta social con la exposición y ofrecen una mayor precisión en el análisis del riesgo. Desde esta perspectiva, el ámbito de aplicación se corresponde con un dominio espacial concreto. El dominio puede ser geográfico, que respondería a la pregunta ¿donde está localizada la población? o puede ser un espacio social, es decir, ¿quiénes son más vulnerables?. Esta línea de trabajo, que se encuadra dentro de la línea contextual del riesgo, ha sido desarrollada por diversos autores como Liverman (1986), Blaikie y Brookfield (1987), Clark *et al.* (1998), Mitchell *et al.* (1989) y Cutter *et al.*, (2000).

La vulnerabilidad del medio humano, como un concepto más amplio que la simple exposición física frente a un peligro, es una meta todavía a lograr en el ámbito de los riesgos en general y, en particular, de los riesgos tecnológicos (p.e. contaminación de aguas subterráneas). La mayoría de los estudios realizados no se centran en la evaluación de la vulnerabilidad del medio humano desde una perspectiva integradora, sino desde la exposición de la población al peligro o de la repercusión económica en el mejor de los casos. De acuerdo con Saurí (2004) la vulnerabilidad humana se constituye como un factor que va más allá de la

exposición al peligro, ya que igual de importante sería conocer la capacidad individual y social para prevenir un desastre, absorber las pérdidas o acceder a mecanismos de recuperación del desastre (Bohle, 2001). La vulnerabilidad bajo el enfoque contextual tiene mayor peso en la valoración final del riesgo (Saurí, 2004), es decir, la capacidad de evitar, convivir o recuperarse del desastre es función de las condiciones sociales, económicas y políticas que determinan el estado de seguridad (Blaikie *et al.*, 1994 y Hewitt, 1997). El análisis de la vulnerabilidad mediante la respuesta social tiene una gran funcionalidad frente a eventos extremos cuyo funcionamiento no está influenciado, de forma directa, por la acción del hombre, por lo que la idea de vivir en riesgo es incluso aceptada, circunstancia puesta de manifiesto en países como Japón donde la formación frente al riesgo de terremoto es una conducta común. En cambio, no parece razonable aceptar estas condiciones de convivir y recuperarse periódicamente de eventos cuyo origen esté vinculado al uso de las tecnologías, como ocurre en el tema de contaminación de las aguas subterráneas.

Una aportación muy interesante en el tema de la vulnerabilidad frente al riesgo sísmico es la realizada por Cardona (2001), quien estimó la vulnerabilidad a partir de parámetros de respuesta social (resistencia y resiliencia) junto con la exposición al riesgo. Este último trabajo se encuadra en una línea descrita por Pelling (2001) quien expresó la vulnerabilidad del medio humano como resultado de los factores de exposición, resistencia y resiliencia. Otras aportaciones interesantes que abordan el análisis y evaluación de los riesgos teniendo en cuenta aspectos relacionados con la vulnerabilidad de la población y sus bienes son los trabajos de Leone, Aste y Velásquez (1995) referente a los movimientos en masa, Lavigne (1999) en riesgo volcánico, Clark *et al.* (1998) sobre tormentas en el litoral, Mayer (2000), Ortega (2002) y Saurí *et al.* (2002) sobre las inundaciones y Marcos (2000) sobre la sequía.

4.3.2. APROXIMACIONES METODOLÓGICAS A LA EVALUACIÓN Y CARTOGRAFÍA DE LA VULNERABILIDAD DEL MEDIO HUMANO: VULNERABILIDAD DE LA POBLACIÓN Y SUS BIENES

En el ámbito concreto de las aguas subterráneas, los trabajos que recogen la evaluación de la vulnerabilidad del medio humano desde un punto de vista social o económico son muy pocos. La aproximación más detallada de la vulnerabilidad está referida a la población, en la mayoría de los casos, sin prestar atención a otros elementos del medio humano afectables por un evento de contaminación.

En la obra editada por el BRGM francés (*Bureau de Recherches Géologiques et Minières*) para el análisis del riesgo de contaminación de aguas subterráneas (Darmendrail, 2001) se puede encontrar un análisis de la vulnerabilidad de la población, en el cual se recogen distintos parámetros como el tipo y cantidad de población abastecida, la accesibilidad al recurso y la distancia al mismo.

Una interesante aportación es la realizada por Ducci (1999), modificada de Civita y De Maio (1997a) y Corniello y Ducci (1997), que establece el valor socioeconómico del agua subterránea como recurso de la población y de la industria, de manera que a mayor volumen de población o mayor número de trabajadores en una fábrica, mayor será el valor del recurso.

Raucher (1983) evaluó las consecuencias de un evento contaminante en un acuífero a partir del coste de alternativas para el abastecimiento de la población, más el coste de recuperar la

calidad del recurso mediante el tratamiento de las aguas o la búsqueda de un nuevo recurso al abandonar el contaminado y más el coste sanitario derivado del impacto sobre la salud humana. Este último punto, también fue evaluado por Shechter (1985) como el producto de la afección del contaminante para la salud humana por la cantidad de población afectada y por el precio de la vida humana.

Como síntesis de las aportaciones anteriores, Perles *et al.* (2004) realizaron una propuesta de variables a tener en cuenta como estimadores de la vulnerabilidad del medio humano (cuadro 4.7). La propuesta se llevó a cabo, inicialmente, en el marco del riesgo en general y, posteriormente, se concretó con variables específicas para la estimación de la vulnerabilidad del medio humano frente a la contaminación de las aguas subterráneas. Entre las variables seleccionadas se tienen en cuenta, por una parte, indicadores del volumen de elementos expuestos frente al riesgo y, por otra parte, indicadores de vulnerabilidad de estos elementos como es la protección, debilidad, tolerancia y recuperación. A partir del marco general propuesto por Perles *et al.* (2004), la metodología planteada en este trabajo recoge, junto a la afección potencial del riesgo de contaminación sobre la población, variables indicadoras de la afectación sobre la actividad socioeconómica dependiente del recurso.

ELEMENTOS EXPUESTOS		INDICADORES EN EL MARCO DE LA CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	
VULNERABILIDAD DE LOS ELEMENTOS EXPUESTOS (POBLACIÓN Y BIENES)	RESISTENCIA FRENTE AL PELIGRO	INDICADORES GENERALES	
		Volumen de población afectable por el peligro	Volumen de población dependiente del recurso hídrico del acuífero
		Volumen de bienes y actividades afectables por el peligro	Volumen de bienes y actividades dependientes del recurso hídrico del acuífero
		Posición y/o distancia de la población respecto a las áreas de peligrosidad	Distancia de la población dependiente respecto a puntos de suministro contaminados (pozos, manantiales, etc.)
		Posición y/o distancia de los bienes respecto a las áreas de peligrosidad	Distancia de los bienes dependientes respecto a puntos de suministro contaminados (pozos, manantiales, etc.)
		Posición y/o distancia de población respecto a puntos de socorro y asistencia.	Accesibilidad a las poblaciones en caso suministro alternativo por contaminación(cubas, etc)
		Posición y/o distancia de bienes respecto a puntos de socorro y asistencia	Accesibilidad a los bienes y usos en caso de suministro alternativo por contaminación (cubas, etc).
		Presencia de grupos de población especialmente sensibles al peligro (infantil, anciana)	Dependencia del recurso por parte de grupos de población sensible (infantil, anciana)
		Presencia de bienes y actividades especialmente sensibles frente al peligro concreto	Dependencia del recurso en sectores: urbano / turístico/ regadío/ agro-alimentario/ aguas minerales o medicinales
		D	Sensibilidad de bienes y actividades de interés estratégico para la economía de un sector o territorio
Resistencia física	Resistencia física	Presencia de bienes de especial valor cualitativo (cultural, natural, etnográfico, etc)	Dependencia del recurso en bienes culturales o etnográficos (parques, paisaje de huerta tradicional)
		Posibilidad concurrencia espacio-temporal y sinergia de distintos tipos de riesgos	Concurrencia de la contaminación del recurso con periodo de sequía
		Estado previo de afectación por el peligro (reincidencia)	Nivel previo de contaminación del recurso
T	Capacidad de recuperación o regeneración del elemento afectado	Capacidad de regeneración del acuífero (Tiempo)	
R	Desarrollo y eficacia de normativas y sistemas preventivos de protección frente al riesgo	Desarrollo y eficacia de normativas de protección del acuífero (nacionales, autonómicas, provinciales, municipales)	
R Social	R Social	Desarrollo y eficacia de normativas y planes de gestión de emergencias frente a la catástrofe	Desarrollo y eficacia de planes de emergencia en caso de contaminación (información, suministros alternativos, etc)
		Desarrollo y eficacia de sistemas de vigilancia y control del peligro	Desarrollo y eficacia de los sistemas de vigilancia del nivel de contaminación del recurso
R Social	R Social	Desarrollo y eficacia de sistemas de información social	Desarrollo y eficacia de los sistemas de información social en caso de contaminación del recurso
		Cohesión social. Tradición de cooperación frente al riesgo y la catástrofe	Nivel de colaboración social en caso de contaminación (solidaridad en abastecimientos alternativos)
P/D	Conocimiento y percepción del peligro. Comportamiento frente al peligro y la catástrofe	Responsabilización individual frente a la contaminación (vertidos contaminantes, no uso de captaciones afectadas)	
R. FRENE PÉRDIDA	R Social	Existencia de alternativas de suministro hídrico	
		Grado de dependencia respecto a la pérdida. Existencia de alternativas	
		Desarrollo y eficacia de los sistemas de compensación (seguros)	
Existencia y nivel de contratación de seguros para los bienes y/o actividad afectados		Existencia y nivel de contratación de seguros para los bienes y/o actividad afectados	

Cuadro 4.7. Variables condicionantes de la vulnerabilidad de la población y sus bienes frente a la contaminación de las aguas subterráneas (tomado de Perles *et al.*, 2004). Leyenda: P = Protección; D = Debilidad; T = Tolerancia; R = Recuperación.

**METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN Y CARTOGRAFÍA
DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS
SUBTERRÁNEAS Y SUS COMPONENTES**

5. METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN Y CARTOGRAFÍA DE LOS COMPONENTES DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.

En este capítulo se recogen los métodos empleados para evaluar los diferentes componentes del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. En algunos casos, se han utilizado métodos consensuados internacionalmente y, en otros casos, se han diseñado metodologías de análisis frente a la carencia o falta de especificidad de los métodos consultados. En este sentido, los métodos COP (Vías *et al.*, 2002), de vulnerabilidad del medio físico del acuífero (epígrafe 5.2.5), y el método para evaluar la vulnerabilidad del medio humano (epígrafe 5.3) han sido diseñados en el marco de esta tesis.

Los componentes del riesgo de contaminación de aguas subterráneas que se han analizado en este trabajo son tres:

- peligro de contaminación (P), como una función de la toxicidad de las sustancias susceptibles de ser vertidas al medio, cantidad de contaminantes y probabilidad de contaminación
- vulnerabilidad intrínseca del acuífero (V_F), que tiene en cuenta la capacidad de atenuación de la contaminación o resistencia del acuífero y la exposición de recursos hídricos
- vulnerabilidad del medio humano (V_H), resultado de la exposición y resistencia de los elementos puestos en riesgo.

5.1. MÉTODO DE EVALUACIÓN Y CARTOGRAFÍA DE LOS PELIGROS DE CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS. ÍNDICE DE PELIGROSIDAD HI (*HAZARD INDEX*)

La evaluación de los peligros según la metodología planteada por De Keteleare *et al.* (2004) en el marco de la Acción COST 620, se resume en cinco puntos:

- inventario de peligros
- nocividad de la fuente o actividad contaminante: factor H
- intensidad de la contaminación: factor Q_n
- probabilidad de ocurrencia de un evento de contaminación: factor R_f
- índice de peligro HI

Entre el inventario y la evaluación de cada factor hay que seleccionar los parámetros a utilizar para el cálculo del índice. Los parámetros característicos de cada tipo de peligro están referidos al proceso o naturaleza del peligro (producción, almacenaje, líquido, sólido, etc), clase de sustancia peligrosa, cantidad de sustancia que puede ser vertida y edad o estado de las instalaciones. Los parámetros utilizados para evaluar la peligrosidad de las actividades humanas se muestran en el epígrafe 7.3.1.

5.1.1. INVENTARIO DE PELIGROS

El primer paso para la evaluación de los peligros es la recopilación de las actividades y elementos potenciales de contaminación de las aguas subterráneas. El cuadro 5.1 recoge una relación de las fuentes potenciales de contaminación agrupadas en 15 clases y éstas, a su vez, se concentran en tres categorías, en función de la actividad humana con la que están relacionados: infraestructuras de desarrollo urbano, actividades industriales y agropecuarias.

A la hora de realizar el inventario de peligros hay que tener en cuenta que la fuente de la contaminación no tiene por qué estar localizada sobre la superficie del acuífero. Una fuente de contaminación puede tener su origen en una zona retirada y ser transportado el contaminante por el agua o por el viento. Los acuíferos localizados en un fondo de valle o en la desembocadura de río, por su localización y disposición son susceptibles de recargarse con aguas de escorrentía procedentes de zonas contaminadas o de lugares donde se vierte sin ningún tipo de protección sobre el cauce del río. Por tanto, el ámbito de análisis de los peligros en estos casos excede el estrictamente impuesto por los límites del acuífero.

5.1.2. NOCIDIDAD DEL CONTAMINANTE: FACTOR H

De acuerdo con Drew y Hötzl (eds) (1999), el impacto de un peligro potencial sobre un acuífero queda definido por su toxicidad, extensión y duración. El método HI (*Hazard Index*) permite definir el impacto sobre la calidad del agua subterránea mediante el factor H (nocividad de un contaminante). Este factor es función de la carga tóxica, solubilidad y movilidad del contaminante, propiedades que determinan tanto la toxicidad del contaminante como la duración del mismo.

El factor H expresa la nocividad del contaminante o de una actividad humana potencialmente contaminante. En total se han diferenciado, en el marco de la Acción COST 620, 96 peligros potenciales, de los cuales 42 están ligados a infraestructuras de desarrollo urbano, 41 a la industria y 13 a la actividad agropecuaria. La nocividad se indica mediante la asignación de un valor numérico a cada uno de los peligros inventariados (cuadro 5.1). Los valores se expresan en forma de puntuaciones, valores ordinales, y varían entre 10 (mínima nocividad) y 100 (máxima nocividad).

La nocividad de las fuentes y actividades potencialmente contaminantes puede tener dos lecturas. Por un lado, la nocividad potencial asociada al funcionamiento diario de la actividad potencialmente contaminante (o simplemente su existencia) que emite de forma continua sustancias nocivas al medio, pero sin superar los límites establecidos en la legislación vigente, lo que las caracteriza como peligros con un carácter difuso. Por otro lado, la nocividad de cada elemento o actividad humana puede ser derivada de las consecuencias de un accidente, por lo que adquiere un carácter concentrado. La nocividad asignada a cada elemento o actividad humana es el resultado de una caracterización del peligro de forma difusa o concentrada. Por ejemplo, una central nuclear es un elemento que no contamina salvo caso de accidente, cuando se transforman en un peligro de nocividad muy elevada. En cambio, la agricultura es una actividad poco nociva en comparación con una central nuclear, pero emite contaminantes en continuo de forma difusa, por lo que llega a provocar eventos de contaminación de forma más usual.

Clave	PELIGRO	Factor H
1.	INFRAESTRUCTURAS DE DESARROLLO URBANO	
1.1.	AGUAS RESIDUALES	
1.1.1.	Zonas urbanizadas con red de alcantarillado	35
1.1.2.	Zonas urbanizadas sin red de alcantarillado	70
1.1.3.	Casas aisladas sin red de alcantarillado	45
1.1.4.	Fosas sépticas, letrinas y pozos negros	45
1.1.5.	Cloacas en granjas y sistema de riego con aguas residuales	55
1.1.6.	Descarga desde una planta de tratamiento inferior	35
1.1.7.	Superficie para aguas residuales urbanas	60
1.1.8.	Escorrentía desde superficie asfaltada	25
1.1.9.	Descarga de aguas residuales en cursos de agua superficial	45
1.1.10.	Inyección de aguas residuales en pozos	85
1.2.	RESIDUOS MUNICIPALES	
1.2.1.	Basureros, cubos de basura, papeleras	40
1.2.2.	Estación de carga de residuos y depósito de chatarra	40
1.2.3.	Vertedero sanitario	50
1.2.4.	Depósito de escombros	35
1.2.5.	Residuos de plantas de tratamiento	35
1.3.	COMBUSTIBLES	
1.3.1.	Tanques de almacenaje sobre tierra	50
1.3.2.	Tanques de almacenaje bajo tierra	55
1.3.3.	Tanques de reserva amontonados	50
1.3.4.	Depósito de tanques	50
1.3.5.	Estaciones de carga de combustible	60
1.3.6.	Gasolineras	60
1.3.7.	Cuevas de almacenaje bajo tierra	65
1.4.	TRANSPORTE Y TRÁFICO	
1.4.1.	Carretera	40
1.4.2.	Túnel de carretera	40
1.4.3.	Almacén de equipajes	35
1.4.4.	Área de aparcamiento	35
1.4.5.	Línea de tren	30
1.4.6.	Túnel de ferrocarril	30
1.4.7.	Estación de trenes	35
1.4.8.	Estación de clasificación	40
1.4.9.	Pista de aterrizaje	35
1.4.10.	Conducciones de líquidos peligrosos	60
1.5.	INSTALACIONES RECREATIVAS	
1.5.1.	Centro turístico	30
1.5.2.	Campamento	30
1.5.3.	Estadios y pistas de deportes al aire libre	25
1.5.4.	Campo de golf	35
1.5.5.	Pistas de esquí	25
1.6.	VARIOS	
1.6.1.	Cementerio	25
1.6.2.	Cementerio de animales	35
1.6.3.	Local de lavado en seco	35
1.6.4.	Estación de transformación	30
1.6.5.	Instalaciones militares y abandonadas	35
2.	ACTIVIDADES INDUSTRIALES	
2.1.	MINERÍA (ACTIVA O ABANDONADA)	
2.1.1.	Mina de sal	60
2.1.2.	Mina de otros minerales no metálicos	70
2.1.3.	Mina de mineral metálico	70
2.1.4.	Mina de carbón	70
2.1.5.	Mina de uranio	80
2.1.6.	Depósitos al aire libre de materia primas peligrosas	85
2.1.7.	Molienda de minerales e instalaciones de enriquecimiento	70
2.1.8.	Basuras y residuos mineros	70
2.1.9.	Residuos minerales	70
2.1.10.	Drenaje desde minas	65
2.1.11.	Balsa de residuos minerales	65

2.2.	EXCAVACIONES	
2.2.1.	Excavación y terraplenes de avance	10
2.2.2.	Mina de arena y grava	30
2.2.3.	Canteras	25
2.3	EXPLOTACIÓN DE GAS Y PETRÓLEO	
2.3.1.	Pozos de producción	40
2.3.2.	Pozos para reinyección	70
2.3.3.	Estación de carga	55
2.3.4.	Oleoductos	55
2.4	PLANTAS INDUSTRIALES	
2.4.1.	Fundición	40
2.4.2.	Metalurgia y siderurgia	40
2.4.3.	Procesamiento de metales e industria de acabado	50
2.4.4.	Galvanizados	55
2.4.5.	Refinería de petróleo	85
2.4.6.	Factoría química	65
2.4.7.	Caucho y neumáticos	40
2.4.8.	Manufacturas de pasta de papel	40
2.4.9.	Curtidos y pieles	70
2.4.10.	Alimenticia	45
2.5	CENTRALES ENERGÉTICAS	
2.5.1.	Central de gas	60
2.5.2.	Central térmica	50
2.5.3.	Central nuclear	65
2.6	ALMACENAJE INDUSTRIAL	
2.6.1.	Tanques de reserva de materia prima y química	60
2.6.2.	Contenedores de sustancias peligrosas	70
2.6.3.	Vertedero de cenizas y escorias	70
2.6.4.	Zona de residuos no peligrosos	45
2.6.5.	Zona de residuos peligrosos	90
2.6.6.	Zona de residuos nucleares	100
2.7	DESVÍO Y TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	
2.7.1.	Conductos de aguas residuales	65
2.7.2.	Superficie de aguas residuales	65
2.7.3.	Descarga desde planta de tratamiento	40
2.7.4.	Pozos de inyección de aguas residuales	85
3.	GANADERÍA Y AGRICULTURA	
3.1.	GANADERÍA	
3.1.1..	Establos de animales (pocilgas, cuadras,...)	30
3.1.2.	Cebadero	30
3.1.3.	Factoría agrícola	30
3.1.4.	Estercolero	45
3.1.5.	Tanques de almacenaje de estiércol líquido	45
3.1.6.	Área de pastoreo intensivo	25
3.2.	AGRICULTURA	
3.2.1.	Campo de cultivo	25
3.2.2.	Zonas de almacenaje de forraje	20
3.2.3.	Depósitos de fertilizantes y pesticidas	40
3.2.4.	Áreas de agricultura intensiva (Alta demanda de fertilizantes y pesticidas)	30
3.2.5.	Jardín	15
3.2.6.	Vivero	20
3.2.7.	Riego con aguas residuales	60

Cuadro 5.1. Relación de actividades potencialmente peligrosas (De Keteleare *et al.*, 2004).

5.1.3. INTENSIDAD DE LA CONTAMINACIÓN: FACTOR Q_n

El factor Q_n indica la cantidad de sustancia que puede ser vertida en caso de accidente, es decir, la intensidad de un evento de contaminación. Para ello se relaciona la cantidad susceptible de ser vertida con el tamaño de la fuente contaminante (De Keteleare *et al.*, 2004).

En función de la intensidad o cantidad, puede variar la peligrosidad de la fuente en un 20 %. Esta variación del 20 % se manifiesta tanto por exceso como por defecto.

Los valores que puede tomar Q_n varían entre 0,8 y 1,2. Una actividad humana que utilice una gran cantidad de contaminante incrementa su peligrosidad al multiplicarse por 1,2 y, en caso contrario, si es muy pequeña, se multiplica por 0,8.

El factor intensidad de contaminación permite diferenciar la peligrosidad de las fuentes contaminantes, no solo entre fuentes de distinta categoría, sino también dentro de una misma tipología.

5.1.4. PROBABILIDAD DE OCURRENCIA: FACTOR R_f

El factor R_f se refiere a la probabilidad de que ocurra un evento de contaminación (De Keteleare *et al.*, 2004) y los valores pueden variar entre 0 y 1. El valor 0 expresa una probabilidad nula de que ocurra una catástrofe, mientras que el valor 1 indica la certeza de que puede llegar a ocurrir un suceso de contaminación. Para medir la probabilidad de ocurrencia, se puede utilizar el estado de conservación o mantenimiento de cualquier fuente potencial emisora de contaminación. Igualmente, se puede utilizar la seguridad de las instalaciones o de la actividad. De Keteleare *et al.* (2004) aconsejan utilizar valores cercanos a 1, de lo contrario se podría eliminar fácilmente la peligrosidad de actividades que utilizan materiales altamente tóxicos y sólo utilizar valores cercanos a cero para actividades humanas muy seguras.

5.1.5. ÍNDICE DE PELIGRO HI

El producto de los tres factores anteriores, expresión [5.1], tiene como resultado el índice de peligro HI (De Keteleare *et al.*, 2004):

$$HI = H \cdot Q_n \cdot R_f \quad [5.1]$$

El índice final de peligro de contaminación puede variar entre un valor mínimo de 0 y un máximo de 120. Los valores del índice de peligrosidad se agrupan en clases cualitativas de peligro mediante intervalos regulares, con un recorrido de 24 unidades cada uno. De esta manera, se obtienen cinco clases para diferenciar el índice de peligro (cuadro 5.2).

Intervalos del índice HI	Clase de peligro
[0 – 24]	Muy Bajo
(24 – 48]	Bajo
(48 – 72]	Moderado
(72 – 96]	Alto
(96 – 120]	Muy Alto

Cuadro 5.2. Clases del índice de peligro (De Keteleare *et al.*, 2004).

5.2. MÉTODOS DE EVALUACIÓN Y CARTOGRAFÍA DE LA VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DE LOS ACUÍFEROS

En este trabajo se han utilizado cinco métodos de evaluación y cartografía de la vulnerabilidad: DRASTIC (Aller *et al.*, 1987), GOD (Foster, 1987), AVI (Van Stempvoort *et al.*, 1993), EPIK (Doerfliger, 1996) y COP (Vías *et al.*, 2002). Estos métodos, sólo tienen en cuenta la capacidad de resistencia o atenuación de la contaminación que, posteriormente, es ponderada con el factor de exposición.

Esta diversidad de métodos utilizados para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos, tiene por objetivo cubrir un amplio espectro de posibilidades, para que la comparación y selección de los métodos sea lo más adecuada posible. Los métodos DRASTIC, GOD y AVI pueden ser aplicados a cualquier tipo de acuífero; en cambio el método EPIK es exclusivo de acuíferos carbonáticos y el método COP es un modelo mixto, diseñado para acuíferos carbonáticos pero que incorporan información de acuíferos de diversa naturaleza. El método AVI es el único que trabaja con datos numéricos y continuos, a diferencia del resto que utiliza valores numéricos ordinales. Los métodos AVI y GOD utilizan muy pocos parámetros, dos y tres respectivamente, mientras que el resto utiliza una amplia gama, sobre todo el método COP que llega a necesitar 13 parámetros.

Todos los métodos utilizados (a excepción de EPIK) emplean algún parámetro que está condicionado por elementos externos al acuífero, caso de la precipitación, que influye en variables como la recarga o la profundidad del nivel piezométrico. Por tanto, la vulnerabilidad de los acuíferos, según estos métodos, depende, en cierta medida, de parámetros externos a los mismos.

En un ámbito como el Mediterráneo donde las variaciones climáticas, a escala anual e interanual, son muy acusadas, las características de los acuíferos ligadas a las condiciones climáticas, como por ejemplo la profundidad del nivel piezométrico y la recarga, varían igualmente y, por tanto, la vulnerabilidad de los mismos. De los trabajos de Vías (2000) y Vías *et al.* (2005), se ha deducido que la vulnerabilidad de los acuíferos debe estar referida al periodo de condiciones más desfavorables, es decir, de mayor vulnerabilidad. De esta manera, las medidas de protección a adoptar por parte de los gestores del territorio serán más adecuadas porque estarían destinadas a la protección del agua en las condiciones más desfavorables.

La aplicación llevada a cabo por Vías (2000) en el sistema acuífero de Torremolinos mediante los métodos DRASTIC, GOD y AVI, muestra cambios en el grado de vulnerabilidad de algunos sectores del acuífero a causa de variaciones en la profundidad del nivel piezométrico, según se trate de un año húmedo, medio o seco. De los mapas elaborados por Vías (2000) se deduce una zona de variabilidad temporal en el grado vulnerabilidad (figuras 5.1, 5.2 y 5.3) según la situación climática considerada (húmeda, media o seca).

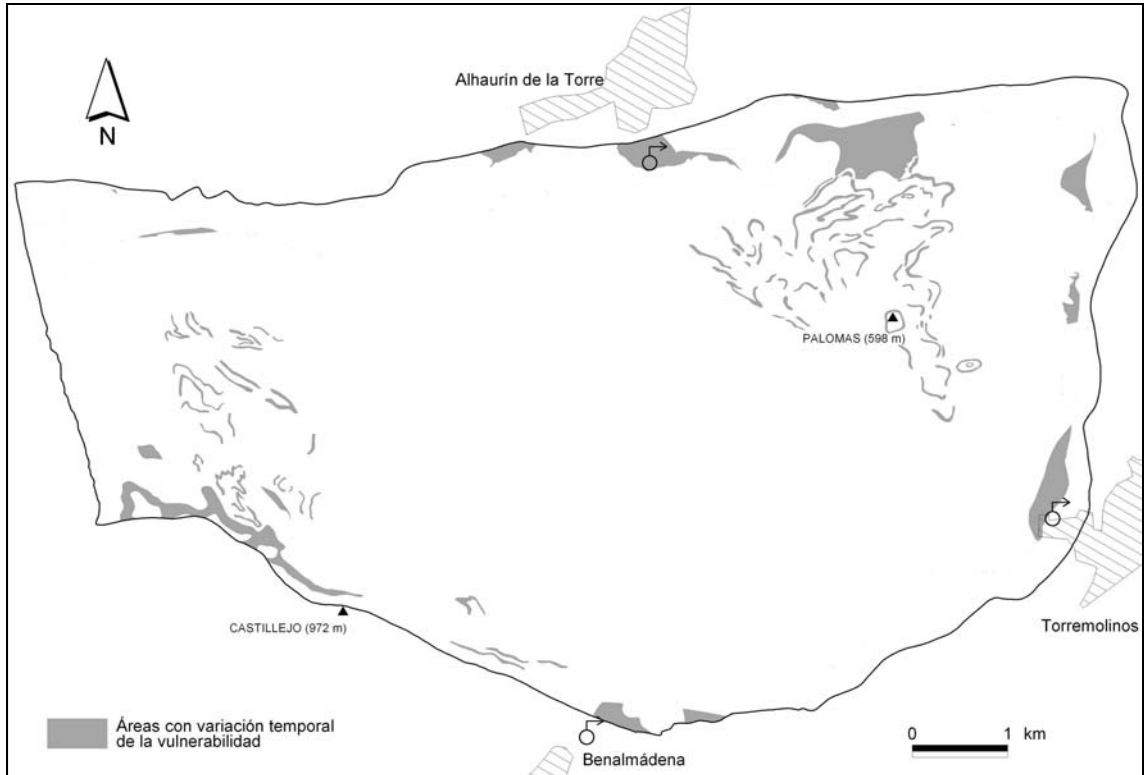


Figura 5.1. Zonas vulnerabilidad variable entre un año húmedo y seco en el sistema de Torremolinos según el método DRASTIC. Elaborado a partir de Vías (2000).

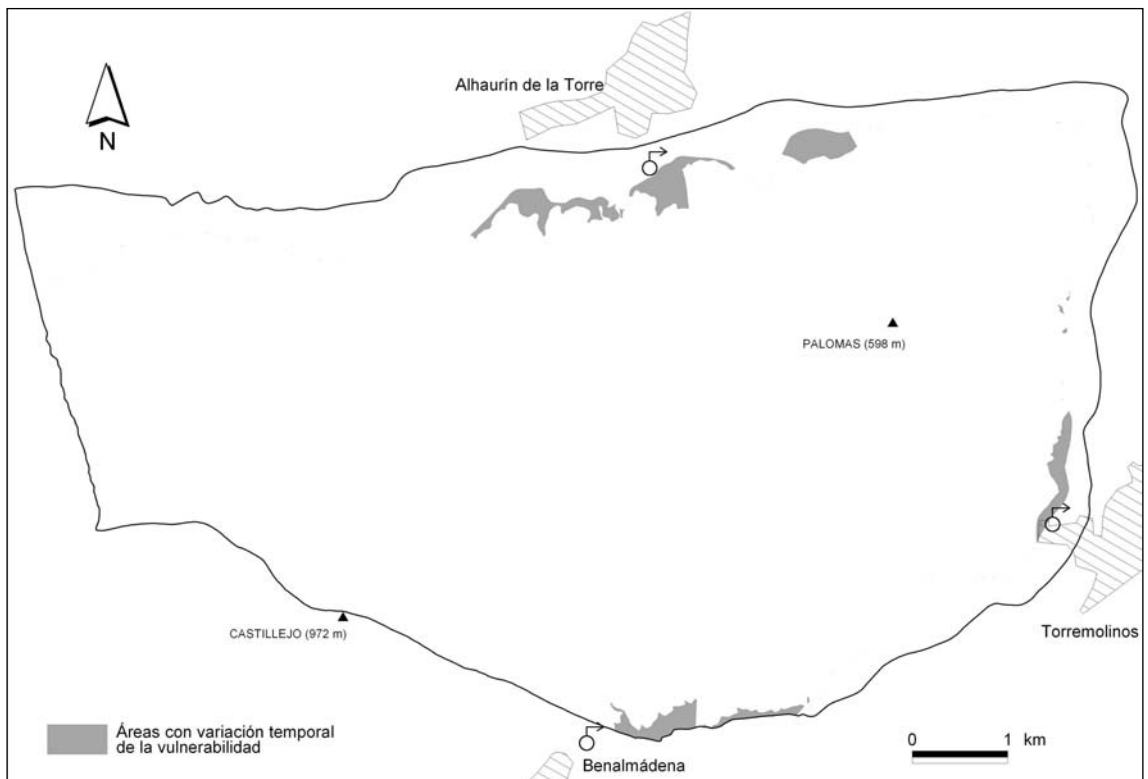


Figura 5.2. Zonas vulnerabilidad variable entre un año húmedo y seco en el sistema de Torremolinos según el método GOD. Elaborado a partir de Vías (2000).

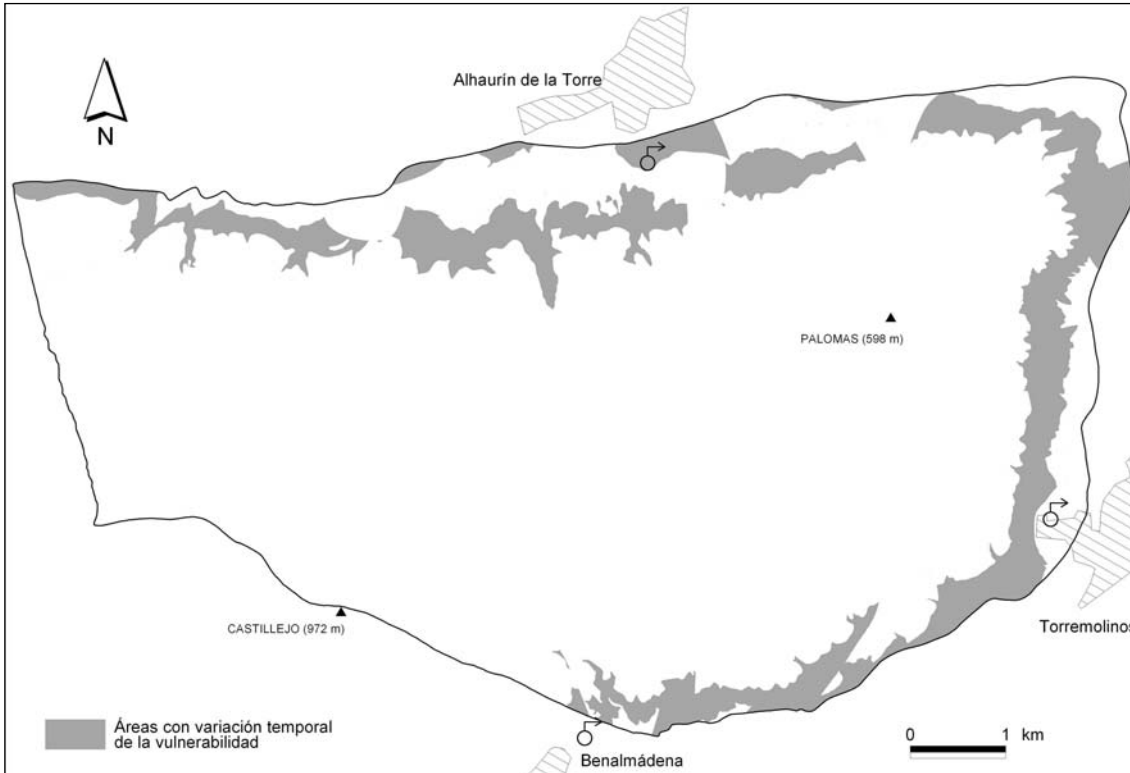


Figura 5.3. Zonas vulnerabilidad variable entre un año húmedo y seco en el sistema de Torremolinos según el método AVI. Elaborado a partir de Vías (2000).

En todos los casos se observan variaciones en el grado de vulnerabilidad debido a los cambios que las precipitaciones provocan en la recarga y en el espesor de zona no saturada entre una situación y otra. Los gráficos de la figura 5.4 muestran cómo disminuye la vulnerabilidad, mediante los tres métodos aplicados al acuífero de Torremolinos, entre un año húmedo y un año seco.

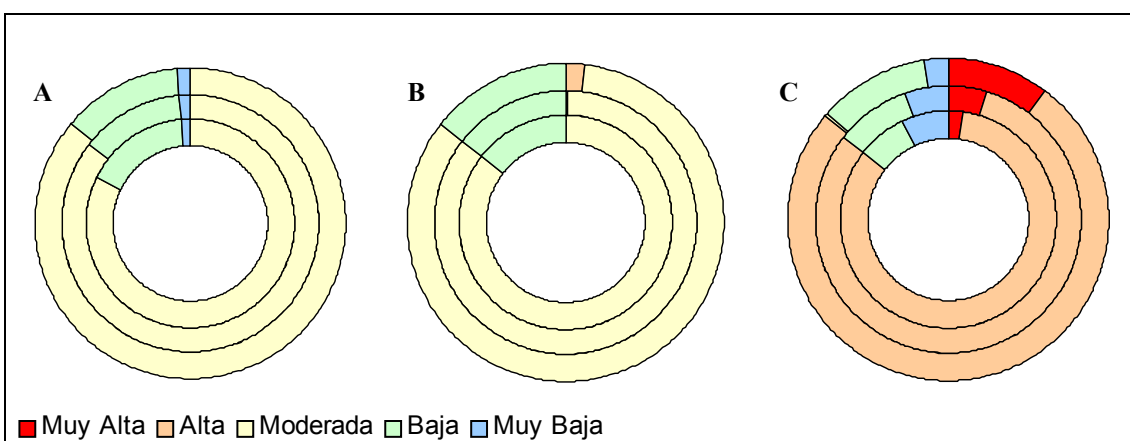


Figura 5.4. Proporción de superficie del sistema de Torremolinos según la clase de vulnerabilidad mediante los métodos DRASTIC (A), GOD (B) y AVI (C). El anillo exterior representa la superficie de un año húmedo, el central un año medio y el interior un año seco.

Con el método AVI un 13 % de la superficie del acuífero presenta cambios entre un periodo húmedo y otro seco, mientras que el método GOD, con un 2 %, es el que presenta en menor medida las variaciones derivadas del clima. En una situación intermedia se encuentra el método DRASTIC, el cual establece variaciones en el grado de vulnerabilidad, entre un periodo y otro, en un 5 % de la superficie del acuífero de Torremolinos.

En un año hidrológico húmedo, el sistema de Torremolinos es más vulnerable, en la medida que hay más superficie con vulnerabilidad elevada (clases Muy Alta y Alta).

La vulnerabilidad de los acuíferos analizados en este trabajo se ha llevado a cabo para un año húmedo como año representativo de una situación de mayor vulnerabilidad.

5.2.1. MÉTODO DRASTIC

El método DRASTIC parte de cinco premisas (Aller *et al.*, 1987):

- el contaminante se introduce desde la superficie
- el contaminante se introduce por infiltración del agua de lluvia
- el contaminante se diluye en el agua y adquiere su misma movilidad, viscosidad y densidad
- el área evaluada ocupa una extensión mínima de 100 acres (40'5 ha aprox)
- los acuíferos son considerados libres o confinados; el método no está pensado para situaciones intermedias y, en el caso de acuíferos semiconfinados, el usuario ha de elegir entre una u otra posibilidad

Las tres primeras premisas son aplicables a los métodos considerados en esta memoria dado que no tienen en cuenta ni el tipo de contaminante ni su origen:

El método DRASTIC utiliza siete parámetros, cuyas iniciales, en inglés, constituyen el acrónimo que da nombre al método. Las variables utilizadas son:

- profundidad del agua subterránea (*Depth groundwater*); en acuíferos confinados no se tiene en cuenta el nivel piezométrico para el cálculo de la profundidad sino la cota del muro de la capa confinante del acuífero
- recarga del acuífero (*net Recharge*)
- material de la zona saturada (*media Aquifer*)
- tipo de suelo (*Soil media*)
- pendiente (*Topography*)
- material de la zona no saturada (*Impact of the vadose zone media*)
- conductividad hidráulica del acuífero (*hydraulic Conductivity of the aquifer*)

La ponderación asignada a cada variable (cuadro 5.3) es resultado de un panel de expertos y no permite, salvo en situaciones de contaminación por pesticidas, ningún tipo de variación, al contrario de lo que ocurre con los rangos o clases en los que sí queda abierta esta posibilidad en función del conocimiento del área de estudio.

Variable	Factor de ponderación en situación normal	Factor de ponderación por uso de pesticidas
Profundidad del agua subterránea	5	5
Recarga	4	4
Zona saturada	3	3
Suelo	2	5
Pendiente	1	3
Zona no saturada	5	4
Conductividad hidráulica	3	2

Cuadro 5.3. Ponderación de las variables en el método DRASTIC.

5.2.1.1. PARÁMETROS DEL MÉTODO DRASTIC

Cada parámetro está dividido en rangos a los cuales se les asigna una puntuación (en una escala del 1 al 10). Los distintos intervalos y puntuaciones se recogen en los cuadros 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10. Además, en los cuadros 5.6 y 5.9 (parámetros A e I) se indica la puntuación que con mayor frecuencia tiene cada rango según Aller *et al.* (1987).

La puntuación de una variable, está determinada por la capacidad de atenuar la contaminación que tiene dicha variable, principalmente a través de procesos de sorción y biodegradación de compuestos orgánicos naturales y sintéticos.

La capacidad de atenuación derivada de la profundidad del nivel piezométrico (D) es función del tiempo de paso del contaminante desde la superficie hasta el agua subterránea. Así, a mayor profundidad del nivel piezométrico, mayor tiempo de oxidación del contaminante y, por tanto, mayor capacidad de atenuación y menor vulnerabilidad a la contaminación. En esta misma línea actúan las variables relacionadas con la litología, como la zona saturada (A), zona no saturada (I) y conductividad hidráulica (C) y parámetros relacionados con el suelo (S).

En el caso de la recarga (R) el factor determinante es la capacidad del agua de transportar contaminantes. A mayor precipitación, mayor probabilidad de arrastrar e introducir el contaminante en el acuífero.

La pendiente (T) influye por su capacidad para generar escorrentía superficial. Así, a mayor pendiente, mayor probabilidad de escorrentía y menor probabilidad de contaminación.

D		
Rango		Puntuación
(pies)	(metros)	
≤ 5	≤ 1,524	10
5 - 15	1,524 – 4,572	9
15 - 30	4,572 – 9,144	7
30 - 50	9,144 – 15,24	5
50 - 75	15,24 – 22,86	3
75 - 100	22,86 – 30,48	2
> 100	> 30,48	1

Cuadro 5.4. Rango y puntuación del parámetro A, profundidad del nivel piezométrico (método DRASTIC).

R		
Rango		Puntuación
(pulgadas)	(mm)	
0 - 2	0 – 50,8	1
2 - 4	50,8 – 101,6	3
4 - 7	101,6 – 177,8	6
7 - 10	177,8 – 254,0	8
> 10	> 254	9

Cuadro 5.5. Rango y puntuación del parámetro R, recarga (método DRASTIC). Coeficiente de conversión de pulgadas a mm tomado de Freeze y Cherry (1979).

A		
Rango	Puntuación	
		Valor típico
Esquistos masivos	1 - 3	2
Ígneas/Metamórficas	2 - 5	3
Ígneas/Metamórficas meteorizadas	3 - 5	4
Till Glaciar	4 - 6	5
Alternancia de esquistos-calizas-areniscas	5 - 9	6
Arenisca masiva	4 - 9	6
Caliza masiva	4 - 9	6
Arena y grava	4 - 9	8
Basalto	2 - 10	9
Caliza karstificada	9 - 10	10

Cuadro 5.6. Rango y puntuación del parámetro A, litología de la zona saturada (método DRASTIC).

S	
Rango	Puntuación
Delgado a ausente	10
Grava	10
Arena	9
Turba	8
Arcilla con agregados	7
Marga arenosa	6
Marga	5
Marga limosa	4
Marga arcillosa	3
Fango	2
Arcilla sin agregados	1

Cuadro 5.7. Rango y puntuación del parámetro S, suelo (método DRASTIC).

T	
Rango (%)	Puntuación
0 - 2	10
2 - 6	9
6 - 12	5
12 - 18	3
>18	1

Cuadro 5.8. Rango y puntuación del parámetro T, pendiente (método DRASTIC).

I		
Rango	Puntuación	
		Valor típico
Capa confinante	1	1
Limo/Arcilla	2 - 6	3
Esquisto	2 - 5	3
Caliza	2 - 7	6
Arenisca	4 - 8	6
Alternancia de esquisto-calizas-areniscas	4 - 8	6
Arena y grava con limo y arcilla	4 - 8	6
Ígneas/Metamórficas	2 - 8	4
Arena y grava	6 - 9	8
Basalto	2 - 10	9
Caliza karstificada	8 - 10	10

Cuadro 5.9. Rango y puntuación del parámetro I, litología de la zona no saturada (método DRASTIC).

C		
Rango		Puntuación
(g/d/ft ²)	(m/día)	
1 - 100	0-0,04	1
100 - 300	0,04 - 12,2	2
300 - 700	12,2 - 28,5	4
700 - 1000	28,5 - 40,8	6
1000 - 2000	40,8 - 81,5	8
> 2000	> 81,5	10

Cuadro 5.10. Rango y puntuación del parámetro C, conductividad hidráulica (método DRASTIC). Coeficiente de conversión de g/d/ft² a m/día tomado de Freeze y Cherry (1979).

5.2.1.2. ÍNDICE DE VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DEL MÉTODO DRASTIC

El índice de vulnerabilidad final se obtiene de la siguiente fórmula [5.2]:

$$\text{Índice de vulnerabilidad DRASTIC} = \sum_{j=1}^7 W_j \cdot R_j \quad [5.2]$$

donde R = factor de puntuación y W = factor de ponderación

El resultado es un índice numérico que varía entre el valor 23 y 226, pero no cuantifica taxativamente la vulnerabilidad, sino que establece las variaciones espaciales sin determinar las clases de vulnerabilidad del acuífero. El método DRASTIC no establece una clasificación de la vulnerabilidad, sino que realiza una agrupación del índice en 8 intervalos regulares (salvo los extremos, cuadro 5.11) que sirven de referencia a la hora de comparar los resultados con otras zonas de estudio, pero no con otros métodos.

Intervalos del índice DRASTIC	Grupo de vulnerabilidad
≥ 200	Vulnerabilidad mayor
180 - 200	
160 - 180	
140 - 160	Vulnerabilidad Intermedia
120 - 140	
100 - 120	Vulnerabilidad menor
80 - 100	
< 80	

Cuadro 5.11. Clasificación del índice de vulnerabilidad DRASTIC.

5.2.2. MÉTODO GOD

El método GOD (Foster, 1987 y Foster y Hirata, 1988) utiliza tres variables para evaluar la vulnerabilidad, y al igual que ocurre con el método DRASTIC, el nombre del método es un acrónimo que responde a las iniciales, en inglés, de las variables utilizadas:

- tipo de acuífero (*Groundwater occurrence*)
- características litológicas (*Overall aquifer class*)
- profundidad del nivel piezométrico (*Depth to groundwater*)

5.2.2.1. PARÁMETROS DEL MÉTODO GOD

Las clases o rangos de cada parámetro y sus puntuaciones (cuyos valores varían entre 0 y 1) están recogidos en los cuadros 5.12, 5.13 y 5.14:

G	
Rango	Puntuación
Ninguno	0
Confinado artesiano	0,1
Confinado	0,2
Semi-confinado	0,4
Cubierto	0,6
Libre o no confinado	1

Cuadro 5.12. Rango y puntuación del parámetro G, tipo de acuífero (método GOD).

O			
Rango		Puntuación	
Rocas no consolidados (Sedimentos)	Suelos residuales	0,4	
	Loess/Depósitos aluviales	0,5	
	Arenas eólicas	0,6	
	Arenas y gravas aluviales/fluvioglaciares	0,7	
	Gravas coluviales	0,8	
Rocas consolidadas	Porosas o con bajo grado de fisuración	Arcilla compactada/Pizarra	0,5
		Limo compactado/Toba volcánica	0,6
		Arenisca	0,7
		Caliza/ Calcarenita	0,9
	Densas o con alto grado de fisuración	Ígneas/metamórficas/volcánicas	0,6
		Lava volcánica reciente	0,8
	Caliza	1	

Cuadro 5.13. Rango y puntuación del parámetro O, litología del acuífero (método GOD).

D	
Rango (metros)	Puntuación
≤ 2	1
2 - 5	0,9
5 - 10	0,8
10 - 20	0,7
20 - 50	0,6
50 - 100	0,5
> 100	0,4

Cuadro 5.14. Rango y puntuación del parámetro D, profundidad del nivel piezométrico (método GOD).

5.2.2.2. ÍNDICE DE VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DEL MÉTODO GOD

El índice de vulnerabilidad final se obtiene mediante la siguiente expresión [5.3]:

$$\text{Índice de vulnerabilidad GOD} = G_r \cdot O_r \cdot D_r \quad [5.3]$$

donde r = puntuación

El índice GOD varía entre 0 y 1 y se agrupa en cinco intervalos irregulares, de acuerdo con Foster (1987) y Foster y Hirata (1988 (cuadro 5.15).

Índice	Clase
0 - 0,1	Inapreciable
0,1 - 0,3	Baja
0,3 - 0,5	Moderada
0,5 - 0,7	Alta
0,7 - 1	Extrema

Cuadro 5.15. Clases de vulnerabilidad del índice de GOD.

5.2.3. MÉTODO AVI

Este método, cuyo nombre es un acrónimo que responde a las iniciales de *Aquifer Vulnerability Index*, fue propuesto por Van Stempvoort *et al.* (1993) y tiene en cuenta sólo dos variables:

- espesor (**d**) de cada capa sedimentaria de la zona no saturada
- conductividad hidráulica (**k**) de cada una de las capas anteriores

5.2.3.1. PARÁMETROS DEL MÉTODO AVI

A diferencia del resto de métodos utilizados, no se establece ningún sistema de rangos, puntuaciones y ponderaciones, sino que únicamente se utilizan los datos numéricos de las variables anteriores, expresadas en metros (parámetro d) y en m/día (parámetro k).

5.2.3.2. ÍNDICE DE VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DEL MÉTODO AVI

El índice de vulnerabilidad AVI se calcula mediante la siguiente expresión [5.4]:

$$C = \sum \frac{d_i}{k_i} \quad [5.4]$$

donde C = índice vulnerabilidad AVI; i = 1....n capas sedimentarias

Este índice describe la resistencia de un acuífero a la entrada de contaminantes por el flujo vertical. Representa el número de días que, teóricamente, tardaría el contaminante en atravesar la zona no saturada, puesto que k se mide en m/día y d en m. En sentido estricto, el índice de vulnerabilidad AVI no puede considerarse como tiempo de paso del contaminante, puesto que no se toman en consideración otros aspectos como por ejemplo la dispersión y la sorción (Van Stempvoort *et al.*, 1993).

La clasificación del índice C en intervalos (cuadro 5.16) se establece mediante una clasificación regular del logaritmo de C. De esta forma, en el mapa final se recogen grandes variaciones de la vulnerabilidad, en la medida que se diferencian órdenes de magnitud del índice C.

Intervalos del índice C	Log (C)	Clases
0 - 10	< 1	Extremadamente alta
10 - 100	1 - 2	Alta
100 - 1000	2 - 3	Moderada
1000 - 10000	3 - 4	Baja
> 10000	> 4	Extremadamente baja

Cuadro 5.16. Clases de vulnerabilidad según intervalos del índice del método AVI.

5.2.4. MÉTODO EPIK

El método EPIK (Doerfliger, 1996), está pensado para acuíferos carbonáticos o kársticos. Utiliza 4 variables cuyas iniciales forman el acrónimo que da nombre del método (cuadro 5.17):

- formas exokársticas (*Epikarst*)
- cubierta protectora (*Protection cover*)
- condiciones de Infiltración (*Infiltration condition*)
- red de drenaje kárstico (*Karst network development*)

Variable	Factor de Ponderación
Epikarst	3
Cubierta protectora	1
Condiciones de infiltración	3
Red kárstica	2

Cuadro 5.17. Factores de ponderación de las variables en el método EPIK.

5.2.4.1. PARÁMETROS DEL MÉTODO EPIK

Las puntuaciones de cada variable (cuadros 5.18, 5.19, 5.20 y 5.21) se asignan de forma contraria a los otros métodos, es decir, a mayor vulnerabilidad, menor puntuación. Según Goldscheider (1999), este sistema de puntuación es contradictorio por dos razones: asigna mayor peso a los parámetros que más influyen en la vulnerabilidad, como es el Epikarst (factor de ponderación 3), pero asigna una menor puntuación a los rangos de mayor vulnerabilidad, como es la presencia de dolinas (puntuación 1). Además, al asignar un elevado peso a los parámetros de mayor importancia, reduce la influencia de estas variables en la vulnerabilidad, puesto que un valor elevado indica menor susceptibilidad a la contaminación

Dadas las particulares características del medio kárstico, la puntuación de algunas variables sigue criterios contrarios a los utilizados en los métodos anteriores en algunas situaciones concretas. Este es el caso de la pendiente, que dentro de una cuenca vertiente a un sumidero, las laderas contiguas actúan de forma inversa a como lo harían en un medio no kárstico: a mayor pendiente mayor vulnerabilidad, puesto que favorece la escorrentía hacia un punto (sumidero) donde el agua se infiltra rápidamente. La atenuación del contaminante que se infiltra a través de un sumidero es escasa o nula y, por tanto, una ladera de fuerte pendiente recibe menor puntuación (mayor vulnerabilidad de acuerdo con el criterio del método) no por favorecer la vulnerabilidad en sí misma, sino por su conexión con una entrada directa al acuífero.

E		
Rango	Puntuación	
	Referencia	Valor
Sumideros y depresiones cerradas que absorben un curso de agua Dolinas, Cuestas, Lapiaces Afloramientos muy fracturados (bordes de carretera, canteras)	E ₁	1
Zonas intermedias entre alineamientos de dolinas Valles secos.	E ₂	3
Resto de la cuenca de alimentación	E ₃	4

Cuadro 5.18. Rango y puntuación del parámetro E, epikarst (método EPIK).

P			
Rango		Puntuación	
		Referencia	Valor
A) Directamente sobre el acuífero o capas detríticas de alta conductividad hidráulica	< 20 cm suelo	P ₁	1
	20 - 100 cm suelo	P ₂	2
	> 100 cm suelo	P ₃	3
B) Sobre formaciones geológicas de baja conductividad hidráulica	0 - 20 cm de suelo sobre capas con un espesor inferior a 1m	P ₁	1
	20 - 100 cm de suelo sobre capas con un espesor inferior a 1m	P ₂	2
	> 100 cm suelo y/o formación geológica de baja permeabilidad	P ₃	3
	> 100 cm de suelo con una formación geológica de baja permeabilidad	P ₄	4

Cuadro 5.19. Rango y puntuación del parámetro P, cubierta protectora (método EPIK).

I			
Rango		Puntuación	
		Referencia	Valor
A) En el interior de la cuenca vertiente de un arroyo que alimenta un sumidero	- Arroyos perdedores temporales o perennes - Lechos y riberas de arroyos - Cursos de agua que alimentan un sumidero o una dolina - Arroyos infiltrantes - Sectores de la cuenca vertiente drenados artificialmente	I ₁	1
	Sectores de la cuenca drenados naturalmente cuya pendiente es mayor de 10% para zonas cultivadas y mayor del 25% para praderas y pastizales	I ₂	2
	Sectores no drenados de la cuenca cuya pendiente es menor del 10% para zonas de cultivos y menor de 25% para pastos y praderas	I ₃	3
B) Fuera de la cuenca vertiente de un arroyo que alimenta un sumidero	Áreas (Zonas de ruptura de pendiente con un área de influencia entre 50 y 100 metros) que actúan como colectores de las aguas de lluvia y pendientes que la generan (pendientes superiores al 10% para zonas cultivadas y mayores del 25% para praderas y pastizales)	I ₃	3
	Resto de la cuenca	I ₄	4

Cuadro 5.20. Rango y puntuación del parámetro I, infiltración (método EPIK).

K		
Rango	Puntuación	
	Referencia	Valor
Red kárstica bien desarrollada. Conductos de tamaño decimétrico a métrico, bien conectados y raramente obstruidos	K ₁	1
Red kárstica pobremente desarrollada. Drenes decimétricos o de inferior tamaño, poco conectados u obstruidos	K ₂	2
Acuífero fisurado, no kárstico	K ₃	3

Cuadro 5.21. Rango y puntuación del parámetro k, karstificación (método EPIK).

5.2.4.2. ÍNDICE DE VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DEL MÉTODO EPIK

El índice de vulnerabilidad según el EPIK, también denominado factor de protección F, varía entre los valores 9 (máxima vulnerabilidad) y 34 (mínima vulnerabilidad) y se obtiene de la siguiente ecuación [5.5]:

$$F = \sum_{j=1}^4 W_j \cdot R_j \quad [5.5]$$

donde F = factor de protección o índice de vulnerabilidad, W = valor de ponderación y R = valor de la puntuación

El índice se agrupa en clases denominadas áreas de protección (S) equivalentes a la vulnerabilidad a partir de intervalos del factor de protección F (Doerfliger y Zwahlen, 1997) como se muestra en el cuadro 5.22.

Clase vulnerabilidad	Factor de protección (F)	Zonas de Protección (S)	Clase de Vulnerabilidad
Muy elevada	≤ 19	S1	Muy Alta
Elevada	19 - 25	S2	Alta
Moderada	> 25	S3	Moderada
Débil	P = P ₄	Resto de la cuenca de alimentación	Débil

Cuadro 5.22. Clases de vulnerabilidad del método EPIK. Modificado de Doerfliger y Zwahlen (1997).

La clasificación del índice EPIK en intervalos de vulnerabilidad se realiza mediante criterios cualitativos y cuantitativos. El criterio cualitativo se utiliza para designar el valor 4 del parámetro P como una clase de vulnerabilidad y establecer como incompatible la combinación de áreas designadas E1 e I1 con P3 o P4 (Doerfliger, 1996). Desde un punto de vista cuantitativo, el índice se agrupa en clases a partir de intervalos irregulares de forma que los intervalos extremos son el doble de amplios que el intervalo central.

Cada una de estas clases se relaciona con un valor de protección (cuadro 5.22). Las zonas de vulnerabilidad Muy Alta (S1) son aquellas que necesitan de protección, al igual que los pozos, por configurarse como áreas de recarga de los puntos de agua que abastecen a la población (Doerfliger, 1996). En cambio, las zonas de vulnerabilidad Alta (S2) ofrecen protección frente a contaminantes microbiológicos y sustancias no degradables (Doerfliger, 1996), por lo que en caso de accidente se cuenta con tiempo suficiente para tomar medidas de mitigación de la catástrofe. En cualquier caso, tanto en las áreas S1 como S2, la contaminación puede alcanzar a la fuente de abastecimiento de la población. Las zonas S3 son aquellas que no forman parte de los principales puntos de recarga de los acuíferos y carecen de un alto grado de karstificación en superficie, por lo que la vulnerabilidad es menor y no necesitan de protección.

5.2.5. MÉTODO COP

El método COP fue diseñado por Vías *et al.* (2002) para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos carbonáticos a partir de los tres factores indicados por la Acción COST 620: C (flow Concentration), O (Overlying layers) y P (Precipitation). Este método evalúa la vulnerabilidad del recurso hídrico y, para ello, se basa en dos premisas. Por un lado, el contaminante se mueve con el agua a través de la zona no saturada y, por otra parte, los contaminantes se infiltran en el acuífero desde la superficie topográfica.

Según Almeida *et al.* (1995), la carga contaminante de muchas sustancias es atenuada mediante procesos biogeoquímicos en la zona no saturada. El factor O tiene en cuenta la protección que ejerce la zona no saturada frente a un evento contaminante, es decir, indica la capacidad de filtro o atenuación de la contaminación, mediante los diversos procesos que ocurren en el interior de la zona no saturada (figura 4.1).

El factor C es un factor específico de medios kársticos a diferencia del factor O que se puede aplicar para estimar la capacidad de protección de las capas suprayacentes al agua en cualquier tipo de acuífero. El factor C tiene en cuenta las condiciones de superficie que controlan los flujos de agua hacia zonas de rápida infiltración, donde la capacidad de atenuación de la contaminación es menor, debido al menor tiempo de tránsito.

El factor P tiene en cuenta las características del agente que transporta los contaminantes a través de la zona no saturada (el agua de la precipitación), mientras que los factores O y C hacen referencia al medio donde se produce el transporte. La principal característica del factor P reside en que se ha desarrollado para diferenciar zonas con distintas características pluviométricas, de manera que pueda ser aplicado a todo el ámbito europeo.

5.2.5.1. FACTOR O: CAPAS DE PROTECCIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

El factor O tiene en cuenta la protección que ejerce la zona no saturada del acuífero, de acuerdo con las características de las dos principales capas que se pueden diferenciar en ella: suelo (variable O_s) y litología (variable O_L).

5.2.5.1.1 VARIABLE O_S : SUELO

La variable suelos (O_S) hace referencia a la capa biológicamente activa de la zona no saturada. En el suelo tienen lugar la mayoría de los procesos de autodepuración de la carga tóxica de las aguas contaminadas.

En la variable O_S se han establecido cinco clases en función de la textura y el espesor (cuadro 5.23). La textura se clasifica en cuatro grupos según la distribución del tamaño de grano: textura arcillosa, limosa, arenosa y franca o equilibrada, de acuerdo con Ferreras y Fidalgo (1991). El espesor del suelo se clasifica en tres categorías para facilitar su reconocimiento en el campo: suelos con menos de medio metro de espesor, entre medio y un metro y suelos con más de un metro.

Textura \ Espesor	Arcillosa	Limosa	Franca	Arenosa
> 1 m	5	4	3	2
> 0,5 m y ≤ 1 m	4	3	2	1
≤ 0,5 m	3	2	1	0

Cuadro 5.23. Parámetros y puntuación de la variable suelo O_S (método COP).

5.2.5.1.2 VARIABLE O_L : LITOLÓGÍA

La variable litología (O_L) refleja la capacidad de atenuación de los contaminantes en cada capa litológica de la zona no saturada. Para su estimación se tiene en cuenta, por un lado, el parámetro ly que hace referencia a las características hidrogeológicas, principalmente porosidad y conductividad hidráulica, junto con el grado de fracturación de cada capa (cuadro 5.24) y el parámetro m relacionado con el espesor de las mismas. Por otro lado, el parámetro cn indica el grado de confinamiento de los distintos sectores del acuífero (cuadro 5.25).

Rangos del parámetro ly	Valor de (ly)
Arcillas	1500
Limos	1200
Margas y rocas ígneas y metamórficas no fisuradas	1000
Margocalizas	500
Rocas ígneas y metamórficas fisuradas	400
Brechas y conglomerados no fisurados o cementados	100
Areniscas	60
Brechas y conglomerados fisurados o escasamente cementados	40
Arenas y gravas	10
Basaltos permeables	5
Rocas carbonáticas fisuradas	3
Rocas karstificadas	1

Cuadro 5.24. Valores del parámetro ly (método COP).

Rangos del parámetro cn	Valor de cn
Confinado	2
Semi-confinado	1,5
No confinado	1

Cuadro 5.25. Valores del parámetro cn (método COP).

Para obtener la variable O_L , en primer lugar se elabora un índice de protección de las capas de la zona no saturada, Li , resultado de la sumatoria del producto de los parámetros ly por m (expresión matemática [5.6]).

$$Li = \sum (ly \cdot m) \quad [5.6]$$

El producto resultante se clasifica en cinco clases (cuadro 5.26) a las cuales se les asigna un valor de protección que varía entre 1 y 5.

Rango de valores de $ly \cdot m$	Valor de protección (Li)
≤ 250	1
(250 – 1000]	2
(1000 – 2500]	3
(2500 – 10000]	4
> 10000	5

Cuadro 5.26. Valores del parámetro Li (método COP).

El índice de protección Li se basa en la misma idea planteada por los métodos PI (Goldscheider *et al.*, 2000) y AVI (Van Stempvoort *et al.*, 1993), mediante los cuales la protección del agua subterránea aumenta conforme aumenta la potencia del acuífero, teniendo en cuenta las características litológicas y el espesor de cada capa existente sobre la superficie del agua subterránea.

El parámetro cn utiliza el mismo criterio frente a la vulnerabilidad que los parámetros A y G de los métodos PI (Goldscheider *et al.*, 2000) y GOD (Foster, 1987), respectivamente. En ambos métodos, la protección del agua subterránea aumenta a la par que el grado de confinamiento del acuífero.

El producto de Li por cn tiene como resultado el valor de protección de la variable O_L , expresión [5.7].

$$O_L = Li \cdot cn \quad [5.7]$$

5.2.5.1.3 VALORES Y CLASES DEL FACTOR O

El factor O se obtiene de la suma de las variables O_S y O_L como indica la expresión [5.8]

$$\text{Factor O} = O_S + O_L \quad [5.8]$$

Los valores de O varían entre 1 y 15, de manera que 1 indica la menor capacidad de protección que ofrece el acuífero y 15 la máxima protección (menor vulnerabilidad). Los valores del factor O se han agrupado en cinco clases a las cuales se les ha asignado un valor cualitativo de protección entre Muy Baja y Muy Alta (cuadro 5.27).

Valores del factor O	Capacidad de protección en la zona no saturada
1	Muy Baja
2	Baja
(2 – 4]	Moderada
(4 – 8]	Alta
(8 – 15]	Muy Alta

Cuadro 5.27. Capacidad de protección del agua subterránea en función del factor O (método COP).

5.2.5.2. FACTOR C: CONDICIONES SUPERFICIALES PARA LA CONCENTRACIÓN DE FLUJOS DE AGUA QUE RECARGAN EL ACUÍFERO

El factor C tiene en cuenta las características superficiales del acuífero que influyen en como se produce la recarga: concentrada o difusa. Si la recarga es concentrada, la capacidad de protección del acuífero se reduce, mientras que, si la recarga es difusa, la protección del acuífero varía en menor proporción. Este argumento ha sido utilizado en otros métodos de evaluación de la vulnerabilidad como PI (Goldscheider *et al.*, 2000) y EPIK (Doerfliger, 1996), en ambos casos se indican cuales son las zonas donde hay una concentración de flujos en superficie hacia puntos de recarga directa como son las simas o sumideros kársticos. De acuerdo con estos planteamientos, el factor C permite distinguir dos escenarios tipo:

- escenario 1: áreas de una cuenca vertiente a un sumidero que recarga el acuífero
- escenario 2: resto de la zona de estudio: áreas no vertientes a un sumidero

En el primer caso, el agua de escorrentía circula por la superficie hasta alcanzar un sumidero y se caracteriza por ser una zona cubierta por una capa de baja permeabilidad que permite la escorrentía. En el segundo caso, el agua se infiltra en el acuífero favorecida por la presencia de elementos que incrementan la infiltración como la vegetación, las formas kársticas o las zonas llanas.

5.2.5.2.1. ESCENARIO 1: ÁREAS VERTIENTES A UN SUMIDERO

Los parámetros que se emplean para calcular el factor C son: distancia al sumidero (d_h), distancia a los arroyos vertientes al sumidero (d_s), y pendiente y vegetación (sv).

El parámetro d_h establece la distancia a un sumidero en las zonas donde predomine un flujo superficial de saturación y/o hortoniano (cuadro 5.28).

Las zonas que están a menos de 500 m de un sumidero activo tienen un valor de C igual a cero, es decir, la capacidad de protección o atenuación de la contaminación es nula puesto que el agua de la superficie conecta, directamente, con el agua subterránea y los vertidos son transportados sin que los procesos de atenuación de la zona no saturada sean significativos. A medida que aumenta la distancia hacia el sumidero, aumenta la capacidad de protección de

forma lineal como se observa en el cuadro 5.28. En ausencia de flujos superficiales, el valor del parámetro d_h también es igual a uno.

Rangos del parámetro d_h : distancia al sumidero	Valor de d_h
≤ 500 m	0
(500 – 1000]	0,1
(1000 – 1500]	0,2
(1500 – 2000]	0,3
(2000 – 2500]	0,4
(2500 – 3000]	0,5
(3000 – 3500]	0,6
(3500 – 4000]	0,7
(4000 – 4500]	0,8
(4500 – 5000]	0,9
> 5000 m	1

Cuadro 5.28. Valores del parámetro d_h (método COP).

El parámetro relativo a la distancia a los arroyos vertientes a un sumidero (d_s) tiene en cuenta la distancia, medida perpendicularmente, desde un punto cualquiera al arroyo vertiente. Las zonas que están a menos de 10 m del arroyo tienen un valor cero; se asume que el contaminante va a ser transportado por completo. Conforme aumenta la distancia al arroyo, la carga contaminante alcanzará su objetivo, más difícilmente, hasta un punto que se ha estimado en 100 m, de acuerdo con Goldscheider *et al.* (2000). En el cuadro 5.29 se muestra la puntuación asignada al parámetro d_s .

Rangos del parámetro d_s : distancia al sumidero	Valor de d_s
≤ 10 m	0
(10 – 100]	0,5
> 100	1

Cuadro 5.29. Valores del parámetro d_s (método COP).

El parámetro sv (cuadro 5.30), tiene en cuenta la vegetación y la pendiente. La presencia o ausencia de vegetación permanente, con una densidad de cubierta vegetal lo suficientemente elevada como para influir en el régimen de infiltración-escorrentía de forma significativa. La pendiente influye en la generación de escorrentía, de manera que conforme aumenta la pendiente, aumenta la escorrentía y, por tanto, la llegada de aguas superficiales a los sumideros que conectan con las aguas subterráneas.

Pendiente (s) \ Vegetación (v)	≤ 8 %	(8 – 31 %]	(31 – 76 %]	> 76 %
Presente	1	0,95	0,85	0,75
Ausente	1	0,90	0,80	0,75

Cuadro 5.30. Valores del parámetro sv , pendiente (s) y vegetación (v) en un escenario tipo 1 (método COP).

Según estos valores, la menor influencia en la protección tiene lugar en los casos en que la pendiente es superior al 76 %, independientemente, de la cubierta vegetal. En los casos de pendiente intermedia, la presencia o ausencia de vegetación, modifica los valores de sv.

El valor de C, en una cuenca vertiente a un sumidero, se obtiene del producto de los tres parámetros analizados como indica la expresión [5.9]:

$$\text{Factor C} = d_h \cdot d_s \cdot sv \quad [5.9]$$

5.2.5.2.2. ESCENARIO 2: ÁREAS NO VERTIENTES A UN SUMIDERO

En áreas donde la recarga se produce de forma difusa, escenario 2, los parámetros que se emplean para calcular el factor C son la pendiente y la vegetación (sv) y las formas kársticas (sf).

Al igual que sucede en el escenario 1, la pendiente y la vegetación se combinan en un tabla de doble entrada para asignar un valor al parámetro sv (cuadro 5.31). En el escenario 1, la generación de escorrentía es un hecho que aumenta la probabilidad de que el agua fluya hacia el sumidero y la recarga sea directa; sin embargo, en el escenario 2, la generación de escorrentía favorece que el agua discurra hacia fuera del acuífero por lo que la vulnerabilidad decrece.

Pendiente (s) \ Vegetación (v)	≤ 8 %	(8 – 31 %]	(31 – 76 %]	> 76 %
Presente	0,75	0,80	0,90	1
Ausente	0,75	0,85	0,95	1

Cuadro 5.31. Valores del parámetro sv, pendiente (s) y vegetación (v) en un escenario tipo 2 (método COP).

El otro parámetro empleado es el de las formas superficiales (sf), determinado por el grado de desarrollo que presenta el modelado kárstico en superficie (dolinas, lapiaces, uvalas, torcas, etc) y las características de permeabilidad de la capa superficial. Los valores asignados y los rangos establecidos a este parámetro se muestran en el cuadro 5.32.

Geoformas \ Capa superficial	Ausente	Permeable	Impermeable
Karst desarrollado: presencia de dolinas, torcas, lapiaces, etc	0,25	0,5	0,75
Karst en desarrollo o afloramiento superficial afectado por disolución	0,5	0,75	1
Karst por fisuración	0,75	0,75	1
Ausencia de formas kársticas	1	1	1

Cuadro 5.32. Valores del parámetro sf (método COP).

El factor C en un escenario tipo 2 se obtiene a partir del producto de los parámetros sf y sv como muestra la expresión [5.9].

$$\text{Factor C} = sf \cdot sv \quad [5.9]$$

5.2.5.2.3. VALORES Y CLASES DEL FACTOR C

En el cuadro 5.33 se muestran los valores del factor C agrupados en cinco clases que hacen referencia a la reducción de la protección. En un escenario del tipo 1, los valores del factor C varían entre 0 y 1. El valor 0 indica ausencia de protección y el valor 1 que la protección dado por el factor O no se modifica. La diferencia entre los escenarios 1 y 2 radica en que el valor de C, en el escenario 2, nunca llega a ser cero. Por tanto, se asume que en un escenario del tipo 2 siempre se va a producir algún proceso de atenuación de la contaminación.

Valores entre 0 y 0,2 se corresponden, principalmente, con aquellas zonas en las que hay presencia de sumideros o geoformas kársticas donde predomina la infiltración concentrada.

Valores del factor C	Reducción de la protección
(0 – 0,2]	Muy Alta
(0,2 – 0,4]	Alta
(0,4 – 0,6]	Moderada
(0,6 – 0,8]	Baja
(0,8 – 1]	Muy Baja

Cuadro 5.33. Clases del factor C (método COP).

5.2.5.3. FACTOR P: CARACTERÍSTICA DE LA PRECIPITACIÓN

El factor P es un factor que tiene en cuenta al agente que transporta el contaminante hasta el agua subterránea, en este caso el agua de lluvia, mientras que los factores O y C hacen referencia a las características del medio por donde el contaminante es transportado.

El agua de lluvia modifica la capacidad de protección del acuífero a partir de dos variables: cantidad de precipitación (P_Q) e intensidad (P_I). Estas variables reflejan las condiciones de volumen, frecuencia y duración de la precipitación (Daly *et al.*, 2002).

5.2.5.3.1. VARIABLE P_Q : CANTIDAD DE LLUVIA

La variable P_Q hace referencia a la cantidad de agua que podría transportar al contaminante hasta el agua subterránea y que podría diluir el contaminante. El parámetro que se utiliza es la precipitación media de un año húmedo⁴, porque el nivel piezométrico está más próximo a la superficie topográfica y, por tanto, es una situación de mayor vulnerabilidad.

⁴ Un año húmedo es aquel cuya precipitación es un 15 % superior a la media de una serie histórica de precipitaciones.

Los valores asignados a la variable P_Q , muestran una variación de la tendencia a medida que aumenta el volumen de precipitación (cuadro 5.34).

Intervalos de precipitación (mm)	Valor P_Q
> 1600	0,4
(1200 – 1600]	0,3
(800 – 1200]	0,2
(400 – 800]	0,3
≤ 400	0,4

Cuadro 5.34. Valores de la variable P_Q (método COP).

Se ha estimado que a partir de 1200 mm de precipitación, los procesos de dilución en el agua son más importantes que los de transporte, por lo que la protección aumenta (disminuye la vulnerabilidad) al perderse carga contaminante. La dilución es un proceso que ha sido tenido en cuenta por otros autores como Civita y De Maio (1997b) y Goldscheider *et al.* (2000) en los métodos SINTACS y PI, respectivamente. Por encima de 1600 mm de precipitación, la capacidad de protección no se modifica a causa del volumen de precipitación (figura 5.5).

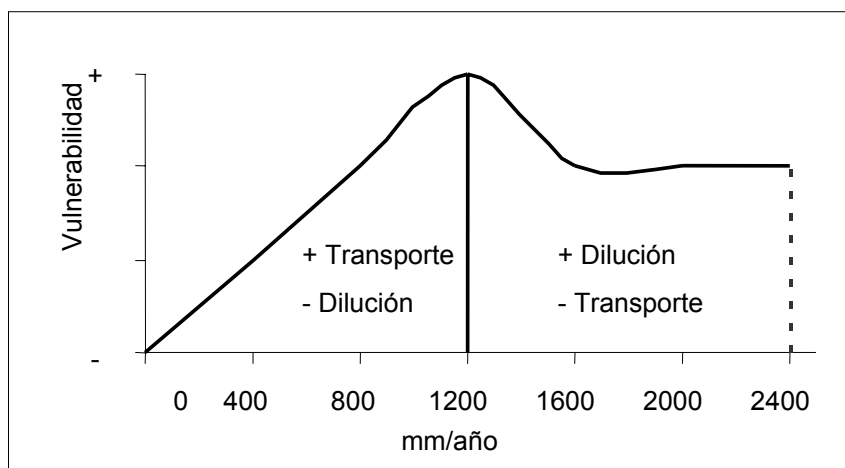


Figura 5.5. Influencia de la precipitación en la vulnerabilidad del acuífero, en función de los procesos de transporte y dilución de los contaminantes y la cantidad de precipitación (método COP).

5.2.5.3.2. VARIABLE P_I : INTENSIDAD

La variable intensidad se estima mediante los parámetros: precipitación media anual y número de días con lluvia, durante un año húmedo en ambos casos. El valor de la variable P_I se obtiene a partir del cociente de los dos parámetros anteriores (expresión matemática 5.10)

$$P_I = \text{precipitación media anual} / \text{número de días con lluvia} \quad [5.10]$$

El resultado del cociente se agrupa en tres clases a las cuales se les asigna un valor de intensidad (cuadro 5.35). La variable P_I permite comparar zonas que tienen unas

características pluviométricas muy diferentes en el ámbito europeo (áreas mediterráneas y Atlánticas).

Los valores asignados a P_1 muestran que al aumentar la intensidad de la precipitación aumenta la recarga y, por tanto, la protección del recurso es menor. En medios kársticos la mayor intensidad de la precipitación facilita una mayor y rápida infiltración a través de las fisuras y conductos kársticos. En zonas donde la intensidad es baja, la infiltración es más lenta y difusa, por lo que la probabilidad de evaporación es mayor y la recarga menor.

Intervalos de intensidad de precipitación (mm/día)	Valor P_1
≤ 10	0,6
(10 – 20]	0,4
> 20	0,2

Cuadro 5.35. Valores de la variable P_1 (método COP).

5.2.5.3.3. VALORES Y CLASES DEL FACTOR P

El valor final del factor P se obtiene de la suma de las dos variables analizadas (expresión 5.11).

$$\text{Factor P} = P_Q + P_1 \quad [5.11]$$

El resultado de la suma varía entre un valor de mínima protección 0,4 y un valor 1 que no establece cambios en la protección asignada al acuífero según el factor O (cuadro 5.36). Los valores del factor P se agrupan en cinco clases que reflejan las variaciones de la capacidad de protección del acuífero.

Valores del factor P	Reducción de la protección
[0,4 – 0,5]	Muy Alta
0,6	Alta
0,7	Moderada
0,8	Baja
[0,9 – 1]	Muy Baja

Cuadro 5.36. Clases del factor P (método COP).

5.2.5.4. ÍNDICE DE VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DEL MÉTODO COP

El índice de vulnerabilidad COP se obtiene como resultado del producto de los tres factores analizados O, C y P (expresión 5.12):

$$\text{Índice COP} = C \cdot O \cdot P \quad [5.12]$$

Los valores del índice COP varían entre 0 y 15 y se han agrupado en cinco clases de vulnerabilidad (cuadro 5.37). Los valores próximos a cero indican máxima vulnerabilidad y los próximos a 15 mínima vulnerabilidad del acuífero. Las clases Muy Alta y Alta recogen la

vulnerabilidad de aquellas zonas en donde la protección del acuífero asignada por el factor O queda modificada por la presencia de condicionantes relativos a los factores C y P.

Intervalos del índice COP	Clases de vulnerabilidad del acuífero
[0 – 0,5]	Muy Alta
(0,5 – 1]	Alta
(1 – 2]	Moderada
(2 – 4]	Baja
(4 – 15]	Muy Baja

Cuadro 5.37. Clases de vulnerabilidad del acuífero según el índice COP.

5.2.6. FACTOR DE EXPOSICIÓN: E_F

Hasta aquí se han descrito los métodos aplicados para evaluar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos. En esta memoria, la vulnerabilidad final de los acuíferos queda definida por la vulnerabilidad intrínseca, la cual podría ser entendida como un factor de resistencia a la contaminación, pero también como un factor dependiente de la cantidad de agua subterránea expuesta a un evento de contaminación.

La exposición establece la importancia de un acuífero respecto de otro. Para estimarlo se ha utilizado el volumen de recursos correspondiente a un año húmedo, es decir, un periodo de mayor cantidad de recursos. Al igual que se hace para la estimación de la vulnerabilidad intrínseca, se ha utilizado un año húmedo por ser representativo de una situación de mayor riesgo, lo que en cierta medida repercute en la necesidad de aumentar la protección de los acuíferos. No se ha tenido en cuenta otro criterio como el volumen de reservas que pudieran explotarse en condiciones de sostenibilidad por la dificultad que conlleva la estimación de dicho parámetro; es un parámetro de los acuíferos que no siempre se conoce.

El factor E_F tiene en cuenta tres posibles valores según los recursos anuales del acuífero (cuadro 5.38). Para establecer los límites de los intervalos se ha consultado el listado de recursos anuales medios sobre los acuíferos de la provincia de Málaga (Machuca (coord.), 1989) y la página web <http://aguas.igme.es/igme/homec.htm> para todos los acuíferos de España. En ambas fuentes se han establecido intervalos regulares a partir de los percentiles 33,33 y 66,66. Los límites que finalmente se han utilizado (cuadro 5.38) son los derivados del listado a escala provincial, tras comprobar que los límites obtenidos para los mismos percentiles, a escala nacional, no difieren de forma notable.

Volumen de recursos (hm ³ /año)	Puntuación (E_F)	Clase de exposición del recurso
(0 – 15]	0,5	Baja
(15 – 30]	0,75	Moderada
> 30	1	Alta

Cuadro 5.38. Clases y valor de exposición (E_F) del acuífero según el volumen de recursos.

Los valores asignados implican que una zona muy vulnerable de un acuífero puede tener una menor influencia en el riesgo si la exposición es Baja, concretamente la mitad. Si la exposición es Alta la vulnerabilidad del acuífero no varía.

5.3. MÉTODO DE EVALUACIÓN Y CARTOGRAFÍA DE LA VULNERABILIDAD DE LA POBLACIÓN Y SUS BIENES (MEDIO HUMANO)

La evaluación y cartografía de la vulnerabilidad de la población y sus bienes se diferencia del resto de componentes del riesgo en las particularidades espaciales asociadas a su evaluación y representación. La diferente referencia espacial de cada uno de los componentes del riesgo, desde un punto de vista integrador en su análisis, es un aspecto recogido por Calvo (2001).

Las consecuencias que se producen por la contaminación del agua subterránea no se ciñen estrictamente a los límites del afloramiento del acuífero y, por tanto, la vulnerabilidad de los elementos afectables excede los límites del mismo. Un ejemplo similar es el riesgo de contaminación de un embalse, donde la afección excede los límites de éste. En cambio, la vulnerabilidad del medio físico y los peligros de contaminación tienen una clara delimitación dentro del ámbito de estudio. El agua subterránea se circunscribe al acuífero, por lo que los peligros que se generan sobre el mismo, en la mayoría de los casos, son los que pueden alterar la calidad de las aguas e, igualmente, la vulnerabilidad del medio físico se refiere al acuífero.

Una primera cuestión a discernir es la delimitación del área de trabajo, es decir, cuál es el espacio en riesgo. La vulnerabilidad del medio físico del acuífero y los peligros de contaminación están circunscritos a la superficie del acuífero, pero la vulnerabilidad del medio humano presenta un problema espacial y de escala. Las consecuencias sobre la sociedad se pueden analizar a distintas escalas (local, municipal, provincial, regional, etc) y, a la vez, la información responde a entidades espaciales diferentes a la del acuífero.

La afección se produce sobre un determinado lugar pero la localización humana se encuentra en un sistema territorial jerarquizado. En este punto hay que valorar la disponibilidad de información para llevar a cabo el análisis. Conforme disminuye la escala territorial se dispone de mayor información para su estudio y a la inversa, cuanto más aumenta la escala de trabajo menor volumen de información está disponible. Paralelamente, hay otro factor que actúa en el sentido de la escala como es la intensidad con que se manifiesta un suceso. Así, cuanto mayor es la escala, las consecuencias de un suceso son más intensas, mientras que a menor escala, los efectos de un evento se disipan y pierden intensidad por la presencia de otros factores. En función de la intensidad con que se manifiesta un evento sobre el territorio y la disponibilidad de información para caracterizar las consecuencias de ese evento, se ha optado por la escala inframunicipal, o en su defecto la municipal, como la mejor solución en la estimación de la vulnerabilidad del medio humano. A escala municipal, las consecuencias de un evento de contaminación tienen una elevada incidencia sobre la economía local y, a su vez, la cantidad de información disponible es lo suficientemente detallada como para abordar el trabajo. La diferenciación entre una escala y otra no es función sólo de la disponibilidad de información, sino también del espacio que se pretenda estudiar, de forma que se puede diferenciar entre social y geográfico (Cutter, 1996b). El espacio social estaría en la línea descrita a partir de las consecuencias a una escala como la regional o nacional. En cambio el espacio geográfico es sobre el que tienen lugar, directamente, las consecuencias del riesgo.

Una vez definido y delimitado el área y la escala de trabajo, la evaluación de la vulnerabilidad del medio humano se ha llevado a cabo, en el presente trabajo, en dos fases. Primero, se ha analizado la vulnerabilidad de cada uno de los elementos expuestos a un evento de contaminación, independientemente, de su localización espacial. Segundo se ha elaborado un índice que recoge, de forma global, la vulnerabilidad de todos los elementos del medio humano expuestos, a partir del cual se evalúa el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas. En cualquier caso, ambas fases de evaluación de la vulnerabilidad del medio humano tienen en cuenta los mismos elementos y factores.

5.3.1. MÉTODO DE ESTIMACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DE LA POBLACIÓN Y SUS BIENES

El método propuesto para evaluar la vulnerabilidad, desde un punto de vista de análisis integrado del riesgo, tiene en cuenta factores de exposición y resistencia de distintos elementos del medio humano: población y actividad económica. La actividad económica se desglosa en dos, actividad agropecuaria y otras actividades productivas, debido a la implicación diferencial que tiene cada una con relación al agua. Los distintos elementos son analizados, en una primera fase, de forma independiente y, posteriormente, se representan de forma sintética en un único mapa de vulnerabilidad del medio humano (epígrafe 5.3.2).

Como regla general se ha utilizado un valor expresado en números absolutos para determinar la exposición de la población y sus bienes y un coeficiente de ponderación en razón de los factores de resistencia. Los valores en que se fundamentan los coeficientes están expresados en términos relativos (tanto por uno, tanto por cien, tanto por mil,...), lo que deja abierta la posibilidad de realizar ajustes en la elaboración del índice de resistencia en función de la disponibilidad y accesibilidad a los datos.

El método planteado, al fundamentarse en valores absolutos de las variables, intenta alejarse de otras técnicas (por ejemplo puntuaciones) comúnmente utilizadas en el análisis de los riesgos, que introducen un mayor grado de subjetividad (Perles y Vías, 2001). En la mayoría de los casos, se ha intentado diseñar un índice de vulnerabilidad de cada elemento del medio humano expuesto sin necesidad de utilizar valores estandarizados o puntuaciones. Esto permite reducir el sesgo producido por las interpretaciones de qué es más o menos vulnerable y por la propia subjetividad implícita en las puntuaciones.

5.3.1.1. VULNERABILIDAD DE LA POBLACIÓN (V_p)

En la evaluación de la vulnerabilidad de la población frente a la contaminación de las aguas subterráneas se han tenido en cuenta factores de exposición y resistencia. La variable utilizada para evaluar la exposición ha sido el número de habitantes dependientes de los recursos hídricos, mientras que como variable de resistencia de esa población se ha utilizado el tipo de infraestructura de abastecimiento y el número de personas especialmente vulnerables en función de la edad. Concretamente los factores son los siguientes:

- factor de exposición de la población (E_p)
- primer factor de resistencia: tipo de infraestructura de abastecimiento (R_{1P})
- segundo factor de resistencia: población especialmente vulnerable (R_{2P})

5.3.1.1.1. FACTOR E_p : POBLACIÓN EXPUESTA

El factor E_p tiene en cuenta la cantidad de habitantes que consumen agua del acuífero y es indicativo del número de personas susceptibles de ser afectadas por un suceso de contaminación. Este es un factor puramente cuantitativo, según el cual, a mayor volumen de población dependiente del recurso, mayor vulnerabilidad humana y, en definitiva, mayor riesgo y necesidad de protección del recurso.

El número de habitantes en cada entidad de población es el parámetro utilizado para medir el factor E_p . El volumen de población expuesto no está relacionado exclusivamente con un tipo concreto de entidad de población. En cada caso, la entidad analizada puede variar en función del tipo de abastecimiento. La utilización de núcleos de población, distritos o secciones censales es una buena unidad de trabajo a gran escala, para la cual hay información disponible sobre el volumen de población y el tipo de abastecimiento utilizado.

5.3.1.1.2. FACTOR R_{1P} : TIPOLOGÍA DE ABASTECIMIENTO

El factor R_{1P} tiene en cuenta la capacidad de resistencia de la población potencialmente afectada por un episodio de contaminación, en función de los sistemas de abastecimiento que se utilicen. Una población se puede abastecer de un recurso hídrico determinado o de varios. Además, cuando el abastecimiento se realiza a partir de un solo recurso, esto no indica que la fuente sea única, sino que se pueden disponer de varias captaciones dentro del mismo acuífero. La contaminación de un pozo o manantial no implica, necesariamente, la contaminación de todo el recurso, de manera que se puede extraer agua desde otro punto que no esté expuesto a la contaminación (figura 5.6).

Se han distinguido tres tipos de infraestructuras de abastecimiento hídrico

- básica: abastecimiento a partir de un punto
- compleja: abastecimiento de agua desde varios puntos de un mismo acuífero
- externa: abastecimiento desde un recurso distinto del acuífero considerado

El esquema de la figura 5.6 es un ejemplo de la infraestructura propia de una empresa de abastecimiento de agua a la población. La existencia de varios sondeos está destinado a asegurar el abastecimiento de agua pero, de forma paralela, puede evitar la llegada de contaminantes a la población desde un punto afectado por vertidos, siempre que las condiciones de bombeo no varíen y modifiquen el flujo del agua.

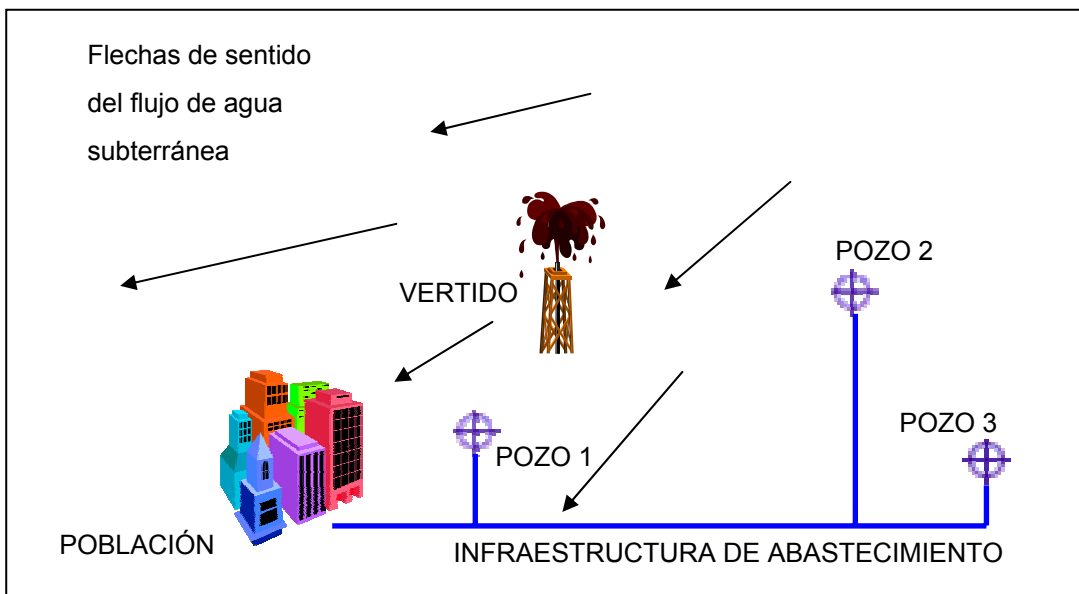


Figura 5.6. Esquema de abastecimiento de una población mediante una infraestructura compleja. En este ejemplo los pozos 2 y 3 estarían fuera del área de dispersión del contaminante y el pozo 1 quedaría afectado por el vertido.

Las distintas combinaciones según el tipo de infraestructura de abastecimiento y el grado de vulnerabilidad humana que implican se muestran en el cuadro 5.39.

Función del acuífero	Tipos de infraestructura de abastecimiento y orden de utilización		Factor R_{1P}	Influencia en la Vulnerabilidad
A	Exclusiva	1. Infraestructura de abastecimiento básica	1	Mayor
B		1. Infraestructura de abastecimiento compleja	0,9	.
C		1. Infraestructura de abastecimiento básica 2. Infraestructura de abastecimiento compleja	0,8	.
D	Complementaria	1. Infraestructura de abastecimiento básica 2. Infraestructura de abastecimiento externa al acuífero	0,6	.
E		1. Infraestructura de abastecimiento compleja 2. Infraestructura de abastecimiento externo al acuífero	0,5	.
F		1. Infraestructura de abastecimiento básica 2. Infraestructura de abastecimiento compleja 3. Infraestructura de abastecimiento externa al acuífero	0,4	.
G	Alternativa	1. Infraestructura de abastecimiento externa al acuífero 2. Infraestructura de abastecimiento básica	0,2	.
H		1. Infraestructura de abastecimiento externa al acuífero 2. Infraestructura de abastecimiento compleja	0,15	.
I		1. Infraestructura de abastecimiento externa al acuífero 2. Infraestructura de abastecimiento compleja 3. Infraestructura de abastecimiento básica	0,1	.
J		1. Infraestructura de abastecimiento externa al acuífero	0,05	Menor

Cuadro 5.39. Factor R_{1P} : Tipos de infraestructuras para abastecimiento.

Las tres funciones que puede desempeñar un acuífero para abastecimiento de la población son: exclusiva, complementaria y alternativa. Exclusiva es cuando el acuífero es la única fuente de abastecimiento (opciones A, B, C, cuadro 5.39). Complementaria se refiere a la situación en la que el agua procede de otros recursos hídricos (embalses, etc) para garantizar el abastecimiento a la población (opciones D, E, F cuadro 5.39). Alternativa es cuando la principal fuente de agua es externa al acuífero, pero hay captaciones en el acuífero que pueden ser utilizadas en caso de necesidad, por ejemplo en periodos de sequía (opciones G, H, I, J cuadro 5.39).

En el cuadro 5.39 también se indica el valor del factor R_{1P} asignado a los tipos de infraestructura de abastecimiento que puede presentar una población. Este coeficiente es un factor de reducción de la vulnerabilidad de la población que varía entre 0,05 y 1. La infraestructura que hace más vulnerable a la población es aquella que depende de única fuente de abastecimiento ubicada en un acuífero, mientras que la situación menos vulnerable es aquella en la que el acuífero sólo es una alternativa de recursos que no se explotan.

5.3.1.1.3. FACTOR R_{2P} : GRUPO DE POBLACIÓN VULNERABLE SEGÚN LA EDAD

La diferenciación de grupos de riesgo según edad, sexo, ocupación laboral, etc. es un hecho común en los estudios sobre epidemias y contagios víricos. En el caso del riesgo de contaminación de aguas subterráneas, como se vio en el epígrafe 4.1.2, la edad es un factor determinante en la facilidad o virulencia con que se propagan y contagian ciertas enfermedades (hepatitis, diarreas, etc). Así lo indican organizaciones nacionales e internacionales dedicadas a la salud de la población (Organización Mundial de la Salud, Ministerio de Sanidad y Consumo).

Para recoger el factor de vulnerabilidad antes citado se ha incluido en el análisis el factor R_{2P} , que hace referencia a los grupos de población, según edad, que tolerarían menos un episodio de contaminación del agua utilizada para abastecimiento. En este sentido, se ha interpretado que los niños y ancianos son los grupos más vulnerables, concretamente los menores de 15 años coincidiendo con el final de la adolescencia (Rey, 1992) y los mayores de 65 años momento en el que comienza el periodo de senilidad baja (Piedrola, 1992). En ambos casos, los umbrales establecidos delimitan cambios físicos en las personas que los hacen más vulnerables frente a enfermedades tóxicas infecciosas.

R_{2P} es un factor de resistencia en sentido estricto, resultado del cociente entre la población más vulnerable y el total de la población, por lo que varía entre 0 y 1. Estos valores teóricos son aplicables en los casos en que se disponga de información detallada de la distribución de la población en el territorio. De este modo, podría darse el caso de analizar entidades donde solo hubiera población vulnerable, o viceversa, donde no haya población vulnerable. A escala municipal, se ha comprobado que este factor no supera fácilmente el valor 0,5 en los municipios de Andalucía, equivalente al 50 % de la población, mientras que a escala regional no se han observado valores superiores 0,4, es decir, el 40% de la población es más vulnerable. Para representar este factor se ha optado por una clasificación de intervalos basada en las variaciones a escala municipal. Los valores del factor R_{2P} se agrupan en cinco intervalos según una progresión aritmética de razón 0,15 (cuadro 5.40).

Factor R_{2P}	Resistencia de la población
[0 – 0,15]	Muy Alta
(0,15 – 0,3]	Alta
(0,3 – 0,45]	Moderada
(0,45- 0,6]	Baja
(0,6-1]	Muy Baja

Cuadro 5.40. Factor R_{2P} : Resistencia de la población según la proporción de grupos de edad vulnerables.

5.3.1.1.4. ÍNDICE DE VULNERABILIDAD DE LA POBLACIÓN (V_P)

El índice de vulnerabilidad se obtiene como resultado del producto del factor de exposición por los factores de resistencia, expresión [5.13]

$$V_P = E_P \times R_{1P} \times \sqrt[3]{R_{2P}} \quad [5.13]$$

La fórmula permite evaluar la vulnerabilidad de la población en función del factor E_P corregido por los factores R_{1P} y R_{2P} . Los factores de resistencia están desarrollados para reducir el factor exposición (E_P : total de población expuesta) en la medida que la población sea más o menos vulnerable. En el caso del factor R_{1P} , la no utilización de un acuífero anularía la dependencia o la vinculación con la población, por lo que la población no sería vulnerable a la contaminación del mismo. En el caso del factor R_{2P} , la presencia de un escaso porcentaje de población vulnerable (por ejemplo un 10 %) reduciría notablemente la vulnerabilidad de la población expuesta y para evitarlo se ha ponderado el factor R_{2P} de forma que no se reduzca demasiado la exposición, ya que cualquier persona es vulnerable. Dado que los valores que se obtienen del factor R_{2P} varían entre 0 y 1, el método de ponderación utilizado han sido raíces matemáticas que equivalen a una reducción no lineal de la exposición. En concreto se ha utilizado la raíz cúbica, de manera que como máximo se reduce la exposición a la mitad (aproximadamente).

El resultado final del índice V_P es un valor cuyo límite inferior tiende a cero y el límite superior es abierto en función del número de personas que habitan una entidad de población. La clasificación final del índice de vulnerabilidad de la población para su representación cartográfica se muestra en el cuadro 5.41.

Intervalos del índice V_P	Vulnerabilidad de la población (V_P)
[0 - 500]	Muy Baja
(500 - 5000]	Baja
(5000 - 15000]	Moderada
(15000 - 50000]	Alta
> 50000	Muy Alta

Cuadro 5.41. Índice y clases de vulnerabilidad de la población V_P .

Las características de estructura por edad y tipo de abastecimiento hídrico son cualidades que habitualmente están asociadas al tipo de asentamiento en el que se localiza la población, a

la hora de elegir los intervalos de representación de la vulnerabilidad de la población, se han tomado como guía de referencia valores representativos de la jerarquía habitual de un sistema de ciudades. Como límite superior de estos intervalos se ha utilizado el valor de 50000 habitantes, por entender que un volumen de población de ese calibre posee la entidad suficiente como para considerar muy alta la vulnerabilidad. Los intervalos están pensados, preferentemente, para diferenciar situaciones de vulnerabilidad en asentamientos pequeños y medianos, que son casos frecuentes, sobre todo, si se tiene en cuenta que en pocas ocasiones una población superior a 50000 habitantes depende de un solo acuífero.

5.3.1.2. VULNERABILIDAD DE LOS BIENES DE LA POBLACIÓN: ACTIVIDADES PRODUCTIVAS

5.3.1.2.1. VULNERABILIDAD DE LA ACTIVIDAD AGROPECUARIA (V_{AG})

La estimación de la vulnerabilidad de la actividad agropecuaria se ha realizado, al igual que en el caso de la población, a partir de factores de exposición y resistencia. Los factores utilizados son:

- factor de exposición de la actividad agropecuaria (E_{AG})
- primer factor de resistencia. Tipo de infraestructura de abastecimiento (R_{1AG})
- segundo factor de resistencia. Rentabilidad socioeconómica (R_{2AG})

5.3.1.2.1.1. FACTOR E_{AG} : EXPOSICIÓN DE LA ACTIVIDAD AGROPECUARIA

La exposición de la actividad agropecuaria está referida a la superficie regada de cada tipo de cultivo y al tamaño de la cabaña ganadera, según se analice una actividad u otra. Como unidades de medida se utilizan la hectárea de cultivo y la unidad ganadera⁵ por ser las más representativas y utilizadas para cada tipo de actividad.

El factor de exposición se tiene en cuenta para cada tipo de cultivo y de ganado, dado que la rentabilidad socioeconómica de cada uno de estos productos es distinta. Por tanto, el tipo de cultivo o de ganado a considerar es aquel para el que se dispone de datos de productividad económica y empleos dependientes. Así, se podría diferenciar la vulnerabilidad de las hectáreas donde se cultivan limones respecto de las tierras donde se cultivan naranjas, o de una forma menos detallada las parcelas con cítricos frente a las tierras con productos hortícolas. Del mismo modo, en el caso de la ganadería, se podría diferenciar entre especies de un mismo tipo de ganado (frisonas y retintas dentro del ganado vacuno) o entre tipos de ganado (bovino y ovino). El nivel de detalle dependerá de la información disponible

⁵ Unidad Ganadera (censo agrario, 1999): unidad de medida que expresa el número de animales de una cabaña ganadera, con distintos tipos de animales. Para ello se aplica un coeficiente que varía según el tipo de ganado y se suele emplear para agregar en una unidad común diferentes especies.

5.3.1.2.1.2. FACTOR R_{1AG} : TIPO DE INFRAESTRUCTURA DE ABASTECIMIENTO

Este factor responde al mismo esquema planteado para el factor R_{1P} , es decir, según el tipo de infraestructura de abastecimiento se puede reducir la exposición y, con ello la vulnerabilidad. Los valores utilizados para este factor son los que se muestran en el cuadro 5.39.

5.3.1.2.1.3. FACTOR R_{2AG} : RENTABILIDAD SOCIOECONÓMICA DE LA ACTIVIDAD AGROPECUARIA

El factor R_{2AG} es indicativo de la vulnerabilidad de la actividad agropecuaria desde un punto de vista económico y social. De este modo, las consecuencias de un evento de contaminación son más importantes, si afectan a sectores muy rentables y/o claves para la generación de empleo. En función de los precios de mercado se obtiene un valor de rentabilidad económica de la producción agrícola y ganadera, mientras que la rentabilidad social se estima a partir de mano de obra necesaria para sacar adelante la producción agrícola.

La rentabilidad económica se ha estimado a partir de la productividad de un cultivo (kg/ha) multiplicada por el precio del kg de ese producto (€/kg) y se expresa como €/ha. Una característica a tener en cuenta a la hora de analizar la producción es la fuerte influencia de aspectos externos, ajenos a la dinámica "normal" del aprovechamiento agropecuario. Las desviaciones propias de las incidencias climáticas, enfermedades, plagas, etc son elementos que pueden mermar la producción o aumentarla en el caso de condiciones climáticas muy favorables. Por ello, la clasificación utilizada para mostrar las variaciones espaciales de la producción ha sido elaborada a partir de valores de productividad estándar, sujetos a una situación media.

Como indicador de la rentabilidad social se ha utilizado el número de empleos. En el caso de la agricultura, los empleos se estiman mediante los jornales. Un jornal puede ser definido como el número de días necesarios para que una persona saque adelante la producción de un cultivo o, también, puede expresar el número de personas necesarias para obtener una producción determinada en un día.

El factor final de rentabilidad socioeconómica es el resultado de la expresión [5.14]

$$R_{2AG} = (\epsilon) \times (1 + (j/500)) \quad [5.14]$$

€ hace referencia al precio del producto en el mercado, precio obtenido por hectárea de cultivo o por unidad ganadera y j son los jornales por hectárea o empleos por explotación ganadera, según sea el caso. El valor 500 de la expresión 5.14 es una constante obtenida en función del número máximo de jornales observado en Andalucía para los distintos tipos de cultivo, según los datos de la empresa pública para el Desarrollo Agrícola y Pesquero de Andalucía (DAP, 1997). Los valores del factor R_{2AG} se han agrupado en cinco clases como muestra el cuadro 5.42. Los intervalos utilizados indican, en cierta medida, los beneficios (€) que una hectárea puede generar, como mínimo; es decir, en ausencia de jornaleros. Así, conforme aumente el número de jornales, aumentará el índice R_{2AG} .

Valores del factor R_{2AG}	Clase del factor R_{2AG} (rentabilidad)
≤ 5000	Muy Baja
5000 – 10000	Baja
10000 – 15000	Moderada
15000 – 20000	Alta
> 20000	Muy Alta

Cuadro 5.42. Factor R_{2AG} : Vulnerabilidad de la actividad agropecuaria.

5.3.1.2.1.4. ÍNDICE DE VULNERABILIDAD DE LA ACTIVIDAD AGROPECUARIA (V_{AG})

La unidad espacial de referencia para el cálculo del índice de vulnerabilidad de la actividad agropecuaria es la superficie de cultivo según tipo de abastecimiento o, en su caso, la localización de la explotación ganadera. El índice final de vulnerabilidad de la actividad agrícola y ganadera se obtiene de la siguiente expresión [5.15]:

$$V_{AG} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{AG} \times R_{1AG} \times R_{2AG}}{10000} \quad [5.15]$$

donde i equivale a cada uno de los cultivos de una zona de regadío, según el tipo de abastecimiento. La sumatoria recoge las características de cada zona de regadío o explotación ganadera en cuanto a tipo de cultivo o ganado, número de empleos, beneficios generados y tipo de abastecimiento que se utiliza en las explotaciones agropecuarias. Así, se intenta reflejar los conceptos de impacto económico, social y dependencia de la actividad agropecuaria respecto del agua subterránea potencialmente contaminable. Por último, se introduce una constante, igual a 10000, para obtener unos valores finales del índice de fácil lectura y comparación (de lo contrario estaría expresados en millones) que, a su vez, podrían ser representativos de las hectáreas y/o unidades ganaderas expuestas. El índice V_{AG} se clasifica en cinco intervalos para su representación cartográfica mediante una progresión geométrica de razón 2 (cuadro 5.43).

Valores del factor V_{AG} Actividad agropecuaria	Clase de vulnerabilidad
≤ 125	Muy Baja
125 – 250	Baja
250 – 500	Moderada
500 – 1000	Alta
> 1000	Muy Alta

Cuadro 5.43. Índice y clases de vulnerabilidad de la actividad agropecuaria V_{AG} .

5.3.1.2.2. VULNERABILIDAD DE OTRAS ACTIVIDADES PRODUCTIVAS (V_{ST})

El último factor en el cálculo de la vulnerabilidad del medio humano está relacionado con el resto de actividades productivas dependientes de los recursos hídricos subterráneos. Al igual que para los otros elementos del medio humano, se ha estimado a partir de factores de exposición y resistencia:

- E_{ST} o exposición de la actividad productiva
- R_{1ST} o tipo de infraestructura de abastecimiento
- R_{2ST} o rentabilidad socioeconómica

El factor E_{ST} hace referencia al número de locales cuyo funcionamiento depende del uso de agua y el factor R_{1ST} al tipo de abastecimiento de las actividades cuya producción necesita del uso del agua en los mismos términos que los expresados en el cuadro 5.39.

El factor R_{2ST} , relacionado con la rentabilidad socioeconómica de las actividades productivas, es una cuestión complicada a la hora de discernir, sobre todo, el hecho de evaluar donde repercuten los beneficios económicos. Una empresa puede tener varias sedes (productiva, jurídica, comercial) y cada una de ellas situada en un lugar diferente. La sede central o jurídica puede localizarse en una metrópolis, la sede productiva en un país donde los salarios sean bajos, de forma que la empresa no tenga costes de producción elevados, y la sede de distribución en una ciudad de alto poder adquisitivo donde se puedan obtener grandes plusvalías. Por tanto, puede haber diferentes localizaciones espaciales en relación con lo puestos de trabajo directos que se derivan de una empresa. En el momento que entran en funcionamiento los empleos indirectos la cuestión se complica aún más.

Frente a esta dispersión de beneficios económicos derivados de la función productiva de una empresa, se ha considerado que lo más relacionado con el tema de las aguas subterráneas es el beneficio económico que repercute en la población donde se localiza el recurso hídrico, es decir, los ingresos obtenidos por los trabajadores. Si se considera el ejemplo de la actividad turística en la Costa del Sol, donde se localiza el acuífero de la sierra de Mijas, los beneficios del turismo exceden las fronteras nacionales pues hay una gran cantidad de touroperadores y agencias de viejas internacionales que ofrecen la Costa del Sol como destino turístico. Si la actividad turística disminuyera por cualquier razón, la repercusión local sería muy fuerte, pero repercutiría también en el extranjero. Como este último aspecto no se puede manejar a la escala del presente trabajo, se ha optado por analizar la repercusión sobre la economía local, pero no teniendo en cuenta los beneficios a la empresa sino los beneficios de la comunidad a través de los salarios profesionales. Esto permite una adscripción directa al territorio donde se localiza el agua subterránea y centraliza el estudio a un único ámbito espacial (municipal).

Los parámetros utilizados para calcular el factor R_{2ST} son: el número de empleados, según categoría profesional, para cada rama de actividad productiva y el salario medio de cada empleado ocupado en una actividad productiva dependiente (en alguna medida) de los recursos hídricos subterráneos, según su formación profesional. Los valores del factor se obtienen mediante la expresión anterior [5.15], donde € hace referencia a la suma de los

salarios recibidos por cada trabajador de la empresa y j al número de empleados en la actividad. Al igual que el índice R_{2AG} desarrollado para la actividad agropecuaria, R_{2ST} utiliza la constante 500 en el denominador como una cifra estimativa de un elevado número de empleos en una empresa.

El índice de vulnerabilidad de las actividades productivas no relacionadas con el sector agropecuario se obtiene del producto de los tres factores utilizados, mediante la expresión [5.16],

$$V_{ST} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{ST} \times R_{1ST} \times R_{2ST}}{10000} \quad [5.16]$$

donde i equivale a cada una de las actividades productivas dependientes del acuífero de una determinada zona según el tipo de abastecimiento. La sumatoria recoge las características de cada zona diferenciada en función del tipo de servicio prestado, salarios percibidos por los empleados y tipo de abastecimiento hídrico que tienen los locales, lo cual refleja la repercusión socioeconómica de un posible evento de contaminación y el nivel de dependencia respecto del recurso hídrico subterráneo. Los intervalos del índice V_{ST} son iguales que los del factor V_{AG} (cuadro 5.43), en ambos casos actividades productivas, dado que los intervalos muestran una buena discriminación espacial y reflejan de forma acertada la cantidad de locales expuestos, frente a un evento de contaminación, a la escala finalmente utilizada (municipal).

5.3.2. MÉTODO DE ESTIMACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DEL MEDIO HUMANO. ÍNDICE V_H

La técnica empleada en la cartografía de riesgo es la superposición espacial de los distintos componentes mediante un Sistema de Información Geográfica. Como se ha citado anteriormente (epígrafe 5.3), los componentes de peligrosidad y vulnerabilidad del medio físico del acuífero poseen una adscripción espacial analítica y circunscrita, esencialmente, al área del acuífero. Sin embargo, éste no es el caso de la vulnerabilidad del medio humano, ya que los elementos expuestos pueden localizarse en posiciones diversas respecto al agua subterránea. Este hecho provoca el que no se pueda emplear la superposición espacial de forma directa, porque los distintos componentes no se solapan en el espacio. Por este motivo, para determinar la vulnerabilidad del medio humano, ha sido necesario diseñar un índice que recoja la susceptibilidad de todos los elementos del medio humano expuestos, específico para el cálculo del riesgo y que se adapte a esta particularidad. Se ha creado un índice que asigna un valor semicuantitativo a todo el acuífero, o a sectores específicos del mismo cuando se dispone de esa información, lo cual permite superponer el mapa de vulnerabilidad del medio humano, con el de la vulnerabilidad del acuífero y el de los peligros.

Los factores que se tienen en cuenta a la hora de realizar la estimación de la vulnerabilidad del medio humano están relacionados con la exposición y resistencia descritos en el epígrafe 5.3.1. En función de esos factores se ha elaborado un índice, adimensional, que se asigna al

recurso hídrico y que permite realizar la superposición cartográfica con los otros componentes del riesgo.

La vulnerabilidad del medio humano es el resultado de la vulnerabilidad de la población, (factor V_P) y de la actividad productiva (factores V_{AG} y V_{ST}) dependientes de los recursos hídricos subterráneos.

El objetivo planteado en este epígrafe es obtener un índice de vulnerabilidad que aglutine todos los elementos del medio humano vulnerables frente al riesgo de contaminación. La diferencia respecto a los índices de vulnerabilidad de cada elemento del medio humano elaborado anteriormente es el referente espacial utilizado. En el análisis de la vulnerabilidad de cada elemento del medio humano analizado individualmente (epígrafes 5.3.1.1 y 5.3.1.2) se ha utilizado como unidad espacial de referencia la entidad poblacional, la superficie de cultivo o unidad ganadera y la localización de la actividad productiva. En la evaluación conjunta de la vulnerabilidad del medio humano, la referencia espacial utilizada es el acuífero. Para ello se han seguido tres pasos:

1. Suma de los índices de vulnerabilidad de cada elemento del medio humano (V_P , V_{AG} y V_{ST}), como indica la expresión [5.17].

$$V_i = \sum_1^n (E_i \times R_{1i} \times R_{2i}) \quad [5.17]$$

donde V_i es el valor de vulnerabilidad del elemento i (población, actividad agropecuaria y empresarial), E_i es el volumen de efectivos expuestos del elemento i , R_{1i} y R_{2i} son los factores de resistencia del elemento i y n es el número total de entidades cartográficas necesarias para representar cada elemento del medio humano.

2. Tras la suma de todos los efectivos vulnerables de cada elemento del medio humano analizado (población y actividades productivas) los valores de cada índice parcial se modifican como muestra el cuadro 5.44 para unificar las diferentes unidades de medida. De esta manera, los valores de vulnerabilidad de cada elemento del medio humano varían entre 1 y 5.

Valores de V_P	Valores de V_{AG} y V_{ST}	Valores de V_P , V_{AG} y V_{ST}	Clases de vulnerabilidad de la población y sus bienes
[0 - 500]	[0 - 125]	1	Muy Baja
(500 - 5000]	(125 - 250]	2	Baja
(5000 - 15000]	(250 - 500]	3	Moderada
(15000 - 50000]	(500 - 1000]	4	Alta
> 50000	> 1000	5	Muy Alta

Cuadro 5.44. Valores y clases de vulnerabilidad de la población asignadas al acuífero.

3. El índice de vulnerabilidad del medio humano es el resultado de la suma ponderada de los tres índices de vulnerabilidad parcial referidos a la población y a las actividades productivas, de acuerdo con la expresión [5.18]. Los valores de cada índice parcial son los valores normalizados a partir de las nuevas clases elaboradas en el cuadro 5.44.

$$V_H = (V_P' \times 3) + (V_{AG}' \times 2) + V_{ST}' \quad [5.18]$$

El resultado de la fórmula anterior es un valor entero que varía entre un mínimo de 1 y un máximo de 30 y se agrupa en cinco intervalos regulares (cuadro 5.45) para representar el mapa de vulnerabilidad de la población y sus bienes, dado que el histograma de frecuencias de las 140 combinaciones posibles muestran una distribución normal de los datos.

Valores de V_H	Clases de vulnerabilidad del medio humano (V_H) del acuífero
(0 - 6]	Muy Baja
(6 - 12]	Baja
(12 - 18]	Moderada
(18 - 24]	Alta
(24 - 30]	Muy Alta

Cuadro 5.45. Valores y clases de vulnerabilidad del medio humano asignados al acuífero.

6. MÉTODO DE ESTIMACIÓN Y CARTOGRAFÍA DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

6.1. ÍNDICE DE ESTIMACIÓN DEL RIESGO

El conjunto de componentes y factores utilizados para evaluar el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas se muestran de forma resumida en la figura 6.1.

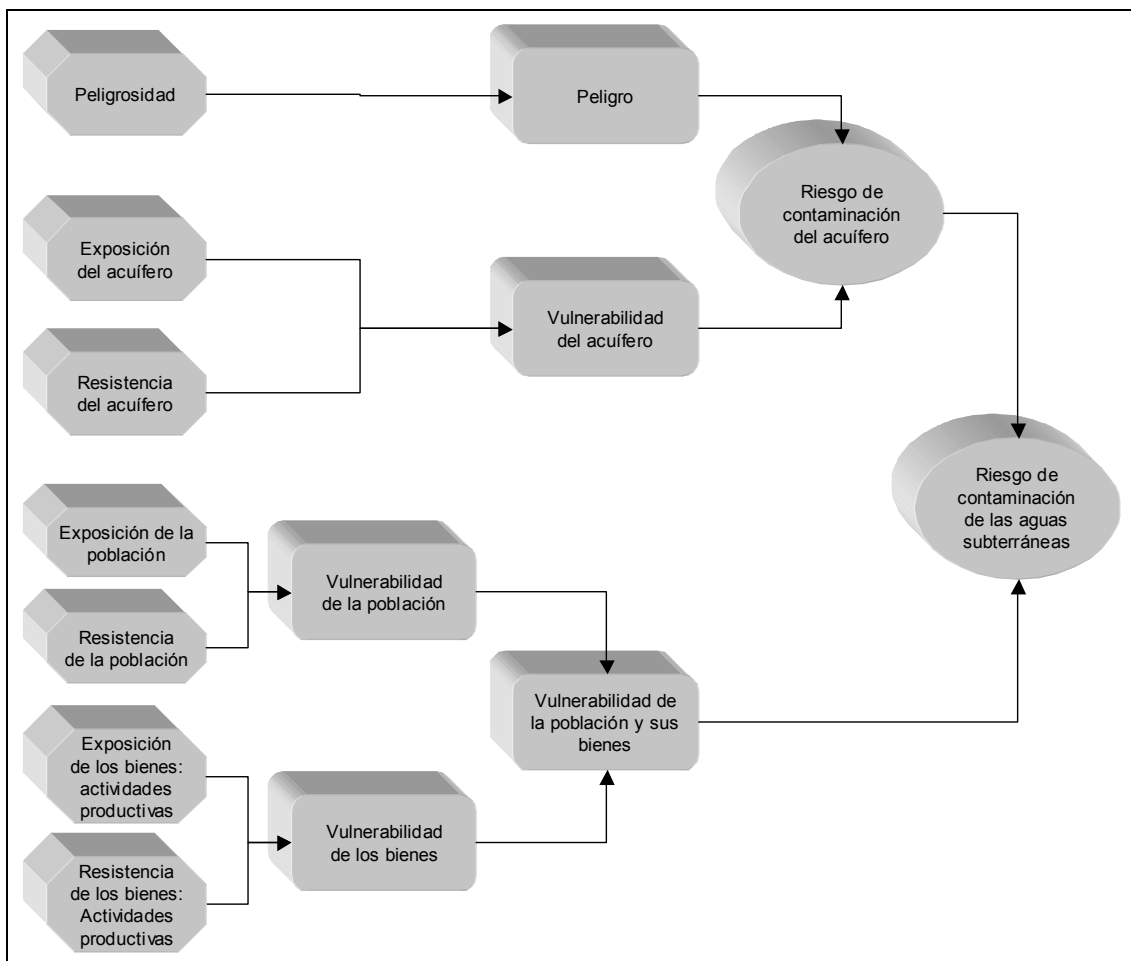


Figura 6.1. Factores y componentes empleados en el índice de riesgo de contaminación de las aguas subterráneas.

El riesgo, en general, y el de contaminación de aguas subterráneas, en particular, tienen diferentes referencias espaciales, según se tengan en cuenta los territorios en riesgo, espacios de catástrofe, o el ámbito de los grupos sociales implicados en el riesgo o vulnerabilidad (Calvo 2001). Estos referentes espaciales se relacionan con cada uno de los componentes del riesgo analizados, de manera que los peligros, la vulnerabilidad del acuífero y la vulnerabilidad de los elementos del medio humano dependiente de los recursos del acuífero, no tienen por qué solaparse en el territorio.

Por ejemplo, la población dependiente del agua subterránea puede tener una localización no coincidente con las actividades que potencialmente pueden contaminar el acuífero o con la extensión de la masa de agua. La no superposición de los componentes del riesgo requiere asignar parámetros de cada uno de ellos a un referente común. Este referente territorial común a todos ellos puede ser, según el receptor del peligro, el agua subterránea o el elemento del medio humano dependiente del recurso, por ejemplo, un campo de cultivo o la población. En el caso de que exista coincidencia espacial de los componentes del riesgo (ciudad A en la figura 6.2), el resultado final de la superposición cartográfica podría no representar un valor real de riesgo puesto que, en ese punto de solapamiento, el agua podría no ser parte del área de recarga de la fuente de abastecimiento.

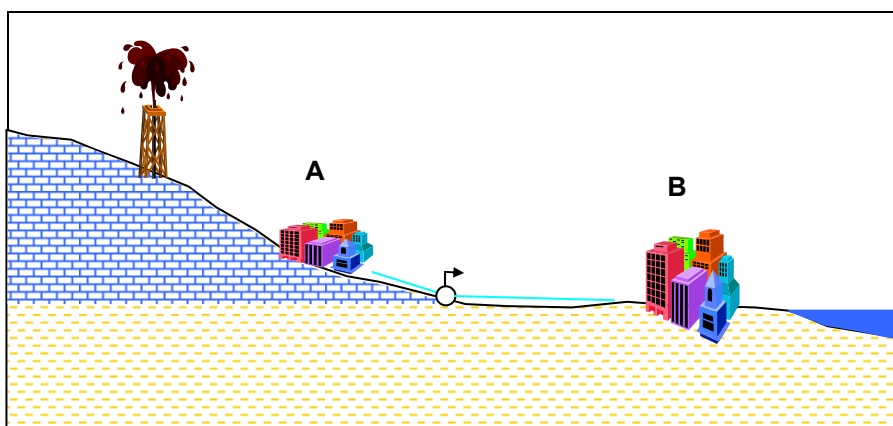


Figura 6.2. Ejemplo de localización espacial de elementos que intervienen en el riesgo de contaminación.

Uno de los objetivos de la cartografía de riesgo de contaminación de las aguas subterráneas es la gestión y ordenación del territorio basada en el principio de sostenibilidad. En este caso, los recursos hídricos subterráneos son los elementos del medio que necesitan ser gestionados correctamente, por tanto, su cartografía necesita ir referida a los acuíferos. Esto elimina la posibilidad de utilizar como referente espacial, en el mapa final de riesgo, los elementos del medio humano, porque lo que se persigue es la mejor gestión del recurso natural.

Si el referente común es el acuífero y puesto que los peligros, normalmente, sí presentan una coincidencia espacial en el análisis del riesgo, la vulnerabilidad del medio humano debería relacionarse con las áreas de recarga de los puntos de agua que se utilizan para abastecimiento (ciudad B en la figura 6.2). El área de recarga tendría así un valor según la vulnerabilidad del medio humano y, a su vez, el acuífero presentaría unas características de capacidad atenuación (vulnerabilidad intrínseca) y peligrosidad de los contaminantes derivados de la actividad humana.

La delimitación de las áreas de recarga de las fuentes de abastecimiento presenta grandes limitaciones, en general, derivadas de la falta de datos hidrogeológicos. Además, las áreas de recarga de los puntos de agua son variables en función de las modificaciones de la cota piezométrica, a causa de la precipitación (lo cual depende de circunstancias ajenas a la influencia del hombre) de la intensidad de la explotación (según la demanda de agua en cada época del año) o de la puesta en funcionamiento de otros puntos de explotación, elementos

todos ellos que introducen variabilidad en el concepto de área de recarga y que limitan su utilización con vistas a una catalogación del territorio permanente en el tiempo.

El procedimiento utilizado, en este trabajo, para la cartografía del riesgo ha consistido en utilizar un índice de vulnerabilidad del medio humano genérico para el conjunto del acuífero (fórmula 5.18), combinado con el resto de componentes del riesgo de contaminación: peligro y vulnerabilidad del acuífero, según la expresión [6.1]. La fórmula utilizada deriva de la propuesta por Varnes (1984), según la cual el riesgo es función de la exposición, la vulnerabilidad y el peligro. En la fórmula [6.1], la exposición queda implícita en el cálculo de la vulnerabilidad del medio humano y se añade una componente más relacionada con la vulnerabilidad del acuífero que igualmente recoge el grado de exposición de los recursos hídricos.

$$\text{Riesgo} = P' \times V_F' \times V_H \quad [6.1]$$

donde P' es el peligro de contaminación normalizado entre 0 y 100 (resultado de normalizar este factor y multiplicarlo por 100), V_F' es la vulnerabilidad intrínseca del acuífero (V_F) normalizada entre 0 y 1 y multiplicada por el factor de exposición E_F y V_H es la vulnerabilidad del medio humano. La normalización de los valores de cada componente se debe a que éstos pueden variar en función del método utilizado. De esta manera, se puede controlar el rango de variación del índice final de riesgo y establecer una clasificación del mismo. El método de normalización utilizado es el propuesto por Voogd (1983), expresión [6.2], que mantiene el orden relativo de los valores y la proporcionalidad de los mismos.

$$\text{Variable normalizada} = \frac{X_i}{\text{máximo } x_i} \quad [6.2]$$

El resultado de la fórmula [6.1] es un índice que varía entre 0 y 3000 y se clasifica en cinco intervalos irregulares (cuadro 6.1). El método de clasificación del índice es el utilizado por Hötzl *et al.* (2004) y Andreo *et al.* (2004), que consiste en utilizar cinco intervalos cuyos límites se obtienen como el producto de los límites de los intervalos de cada componente del riesgo para cada clase.

Índice de riesgo	Clase de riesgo
(0 – 24]	Muy Bajo
(24 – 192]	Bajo
(192 – 648]	Moderado
(648 – 1536]	Alto
(1536 – 3000]	Muy Alto

Cuadro 6.1. Índice y clases de riesgo de contaminación de las aguas subterráneas.

Este método de clasificación utilizado (cuadro 6.1) intenta reducir el sesgo derivado de una clasificación regular del índice. La distribución de los valores del índice es asimétrica (figura 6.3 izquierda) y una clasificación en cinco intervalos regulares presentaría una elevada frecuencia en las clases de bajo riesgo y una escasa discriminación espacial.

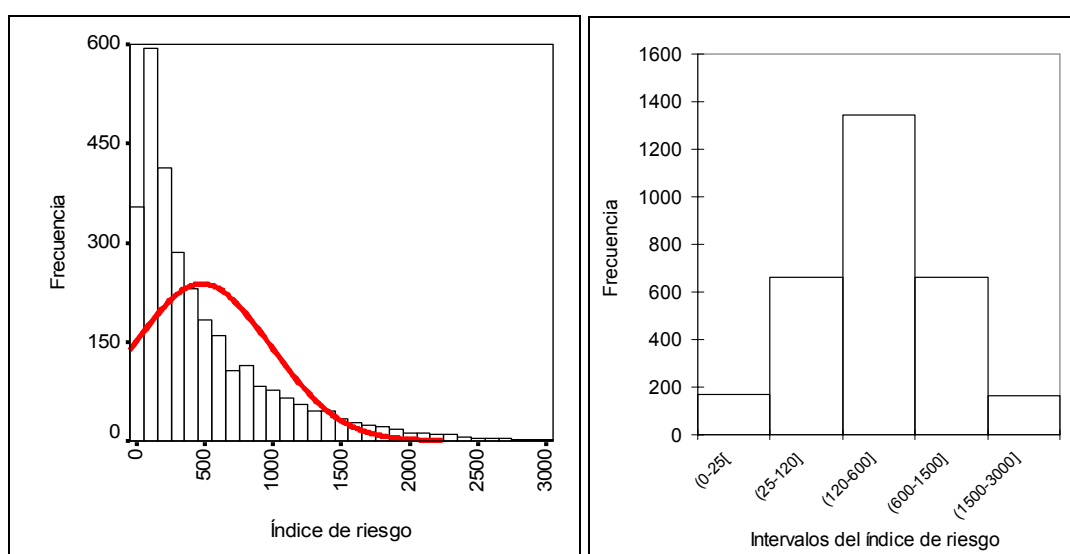


Figura 6.3. Distribución de los valores del índice de riesgo (izquierda) y distribución normal de las frecuencias (derecha).

Si se establece la leyenda a partir de una distribución normal de la frecuencia de los datos (figura 6.3 derecha) el mapa mostraría aquellos puntos de los acuíferos con variaciones respecto de una situación normal. Los valores del índice de riesgo (cuadro 6.1) se encuentran bastante próximos a los intervalos utilizados en la figura 6.3 (derecha) que muestra una distribución normal de las frecuencias.

6.2. CARTOGRAFÍA DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

En la cartografía del riesgo se pueden diferenciar tres niveles de análisis según el objeto y propósito del estudio (Perles *et al.*, 2004). Cada uno de estos niveles representa un eslabón secuencial y jerarquizado para el estudio completo del riesgo. En función del nivel de análisis se está en disposición de cumplir con un objetivo u otro. Para ello, previamente es necesario sentar las bases del problema, es decir, realizar correctamente las preguntas para dar respuestas eficaces.

Un primer nivel de evaluación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas es la evaluación de la vulnerabilidad del acuífero. La vulnerabilidad del acuífero (V_F) es un factor de resistencia del medio natural que recoge la capacidad de absorción de la catástrofe, es decir, tiene en cuenta la capacidad de protección natural frente a los contaminantes. En la medida que aumenta la heterogeneidad del acuífero aumenta la diferenciación espacial de la vulnerabilidad, aspecto sustancial en la toma de decisiones de cómo se debe distribuir el hombre en el territorio. El conocimiento de los sectores más susceptibles del acuífero frente a un suceso de contaminación, o cuando menos, las zonas del acuífero donde se detectarán con mayor celeridad signos de contaminación del recurso, facilita y posibilita el correcto uso del territorio desde un punto de vista de la sostenibilidad del medio.

Un segundo nivel deriva de aquellas situaciones en que la actividad desarrollada por el hombre puede generar un impacto negativo sobre el acuífero. Este nivel de análisis presenta mayor complejidad que el anterior pues necesita, junto a la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero, el análisis de los peligros de contaminación o actividades que potencialmente pueden provocar una catástrofe en las aguas subterráneas. La combinación mediante superposición cartográfica de los dos componentes del riesgo mencionados, peligros (P) y vulnerabilidad del acuífero (V_F), permiten evaluar el impacto negativo que puede generar la actividad humana sobre el medio natural. En este nivel, la cuestión es discernir, una vez que se ha aprobado el uso del territorio, qué actividad o grupo de actividades puede llevarse a cabo con mayores garantías de sostenibilidad. La actividad humana incide sobre el territorio con distinto grado de afectación en función de los compuestos utilizados en el proceso de producción, de manera que, según el tipo de sustancia y la nocividad de la misma, el medio tiene mayor capacidad de absorber el impacto. En esta línea, una tendencia que ha surgido recientemente, analiza la vulnerabilidad para cada tipo de contaminante y no bajo el supuesto de un contaminante estándar o universal. La vulnerabilidad del medio natural para cada tipo de contaminante, también denominada vulnerabilidad específica (Daly *et al.*, 2002), responde a características de diversa consideración y necesita de un análisis más complejo que la vulnerabilidad intrínseca, por lo que se encuentra lejos de ser una herramienta eficaz, sobre todo teniendo en cuenta que se basa en la vulnerabilidad intrínseca del acuífero (Sinreich *et al.*, 2004). Este segundo nivel de análisis puede ayudar a estimar las consecuencias que sobre el acuífero puede provocar una actividad en un futuro (Foster y Hirata, 1988).

El tercer nivel aborda la evaluación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas como fenómeno de repercusiones negativas en la sociedad. Este nivel de análisis es el de mayor complejidad pues tiene en cuenta los tres componentes del riesgo: peligros (P), vulnerabilidad del acuífero (V_F) y vulnerabilidad humana (V_H). Al incluir la vulnerabilidad del medio humano como una componente del riesgo, lo que se está analizando es dónde y en qué grado hay riesgo para la población y sus bienes si se contamina el agua subterránea. Como se decía al principio del capítulo, se trata de un aspecto temporal relacionado con la situación de una sociedad determinada en un momento concreto. En este nivel, el riesgo de contaminación es función, entre otras variables, del volumen de población dependiente del recurso y de los beneficios económicos derivados del uso del agua. Estos dos factores son extremadamente variables en el tiempo, de manera que el grado de riesgo que presente una sociedad en un momento dado no tiene por qué corresponderse con la situación que presentará frente al mismo riesgo al cabo de un tiempo. El riesgo de una sociedad en un momento dado, permite establecer las pautas de conducta que deben ser modificadas para mejorar el estado y calidad de vida pues, al estar en riesgo, presentan claras opciones de quedar mermadas por el evento extremo.

El tercer nivel muestra, indirectamente, en qué medida la sociedad se enfrenta al riesgo. De acuerdo con Ewald (2000), el hombre se caracteriza por vivir en riesgo pero, en la gran mayoría de los casos, no tiene conocimiento o no es consciente de ello, o cuando menos en qué grado se arriesga. También se puede interpretar el análisis de este tercer nivel como indicativo de la conducta de una sociedad frente a un evento determinado. Analizado desde el punto de vista de la racionalidad, un resultado favorable, es decir, el que no haya riesgo, es indicativo de la sostenibilidad o de la racionalidad de una sociedad determinada y de su

integración con el medio que le rodea. Una sociedad que no vive de espaldas al territorio hace frente a una catástrofe de forma efectiva y segura respecto de una sociedad donde el abandono es su seña de identidad.

Los mapas del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas tienen una utilidad diferenciada, cuando el objetivo de la cartografía es la gestión del mismo. De esta forma, en función de las medidas a adoptar para gestionar el riesgo se pueden establecer distintos criterios de utilidad de cada mapa de riesgo.

La gestión del riesgo mediante el empleo de medidas preventivas puede realizarse a partir de la ordenación del territorio, para lo cual cada componente y combinación de componentes del riesgo tendría una función. El mapa de vulnerabilidad del medio físico definiría las zonas que en mayor medida se deben tener en cuenta para la protección del recurso hídrico subterráneo. El mapa de peligro indicaría las zonas del medio natural susceptibles de sufrir un evento de contaminación. El mapa de vulnerabilidad del medio humano determinaría cuáles son los acuíferos donde la presión sobre el medio determina una actuación prioritaria.

La implantación de medidas preventivas de carácter estructural necesitaría del mapa de peligro o del mapa de vulnerabilidad del medio humano. Por ejemplo, a partir del mapa de peligro, una medida estructural podría ser la creación de un sistema de alcantarillado y depuración de aguas residuales de un sector urbanizado, cuyo saneamiento se lleva a cabo mediante fosas sépticas. Una medida estructural, a partir del mapa de vulnerabilidad del medio humano, sería un cambio en el sistema de abastecimiento de la población, de forma que una entidad abastecida de forma exclusiva con agua del acuífero vería reducido el riesgo, si el uso del agua del acuífero es complementario a otras fuentes de abastecimiento.

En el ámbito de la gestión de la catástrofe se podrían establecer medidas paliativas y/o compensatorias a partir de los mapas de vulnerabilidad del medio humano. La distribución de los elementos expuestos al riesgo y su grado de vulnerabilidad definen cuales son las zonas donde las consecuencias de un evento de contaminación serían mayores. Este hecho se puede observar fácilmente en aquellas zonas donde la importancia de la actividad económica dependiente del recurso puede establecer diferencias sustanciales en los seguros.

7. INSTRUMENTOS, VARIABLES, FUENTES Y ESCALA DE TRABAJO

7.1. INSTRUMENTOS PARA LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

7.1.1. LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

El proceso de elaboración de la cartografía de riesgo, en formato digital, es una tarea muy compleja y laboriosa que requiere de un completo sistema informático. Si además se tiene en cuenta la rapidez con que se producen los avances en la informática, la actualización de los equipos tanto en sentido físico, *hardware*, como respecto a las aplicaciones, *software*, es una tarea ineludible que desemboca en un cambio continuo, tanto en la versión utilizada, como en la implantación de nuevas herramientas.

Todo el proceso de elaboración de los mapas de riesgo está basado en el manejo de un gran número de variables, por lo que es necesario utilizar una serie de herramientas informáticas sin las cuales es inviable la producción de dicha cartografía. La herramienta informática por excelencia para el manejo de variables vinculadas con el territorio y por tanto con el riesgo, es el Sistema de Información Geográfica (SIG). La utilización de un SIG es prácticamente indispensable por dos motivos. En primer lugar, por el gran volumen de información que se maneja. En segundo lugar, por su versatilidad en cuanto a transferencia de información con otros programas más ágiles para determinadas funciones. Además, en el caso concreto del análisis de los riesgos, adquiere especial sentido el SIG porque se ha intentado diseñar una herramienta ágil y eficaz para su integración en sistemas de gestión de recursos naturales y/o ordenación del territorio. Por estos motivos, tiene especial importancia, tanto el resultado cartográfico final, como toda la estructura para el procesamiento de los datos y elaboración de los mapas.

El SIG ha sido definido por diversos autores, casi siempre desde el punto de vista de la aplicación informática. Así, Bracken y Webster (1990) lo definen como “un tipo especializado de base de datos que se caracteriza por su capacidad de manejar datos geográficos, es decir, espacialmente referenciados, los cuales se pueden representar gráficamente como imágenes”. Según Aronoff (1989), un SIG es “un sistema informático capaz de realizar las tareas para manejar datos georreferenciados: entrada, almacenamiento, recuperación, manipulación, análisis y representación”. Al margen de la perspectiva informática, un SIG se puede definir como un sistema de gestión de bases de datos georreferenciados que permite el manejo de un gran volumen de información espacial, sin perder sus características iniciales al superponer las distintas capas de información.

Los primeros sistemas automáticos de superposición, principal valuarte de los Sistemas de Información Geográfica desde sus inicios (Tomlin, 1990), se desarrollaron en Norteamérica a partir de la década de los años sesenta. En una primera etapa, los SIG surgieron en respuesta a una serie de proyectos de las instituciones públicas de algunos países, caso de Canadá, donde en 1962 surge un proyecto para realizar un inventario forestal del país denominado CGIS (*Canada Geographic Information System*) (Bosque, 1992), el cual contenía los principios básicos de un SIG, es decir, el manejo de datos cartográficos y alfanuméricos relacionados entre sí.

Paralelamente a este tipo de proyectos, para los cuales se diseñaba un SIG específico, nació una segunda línea de investigación en el desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica, en la que se primaba la solución a problemas en la estructura de un SIG frente a los resultados de un proyecto determinado. El Laboratorio *Computer Graphics and Spatial Analysis* (LCGSA) perteneciente al servicio central de informática de la Universidad de Harvard inició su andadura con el propósito de mejorar los SIG ya existentes. Así surgió el SYMAP (*Synagraphic Mapping*) en 1967 en la Universidad de Harvard, un software vectorial que evolucionó años más tarde hacia un sistema raster denominado MAP (*Map Análisis Package*). A partir de las experiencias del laboratorio cartográfico de Harvard nació el primer SIG vectorial topológico ofrecido al público a finales de los años setenta denominado ODYSSEY. Este producto fué la base sobre la que se desarrolló el primer SIG de la casa ESRI (*Environmental Systems Research Institute*) denominado ArcInfo que revolucionó, posteriormente, todo el mercado informático ligado al SIG. Con la creación de ArcInfo, en los años ochenta, aparecieron en el mercado SIG de propósito general, que supusieron una evolución notable en la arquitectura de estos sistemas y, paralelamente, se produjo un desarrollo importante de la implantación de SIG en las administraciones públicas, con objeto de mejorar la estructura de la información espacial y los bancos de datos. En la década de los ochenta empezaron a aplicarse, de forma masiva, técnicas de superposición automática para el análisis de problemas territoriales, tanto de índole física como humana.

A partir de los años ochenta se produjo una especialización de las casas comerciales de SIG hacia el formato de salida de la información, es decir, vectorial frente a *raster*. Ante esta disyuntiva, ArcInfo es el que ofrece mejores prestaciones dado que incorpora una amplia gama de funciones para ambos formatos, hecho que ha sido decisivo a la hora de elegir este *software* frente a otros. Por otro lado, también ha sido importante la política comercial de la casa ESRI basada en la continua mejora (prácticamente anual) de los productos que oferta; con cada nueva versión, se han aportado soluciones a los problemas surgidos del empleo de este SIG por los usuarios, además de configurar entornos de trabajo más ágiles, eficaces y atractivos de cara al usuario. Así surgió ArcView, un SIG de menores prestaciones pero que permite adaptarse a las necesidades de cada usuario incorporando aquellas herramientas que le son necesarias de forma que puede alcanzar, prácticamente, todas las prestaciones de ArcInfo.

7.1.2. OTRAS HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN CADA ETAPA DE PRODUCCIÓN

En este trabajo, el SIG ha sido el núcleo central en el proceso de elaboración de la cartografía apoyado en otras herramientas auxiliares, como es el diseño asistido por ordenador (DAO) y sistemas de gestión de bases de datos relacionales (SGBD) que agilizan y maximizan el rendimiento de los bancos de datos. Estas herramientas son más conocidas por sus iniciales en inglés CAD (*Computer Assisted Design*) y DBMS (*Data Base Management System*), respectivamente.

En la elaboración de la cartografía, el manejo del SIG condiciona las etapas a cubrir en el desarrollo de la metodología como se especifica en el apartado 7.2. A continuación se describen esas etapas pero desde la perspectiva de las herramientas utilizadas.

En la introducción de los datos es donde intervienen las herramientas del tipo CAD, junto con el SIG. La entrada de datos es la conversión de información analógica a digital, tanto espacial, como alfanumérica. Para la información espacial se han utilizado herramientas CAD, en concreto Surfer 8 para la modelización de variables continuas y Autocad 14 para digitalizar mapas, además del SIG ArcView 3.2 utilizado para ambas funciones. La aplicación informática Surfer 8, dispone de una amplia gama de técnicas de modelización, que junto con la agilidad del software para el tratamiento de la información, ha sido el punto de referencia para generar los modelos digitales con este programa. Autocad 14 tiene altas prestaciones para la edición de entidades vectoriales y georreferenciación de las mismas. Por otra parte, ArcView 3.2. permite elaborar información geográfica con cierta facilidad gracias a las herramientas de edición que para ello dispone. Para la introducción de la información alfanumérica se han utilizado herramientas SIG, DBMS y hojas de cálculo, entendidas como un entorno mixto entre sistemas de gestión de base de datos y técnicas de tratamiento estadístico. Los programas Excell y Access en sus versiones XP y ArcView 3.2 son los que mejores resultados ofrecen por la facilidad de manejo y transmisión de datos. La transferencia de información entre los sistemas de información geográfica y los sistemas de gestión de base de datos tiene un carácter bidireccional y permiten la lectura de los datos en cualquier programa. El trabajo con las bases de datos se realiza mediante la utilización de condiciones aritméticas y/o lógicas (esta última mediante operadores booleanos: *and*, *or*, *not*, etc.) de los atributos temáticos.

Un tipo especial de base de datos es la realizada mediante consultas SQL desde Arcview a la base de datos Access y Excell. La consulta SQL permite obtener información almacenada en las tablas de la base de datos Access sin necesidad de generar ficheros intermedios. Esto facilita el manejo rápido de la información puesto que solo se trabaja con un fichero y se evita el almacenamiento en distintos formatos. Así, se introduce información alfanumérica en el SIG.

Para el análisis espacial y la obtención de la cartografía se han utilizado los *software* ArcInfo 8.2 y ArcView 3.2. La superposición espacial se ha realizado utilizando ambos SIG, mientras que en ArcView 3.2 se ha operado con los datos temáticos para el cálculo de los distintos índices empleados en la evaluación del riesgo.

En la figura 7.1, se observa como se relacionan las distintas herramientas utilizadas para la evaluación y cartografía del riesgo, en función de su objetivo y del tipo de aplicación a la que pertenece.

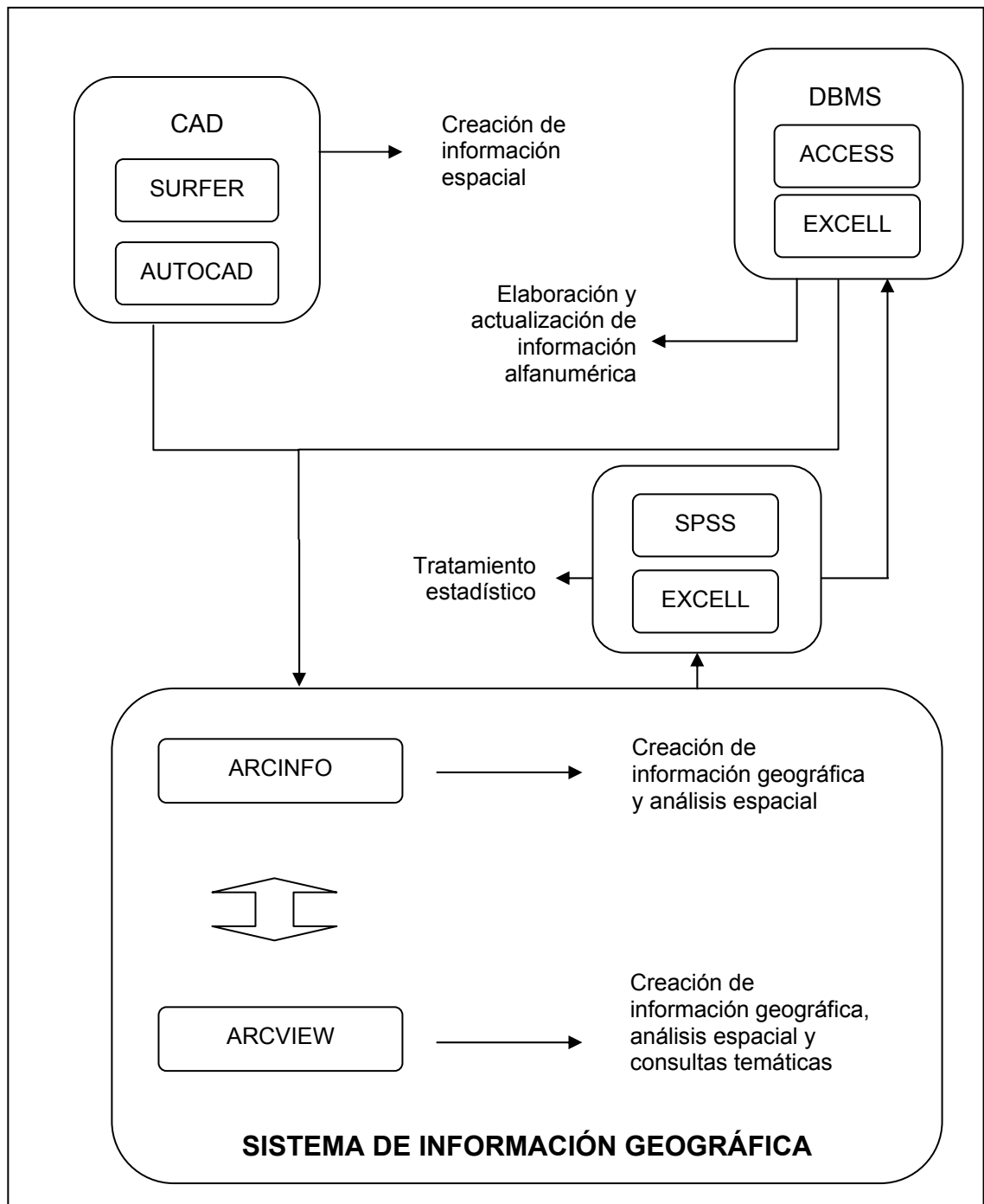


Figura 7.1. Relación entre los programas utilizados para el cálculo del riesgo en este trabajo.

7.2. PASOS METODOLÓGICOS PARA LA EVALUACIÓN Y CARTOGRAFÍA DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS: FASES DE APLICACIÓN DEL SIG

Los distintos pasos seguidos en este trabajo para la aplicación de la metodología planteada en el capítulo 5 y 6 están condicionados, por el empleo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), en la elaboración de los distintos factores de riesgo y en la propia evaluación del riesgo. Se ha utilizado como referente el esquema propuesto por Bosque (1992) para la elaboración de un proyecto con herramientas SIG. Este autor estableció los pasos a seguir en cinco puntos: recopilación de información, introducción de datos, realización de la topología, análisis espacial y obtención de resultados.

Los pasos que se han dado en este trabajo para la realización de la cartografía quedan resumidos a continuación en tres puntos:

- Introducción de datos.
- Análisis espacial.
- Obtención de resultados.

El primer paso hace referencia a la construcción de la información geográfica, mientras que los dos últimos al tratamiento posterior de dicha información. No se hace referencia a la recopilación de información planteada por Bosque (1992) porque se desarrolla en el apartado 7.3 (variables) y la realización de la topología se incluye en el epígrafe 7.2.1.

7.2.1. INTRODUCCIÓN DE DATOS

La introducción de datos hace referencia a la creación y conversión, en formato de sistema de información geográfica, de las distintas variables y parámetros que se han utilizado en el cálculo del riesgo. En el proceso de introducción de datos se han utilizado capas de información en formato vectorial y raster. El formato vectorial utiliza objetos geográficos georreferenciados con exactitud por medio de un sistema de coordenadas y los atributos se almacenan en bases de datos asociadas a la base cartográfica. Sin embargo, el modelo raster utiliza para la representación cartográfica, una malla regular. Cada celda o *pixel* de esa malla contiene un valor numérico en función de sus atributos (Comas y Ruiz, 1993).

La elección de un formato u otro ha estado condicionada por el tipo de variable utilizada. En este sentido, se pueden establecer dos grandes grupos según la naturaleza de las variables que se han manejado: discretas y continuas. Las variables discretas engloban a parámetros con valores tanto numéricos como atributos. En cambio, las continuas sólo utilizan valores numéricos continuos.

7.2.1.1. DATOS DE NATURALEZA DISCRETA

La entrada de datos de naturaleza cualitativa o discreta en el SIG se ha llevado a cabo mediante la digitalización en tableta digitalizadora. En la figura 7.2 se muestra un esquema de la secuencia que se ha seguido para crear capas de información geográfica en formato vectorial. En este esquema se observa que el primer paso es la digitalización de la información recopilada. Para ello se ha utilizado una tableta digitalizadora de 90x60 cm, sobre la cual se ha georreferenciado la información procedente de mapas analógicos. A continuación, se han corregido los errores derivados de la digitalización. En primer lugar, se ha revisado la entrada de todas las entidades cartográficas y, en segundo lugar, se han corregido todas aquellas entidades con alguna discontinuidad espacial. Por último, se han convertido los ficheros a un formato de un intercambio con el sistema de información geográfica, en este caso, ficheros dxf.

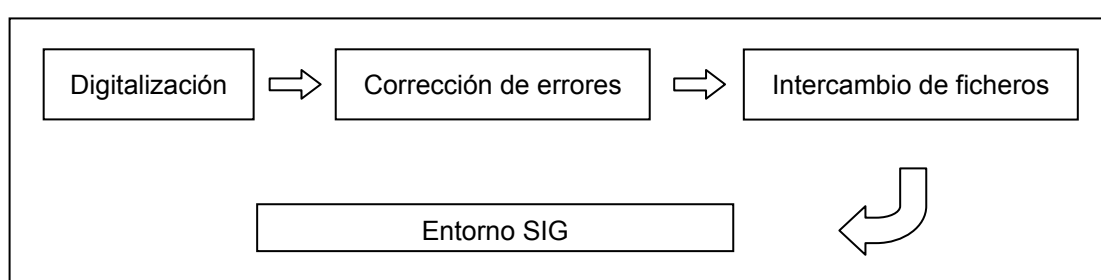


Figura 7.2. Pasos para la entrada de datos en un SIG desde tableta digitalizadora.

Este planteamiento de trabajo se ha tenido en cuenta para aquellas variables digitalizadas a partir de una fuente cartográfica en soporte papel. En los casos en que la información se ha generado tras la consulta de fuentes cartográficas digitales, o en trabajo de campo con el mapa topográfico 1/10.000 de la Junta de Andalucía como base de referencia, la digitalización se ha realizado usando los comandos de edición de la aplicación informática ArcView 3.2 sin la necesidad de tableta digitalizadora. Para la digitalización en pantalla de las distintas entidades espaciales se ha utilizado como base cartográfica el mapa topográfico 1/10.000 de la Junta de Andalucía y/o la ortofoto a escala 1/10.000 de la Junta de Andalucía, ambas en formato *raster*. Así, por ejemplo, se han introducido los datos relacionados con el trazado de los caminos y carreteras.

La entrada de datos en el SIG a partir de tableta digitalizadora y directamente en pantalla ha sido el sistema utilizado con los parámetros de los factores de peligro y vulnerabilidad del medio humano. En cuanto a las variables del medio físico, empleadas en el cálculo de la vulnerabilidad del acuífero, se ha trabajado tanto con variables continuas como con variables discretas, entre las cuales cabe citar la litología y geología de los materiales de la zona de estudio. Las variables continuas para la vulnerabilidad del medio físico se han generado a partir de los modelos digitales de elevaciones (epígrafe 7.2.1.2.1.).

7.2.1.1.1. REALIZACIÓN DE LA TOPOLOGÍA, CORRECCIÓN DE ERRORES Y ASIGNACIÓN DE ATRIBUTOS

La topología consiste en la creación de las relaciones entre los objetos geográficos cartografiados (relaciones de conectividad, superposición sin conexión, influencia, proximidad, coincidencia e inclusión). Este paso es imprescindible para el análisis espacial posterior puesto que define, en la base de datos interna, las relaciones particulares entre los objetos geográficos cartografiados (polígonos, líneas y puntos). De las tres entidades mencionadas, los objetos tratados como puntos (p.e. sondeos, piezómetros y manantiales) no han tenido un posterior tratamiento espacial y, simplemente, se ha utilizado la función de recuperación de información.

La corrección de los errores, dado el posterior tratamiento que se ha realizado de la información, ha consistido en la detección de polígonos “abiertos”. El error asociado a los polígonos “abiertos” consiste en la presencia de nodos que sobran o no llegan a cerrar polígonos (figura 7.3). En ambos casos, son errores debido a la digitalización y a la tolerancia o resolución en la búsqueda de nodos para crear los polígonos.

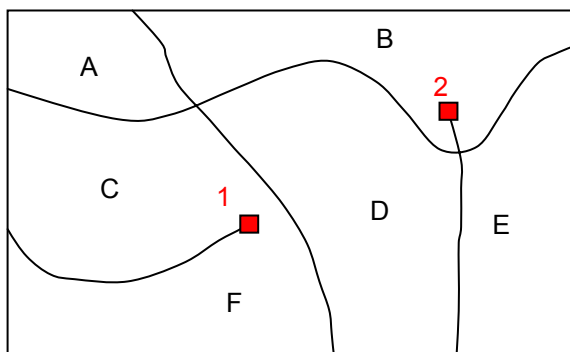


Figura 7.3. Errores más comunes en la digitalización. Los polígonos B y C-F no están bien cerrados por la presencia del nodo 2 *overshoot* y el nodo 1 *undershoot*, respectivamente.

El último paso para tener definida una capa de información geográfica es la asignación de los atributos de un carácter alfanumérico. La introducción de los datos en el SIG se ha realizado en ArcView 3.2 mediante previa selección espacial de cada entidad.

7.2.1.2. DATOS DE NATURALEZA CONTINUA

El manejo de información continua se ha realizado en formato *raster* y TIN (*Triangle Irregular Network*) a partir de la creación de modelos digitales del terreno. Un modelo digital de elevación (también denominado MDE) es un caso especial de los modelos digitales del terreno (MDT). Felicísimo (1994) define un MDT como “una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua”. La elevación del terreno es una variable cuantitativa y continua por lo que un MDE es “una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la superficie del terreno” (Felicísimo, 1994).

Hay muchos métodos de interpolación por *gridding* para la representación de una variable en formato *raster*. En función de la cantidad de datos, de la superficie cubierta por el muestreo o la distribución espacial de los datos se puede emplear un método u otro. Vías y Galacho (2003) realizaron un ensayo con distintos métodos de interpolación o modelización para obtener

mapas de variables con incidencia en la cartografía de vulnerabilidad y riesgos a la contaminación de aguas subterráneas. Estos autores determinaron que los métodos *Kriging* y *Minimum Curvature* son los que mejores resultados aportan a la cartografía final.

Otro tipo de método de interpolación no basado en técnicas de *gridding* pero de una gran importancia en la elaboración de la cartografía, es el de triangulación de Delaunay. Este método está espacialmente indicado para modelizar superficies que tienen continuas y bruscas variaciones en la distribución de los valores, como por ejemplo el relieve.

Las diferencias entre un método y otro radican en el formato de salida y en la exactitud de los resultados. En el caso del método *kriging*, los resultados se muestran en formato *raster*, mientras que el método de triangulación de Delaunay es en formato TIN o red de triángulos irregulares. Los métodos de *gridding* utilizan filtros para mostrar una tendencia suavizada de la superficie de la variable a modelizar (Felicísimo, 1994); así, cuanto mayor sea el suavizado de la superficie, mayor será el error cometido. Por otro lado, el método de triangulación utiliza los datos de partida sin ningún tipo de filtro, porque los valores iniciales entran a formar parte de la malla de triángulos como nodos de la red y el error es nulo, de ahí que se le denomine como método exacto.

En este trabajo, concretamente, se ha utilizado el método de *kriging* para la modelización de variables que muestran una suave tendencia en la distribución de los datos, como son los casos de la superficie piezométrica y la precipitación, y el método de triangulación de Delaunay para el relieve.

7.2.1.2.1. ELABORACIÓN DEL MODELO DIGITAL DEL TERRENO (MDT) Y ESTIMACIÓN DE ERRORES

En función del método de construcción del MDT, *triangulación de Delaunay* o *kriging*, se ha utilizado una herramienta u otra. La construcción del MDT mediante el método de *kriging* se ha realizado en la versión 8 de la aplicación Surfer. En este programa se ha generado un fichero *ascii* con las coordenadas x,y,z y la malla utilizada para la creación del *grid* tiene un tamaño de celda de 10 m de lado. Posteriormente, el fichero *ascii* se transforma a formato *raster* con el comando *add theme events* y *convert to grid* de ArcView 3.2 similar al comando *generate* de versiones anteriores de ArcInfo.

En la siguiente figura 7.4 se muestra un esquema con los pasos seguidos en la creación del MDT en Surfer y ArcView. En un círculo se indica el comando o método utilizado y en un rectángulo los parámetros requeridos.

El MDT creado a partir de la triangulación de Delaunay se ha realizado en ArcInfo 8.2. Con del comando *create TIN* se elabora un MDT en formato TIN. Los parámetros que se han tenido en cuenta han sido un radio de búsqueda de valores Z de 10 m y la opción *mass* para la interpolación de los triángulos. El resultado se ha transformado en formato *raster* para su posterior tratamiento.

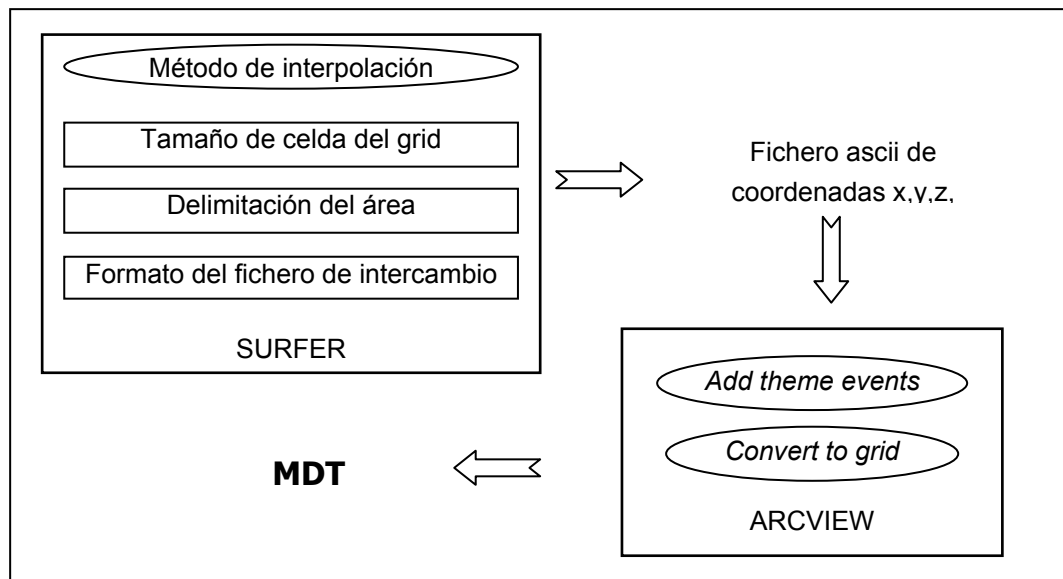


Figura 7.4. Secuencia de los pasos seguidos para la creación del MDE.

El modelo obtenido se ha considerado como válido y no se han estimado los posibles errores asociados a la creación del mismo por dos razones. Por un lado, se ha dispuesto de un elevado número de datos de altitud (líneas de altitud cada 10 m procedentes de la cartografía a escala 1/25.000 del IGN y cotas del Mapa Topográfico de Andalucía a escala 1/10.000), lo cual se ha considerado como condición suficiente dado que la escala de salida de los resultados es 1/50.000. Por otro lado, el MDT elaborado para la precipitación y la superficie piezométrica se ha realizado con el método *kriging*, cuyo error cuadrático medio es similar a otros métodos (Vías y Galacho (2003) y no presenta defectos cartográficos denominados *bull's eyes*, como ocurre con otros métodos de mayor precisión, denominados exactos, caso de *Inverse Distance Weight*.

7.2.2. ANÁLISIS ESPACIAL

Dado que la información se ha generado en tres formatos distintos, vectorial, *raster* y TIN, el primer aspecto a dirimir ha sido la conversión de los ficheros a un formato homogéneo. Se ha trabajado con unidades espaciales analíticas no coincidentes, las cuales presentan una adscripción directa con el espacio geográfico y, por tanto, con la realidad, de ahí la elección del formato vectorial en detrimento del raster.

Las unidades espaciales homogéneas, con un carácter multivariable, están elaboradas con las técnicas de superposición cartográfica de los Sistemas de Información Geográfica. El análisis espacial mediante SIG se realiza con cuatro funciones analíticas: recuperación, superposición, vecindad y conectividad.

Para el análisis del riesgo se ha utilizado la superposición cartográfica (figura 7.5), mediante tres funciones como son la intersección de polígonos con y sin delimitación del perímetro del área de estudio y, por otro lado, la eliminación de fronteras con igual atributo.

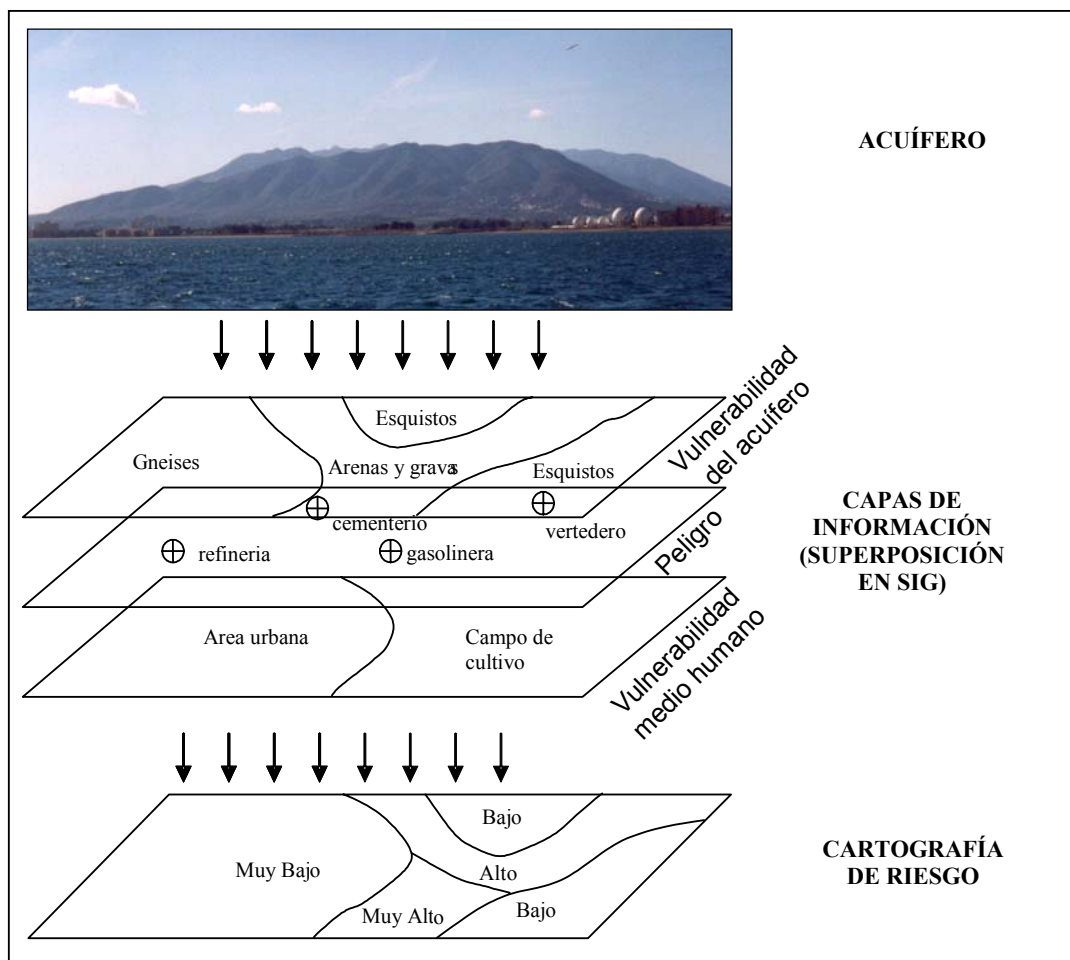


Figura 7.5. Modelo conceptual para metodologías de evaluación del riesgo mediante superposición cartográfica.

La superposición cartográfica se ha realizado con los comandos *intersect*, *identity* y *dissolve* de ArcInfo. La intersección (comando *intersect*) ha permitido generar unidades espaciales homogéneas representativas de todas las capas de información temática introducidas, es decir, litología, edafología, etc. La intersección con delimitación del perímetro del área de estudio (comando *identity*) se ha utilizado para superponer polígonos con un límite del área de estudio común a todos los mapas y generar igualmente unidades espaciales homogéneas. Por último, mediante la eliminación de líneas de polígonos adyacentes con igual valor temático (comando *dissolve*) se han creado unidades homogéneas desde el punto de vista del riesgo a la contaminación.

7.2.3. OBTENCIÓN DE RESULTADOS Y EDICIÓN CARTOGRÁFICA

Los resultados generados a partir de la superposición de las distintas capas de información (peligro, vulnerabilidad intrínseca del acuífero, vulnerabilidad de la población y sus bienes) son unidades espaciales homogéneas de riesgo de contaminación de las aguas subterráneas. De cada una de estas unidades, de las cuales se posee toda la información necesaria para el cálculo del riesgo, se ha obtenido un valor de riesgo mediante el empleo de operadores

aritméticos en la aplicación informática ArcView 3.2. Los principales operadores utilizados han sido la adición, la sustracción, la multiplicación y la división, con los cuales se ha elaborado el índice de riesgo que presenta un determinado espacio.

Una vez elaborado el índice de riesgo, mediante consultas temáticas a la base de datos, utilizando operadores lógicos (*and, or, not,...*) se han seleccionado todos aquellos registros y unidades espaciales de riesgo, que cumplen la condición aritmético-lógica sobre el nivel de riesgo. A cada registro seleccionado se le ha asignado un atributo cualitativo referente al grado de riesgo.

El mapa de riesgo y sus componentes se ha representado en cinco intervalos y se ha utilizado la misma terminología con el fin de comparar los resultados entre el riesgo y sus componentes (cuadro 7.1). El índice de riesgo o cualquiera de los factores y componentes del mismo no plantea ningún problema a la hora de establecer una clasificación en intervalos siempre que los valores a representar sean números enteros, pero en el caso de los números decimales es muy importante determinar, previamente, el número de decimales que acompaña a cada valor. Cuando se realiza una clasificación en intervalos con valores decimales, redondear el valor final para no mostrar un número con decimales puede llevar a errores en el mapa final. Por ejemplo si un índice se clasifica en dos intervalos (0-0'5] y (0'5-1] un valor 0'5 que no tenga suficiente detalle puede llevar a variaciones del mapa final. El valor 0'5 puede ser resultado de redondear 0'46 ó 0'54; si 0'5 es el resultado de redondear 0'54 se estaría incluyendo en el intervalo (0-0'5] por error cuando en realidad le correspondería incluirse en el intervalo (0'5-1]. La utilización del mayor número de decimales posibles puede evitar este tipo de errores, que si bien cuantitativamente no son muy importantes, pues la diferencia es apenas de unas décimas, la representación cartográfica del índice puede variar, hasta el punto de no incluir zonas de riesgo en los planes de protección.

Riesgo	Peligro	Vulnerabilidad del medio físico	Vulnerabilidad del medio humano
Muy Alto	Muy Alto	Muy Alta	Muy Alta
Alto	Alto	Alta	Alta
Moderado	Moderado	Moderada	Moderada
Bajo	Bajo	Baja	Baja
Muy Bajo	Muy Bajo	Muy Baja	Muy Baja

Cuadro 7.1. Clases del riesgo y sus componentes.

Las clases del cuadro anterior son cualitativas y caracterizan una serie de valores cuantitativos del riesgo. La clasificación realizada para agrupar los valores numéricos y etiquetarlos como se muestra en el cuadro 7.1, es una labor más compleja cuyo objetivo es mostrar el riesgo de forma clara y a la vez detallada. En este punto juega un papel crucial la selección de los intervalos, o más concretamente, la elección de los límites de los intervalos, requiere de un profundo conocimiento de la casuística de los métodos empleados. Normalmente, ante a la ausencia de otros criterios, la delimitación de los límites de los intervalos se ha realizado a partir de clases regulares en función del recorrido del índice. Esta técnica establece una gradación equilibrada de las clases del parámetro analizado.

Un apartado que merece especial atención es la representación cartográfica de los resultados obtenidos. Las representaciones gráficas constituyen la transcripción de ideas e

información mediante un sistema codificado; la imagen desempeña la función del sonido, las letras o los números (Pellicer, 1997). La cartografía del riesgo es posiblemente uno de los puntos más complicados a tratar en la evaluación del riesgo pues tiene como objetivo mostrar el mayor detalle posible, en cuanto a variabilidad espacial, pero a la vez debe ser una simplificación del riesgo real puesto que su lectura completa sería ininteligible. Además de la correcta elección del número y límite de los intervalos tiene una gran importancia el equilibrio de colores, la predecible secuencia de la gama de colores, singularidad y claridad de contornos, aspectos básicos de la semiótica que deben estar contemplados en el proceso de elaboración cartográfica. Todo el trabajo empleado en la elaboración de un indicador de riesgo puede quedar oculto si la representación cartográfica carece de los principios básicos que rigen su cometido, la comunicación visual; proceso interactivo de percepción y comunicación (Dondis, 1976).

La representación cartográfica se basa en el manejo del color, de manera que se ha utilizado una gama dicromática relacionada con una familia de tonos de colores. Cada familia de tonos está relacionada con un campo del espectro visible, colores fríos (verde, azul, violeta) cercanos a la radiación ultravioleta y los colores cálidos (rojo, naranja, amarillo) cercanos al infrarrojo. En el cuadro 7.1 se observa que los colores cálidos son utilizados para las clases de mayor riesgo, mientras que los colores fríos para las clases de bajo riesgo, como consecuencia de la diferente respuesta semiológica que ofrecen unos y otros (Pellicer, 1997).

Paralelamente a la obtención de los distintos resultados de riesgo y sus componentes (peligro, vulnerabilidad del medio físico y vulnerabilidad del medio humano) se ha calculado el porcentaje de superficie ocupado por cada clase del índice para valorar la influencia de cada una en el acuífero. Por otro lado, se ha obtenido la correlación entre el índice de vulnerabilidad y los parámetros del método empleados en el índice a través de los coeficientes de correlación de Pearson y Determinación. El coeficiente de Pearson es un índice adimensional acotado entre 1 y -1 que refleja el grado de dependencia lineal entre dos conjuntos de datos. El coeficiente de Determinación varía entre 0 y 1 y refleja la proporción de la varianza de Y que puede atribuirse a la varianza de X.

7.3. VARIABLES PARA LA ESTIMACIÓN DEL RIESGO

El análisis de los riesgos de contaminación de las aguas subterráneas lleva aparejado el manejo de un gran volumen de información que puede ser agrupada en tres grandes bloques en función de cada uno de los componentes del riesgo: peligro, vulnerabilidad del medio físico del acuífero y vulnerabilidad del medio humano. Para la evaluación de cada uno de estos componentes se ha utilizado una serie de variables y parámetros de distinta naturaleza.

7.3.1. VARIABLES UTILIZADAS PARA LA EVALUACIÓN DEL PELIGRO

La evaluación del peligro de contaminación se ha realizado mediante variables de nocividad, determinada a partir de la clasificación realizada por De Keteleare *et al.* (2004) y de intensidad y probabilidad de contaminación. Respecto a la intensidad en el epígrafe 5.1.3 se hace mención a su cálculo en función de la cantidad de contaminante que es susceptible de ser

vertido. Para ello se ha empleado un parámetro que permita categorizar cada actividad o fuente contaminante según su tamaño. En el cálculo de la probabilidad se ha utilizado como criterio de estimación las medidas de protección inherentes a la actividad desarrollada.

El parámetro referido a intensidad de una actividad contaminante se ha calculado para las siguientes actividades o fuentes de peligro:

- Gasolineras. Cantidad de combustible que pueden almacenar los tanques que abastecen a los surtidores.
- Urbanizaciones. Densidad de vivienda obtenido a partir de un muestreo aleatorio utilizando una cuadrícula de 1 Ha de superficie.
- Carreteras. Índice medio de circulación según los datos de la Consejería de Obras Públicas y Transportes.
- Establos. En este caso se ha utilizado el número de establos por superficie.

En lo que respecta a la probabilidad de ocurrencia de un evento de contaminación, las variables y parámetros utilizados son:

- Gasolineras. En este caso se ha estimado un valor de reducción del 15 % de la probabilidad de ocurrencia, debido a las fuertes medidas de seguridad que llevan asociadas este tipo de actividad.
- Cementerios. El parámetro utilizado ha sido el tipo de enterramiento. De este modo, a los cementerios con enterramiento de tipo nicho, se les ha reducido la nocividad un 80%.

En cuanto al resto de los peligros no se ha utilizado ningún criterio para gradar la probabilidad de ocurrencia, por lo que se les ha asignado un valor 1 tal y como indica la metodología.

7.3.2. VARIABLES UTILIZADAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DEL ACUÍFERO

Las variables y parámetros empleados para medir la vulnerabilidad del medio físico del acuífero se recogen a continuación:

- Altitud topográfica. Curvas de nivel cada 10 m, y cotas topográficas
- Altitud de la lámina de agua subterránea. Nivel piezométrico en los sondeos y piezómetros de la sierra.
- Espesor de zona no saturada. Diferencia entre altitud topográfica y piezométrica
- Litología. Agrupaciones litológicas en función del comportamiento hidrogeológico, permeabilidad y fracturación.
- Grado de confinamiento del acuífero.
- Textura del suelo. Porcentaje de arcillas, limos y arenas.
- Espesor del suelo.
- Pendiente de la ladera. Porcentaje de pendiente elaborado a partir del modelo digital de elevaciones.
- Vegetación natural. Agrupación de formaciones arbóreas-arbustivas densas.

- Formas kársticas. Localización y delimitación de formas kársticas.
- Cubierta superficial sobre el afloramiento carbonático. Zonas con suelos y materiales de piedemonte.
- Cantidad de precipitación. Precipitación media anual en mm/día
- Intensidad de la precipitación. Número de días con lluvia y precipitación media anual

7.3.3. VARIABLES UTILIZADAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DEL MEDIO HUMANO

Para la evaluación de la vulnerabilidad del medio humano se han considerado las siguientes variables e indicadores.

- Número de habitantes que dependen para su abastecimiento de los recursos hídricos de la Sierra de Mijas. Para precisar este dato se ha utilizado la población distribuida en núcleos urbanos, en diseminado y por secciones censales.
- Número de personas con edades más vulnerables a la contaminación del agua.
- Número de hectáreas regadas con aguas subterráneas según tipo de cultivo.
- Número de unidades ganaderas que se abastecen con aguas subterráneas.
- Número de locales cuya actividad productiva depende de la utilización de aguas subterráneas.
- Tipo de abastecimiento. Modelo de uso del acuífero y de infraestructura para abastecimiento de la población según los términos expresados en el apartado 5.3.
- Beneficios económicos de cada actividad productiva, diferenciados por hectárea de cultivo, una unidad ganadera o un local.
- Número de trabajadores en cada actividad productiva, diferenciados en función de los empleados en una hectárea de cultivo, una unidad ganadera y un local.

7.4. FUENTES Y ESCALA DE TRABAJO

En total se han utilizado cuatro tipos básicos de fuentes: bibliográficas, cartográficas (analógicas y digitales), estadísticas y directas.

Las fuentes bibliográficas consultadas para evaluar o estimar el riesgo han sido:

- Andreo (1997). Datos de permeabilidad, transmisividad, piezometría, recarga y grado de karstificación para valorar los parámetros hidrogeológicos del acuífero de la sierra de Mijas.
- Aguilar *et al.*, 1992, 1993 y 1995). Memoria del mapa de suelos del proyecto LUCDEME de las hojas 1054, 1066 y 1050 para los valores de textura y espesor edáfico, respectivamente.

- García Aróstegui (1998). Datos de permeabilidad, transmisividad, piezometría y recarga para valorar los parámetros hidrogeológicos del acuífero del río Vélez.
- Sanchez *et al.* (1998). Datos de permeabilidad, transmisividad, piezometría, recarga y grado de karstificación para valorar los parámetros hidrogeológicos del acuífero de la sierra de Líbar.

Las fuentes cartográficas utilizadas, analógicas y digitales, se caracterizan por su diversidad en cuanto a escalas que van desde la de detalle (1/10.000) hasta la escala media (1/100.000).

Las fuentes cartográficas analógicas han sido:

- Cartografía geológica a escala 1/25.000 de Andreo y Sanz de Galdeano (1994). Hojas 1050, 1064 y 1054 del IGME a escala 1/50.000

Las fuentes cartográficas digitales empleadas han sido:

- Mapa topográfico a escala 1/25.000 del Centro Nacional de Información Geográfica. Hojas 1050-2, 1050-4, 1054-1, 1054-3, 1064-4, 1066-1, 1066-2, 1067-1.
- Mapa Topográfico de Andalucía a escala 1/10.000, hojas 1039-44, 1040-14, 1050-24, 1050-33, 1050-34, 1050-42, 1050-43, 1050-44, 1053-41, 1054-11, 1054-12, 1054-13, 1054-21, 1054-22, 1054-23, 1064-21, 1064-22, 1064-31, 1064-32, 1066-21, 1066-22, 1066-31, 1066-32, 1066-41, 1066-42, 1067-11 y 1067-12.
- Ortofotos en color a escala 1/10.000 correspondientes a las hojas de los Mapas Topográficos de Andalucía a escala 1/10.000.
- Mapa de suelos a escala 1/100.000, hojas 1050, 1054, 1064, 1066 y 1067 del proyecto LUCDEME.
- Mapa de usos y coberturas vegetales en Andalucía de la Consejería de Medio Ambiente. Provincia de Málaga, año 1995.
- Mapa de cultivos y aprovechamientos en Andalucía de la Consejería de Medio Ambiente. Hojas 1050, 1054, 1064, 1066 y 1067, año 1999.
- Mapa del inventario de regadíos de Andalucía (1997).
- Mapa Digital de Andalucía a escala 1/100.000 de la Consejería de Obras Públicas y Transporte, para la delimitación de los núcleos de población, carreteras, vértices geodésicos, límites municipales, red hídrica, embalses.

Las fuentes estadísticas utilizadas son:

- Número de días con lluvia en el año 1996/1997 de la Confederación Hidrográfica del Sur.

- Precipitación media anual del Instituto Nacional de Meteorología y la Confederación Hidrográfica del Sur entre los años 1970 y 2000.
- Población en el año 2001 distribuida en núcleos urbanos, diseminado distritos y secciones censales (Instituto Nacional de Estadística).
- Población ocupada en el año 2001 en sectores económicos de la clasificación CNAE 1 por núcleos y secciones de población (Instituto Nacional de Estadística).
- Locales del sector hostelería en el año 2001 por municipios (Instituto de Estadística de Andalucía).
- Trabajadores ocupados en el sector hostelero de cada municipio en el año 1990 (Censo de Locales del Instituto de Estadística de Andalucía).
- Hectáreas, jornales y beneficios económicos de cada tipo de cultivo regado con aguas subterráneas (inventario de regadíos de Andalucía del año 1997).
- Intensidad media diaria de tráfico por carretera de la Dirección General de Carreteras (Consejería de Obras Públicas y Transporte).

Por último han sido utilizadas como fuentes directas:

- Entrevistas a los responsables de las gasolineras sobre la capacidad de almacenaje de los tanques de combustible.
- Entrevistas a los técnicos de las empresas de abastecimiento de agua sobre el tipo de abastecimiento a la población dependiente de los recursos hídricos de la sierra (técnicos de INIMA en Vélez Málaga, Ondagua en Alhaurín de la Torre, Mijagua en Mijas, Emabesa en Benalmádena, Astosam en Torremolinos, Emasa en Málaga y en el resto de municipios al ayuntamiento).
- Entrevista al director de la oficina comarcal agraria de Ronda sobre el número y tipo de cabezas de ganado en la sierra de Líbar, beneficios económicos de las explotaciones ganaderas y empleos por explotación.
- Toma de datos en campo de zonas con formas kársticas superficiales.
- Toma de datos en campo de zonas con continuidad edáfica.
- Toma de datos en campo de peligros de contaminación: corrientes de agua desde superficies asfaltadas, tipo y estado de las carreteras, establos, vertederos de residuos sólidos urbanos, escombreras, gasolineras, centros turísticos, cementerios, pistas deportivas, campos de golf, canteras, subestaciones eléctricas, población en diseminado, urbanizaciones, áreas de aparcamiento o depósito de vehículos, depósitos de desechos de animales.

**EVALUACIÓN Y CARTOGRAFÍA DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN
DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LOS ACUÍFEROS
DE LA SIERRA DE LÍBAR, SIERRA DE MIJAS Y RÍO VÉLEZ**

**8. EVALUACIÓN Y CARTOGRAFÍA DEL RIESGO DE
CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS
DEL ACUÍFERO DE LA SIERRA DE LÍBAR**

8.1. CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO FÍSICO Y HUMANO DEL ACUÍFERO DE LA SIERRA DE LÍBAR

8.1.1. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La sierra de Líbar ocupa una extensión de 89 km² en el sector occidental de la serranía de Ronda, en el límite de las provincias de Málaga y Cádiz, donde se encuentran los núcleos de Villaluenga del Rosario, al oeste, Montejaque y Benaoján al norte, Jimera de Líbar al este y Cortes de la Frontera al sur (figura 8.1 y mapa 1L). La zona de estudio aparece representada en la hoja 1050 (Ubrique) y 1064 (Cortes de la Frontera) del Instituto Geográfico Nacional a escala 1/50.000. El mapa Topográfico de Andalucía a escala 1/10.000 incluye el acuífero de la Sierra de Líbar en las hojas 1050 (2-4), 1050 (3-3), 1050 (3-4), 1050 (4-2), 1050 (4-3), 1050 (4-4), 1064 (2-1), 1064 (2-2), 1064 (3-1), y 1064 (3-2), entre las coordenadas UTM 285800-4054000 y 301700-4070500.

Los accesos a esta zona tienen lugar por carretera, desde el Sur, hasta Cortes de la Frontera a través de la A-373 y, desde el Norte, por la carretera MA-555 que conecta Benaoján con Ronda. La conexión entre las localidades del interior de la zona de estudio se realiza a través de la carretera MA-549 entre Cortes de la Frontera y Jimera de Líbar, MA-501 entre Jimera de Líbar y Benaoján, la carretera MA-506 entre Montejaque y Benaoján, y la MA-505 que conecta Montejaque con la A-372 camino de Grazalema. Todos los accesos por carretera tienen lugar por el sector oriental de la sierra, al igual que ocurre con el ferrocarril, el cual pasa por las estaciones de las localidades de Benaoján, Jimera de Líbar y Cortes de la Frontera aprovechando el valle del río Guadiaro (Mapa 1L).

El área de estudio se enmarca en un entorno de especial calidad ambiental y paisajística por lo que ha sido incluida dentro de los Espacios Naturales Protegidos de Andalucía. En ella hay diversas figuras de protección, tanto a escala local, como a escala internacional. La sierra de Líbar es el sector más oriental del Parque Natural de la sierra de Grazalema, la cual ha sido declarada Reserva de la Biosfera por la UNESCO. La sierra de Líbar también se incluye en el catálogo de Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA) como parte de la sierra de Grazalema (ES0000031) y es Lugar de Interés Comunitario (LIC) también dentro de la sierra de Grazalema (ES0000031). Dentro del Plan Especial del Medio Físico de la Provincia de Málaga, la sierra de Líbar se configura como Complejo Serrano CS-1 por su interés hidrogeológico, geomorfológico, botánico, faunístico y paisajístico. Algunos elementos dentro de la sierra de Líbar tienen otra figura de protección según el mismo plan, como ocurre en los casos del Cerro de Tavizna situado en el borde norte de la sierra y denominado Paraje Sobresaliente PS-4, por sus cualidades geológicas, faunísticas y paisajísticas y la Cueva de la Pileta, un yacimiento arqueológico de interés científico por su importancia geológica y arqueológica denominado YA-2.

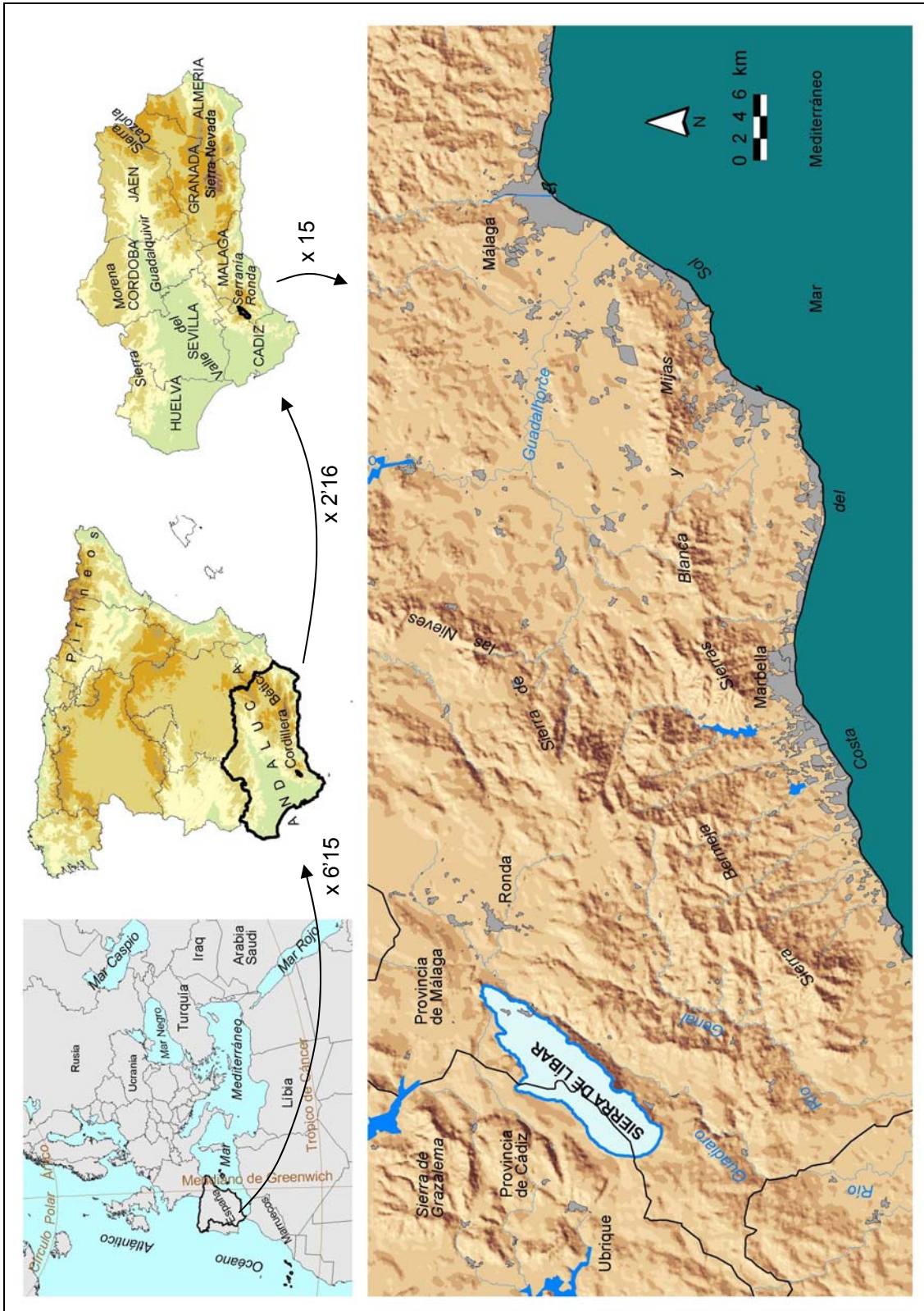
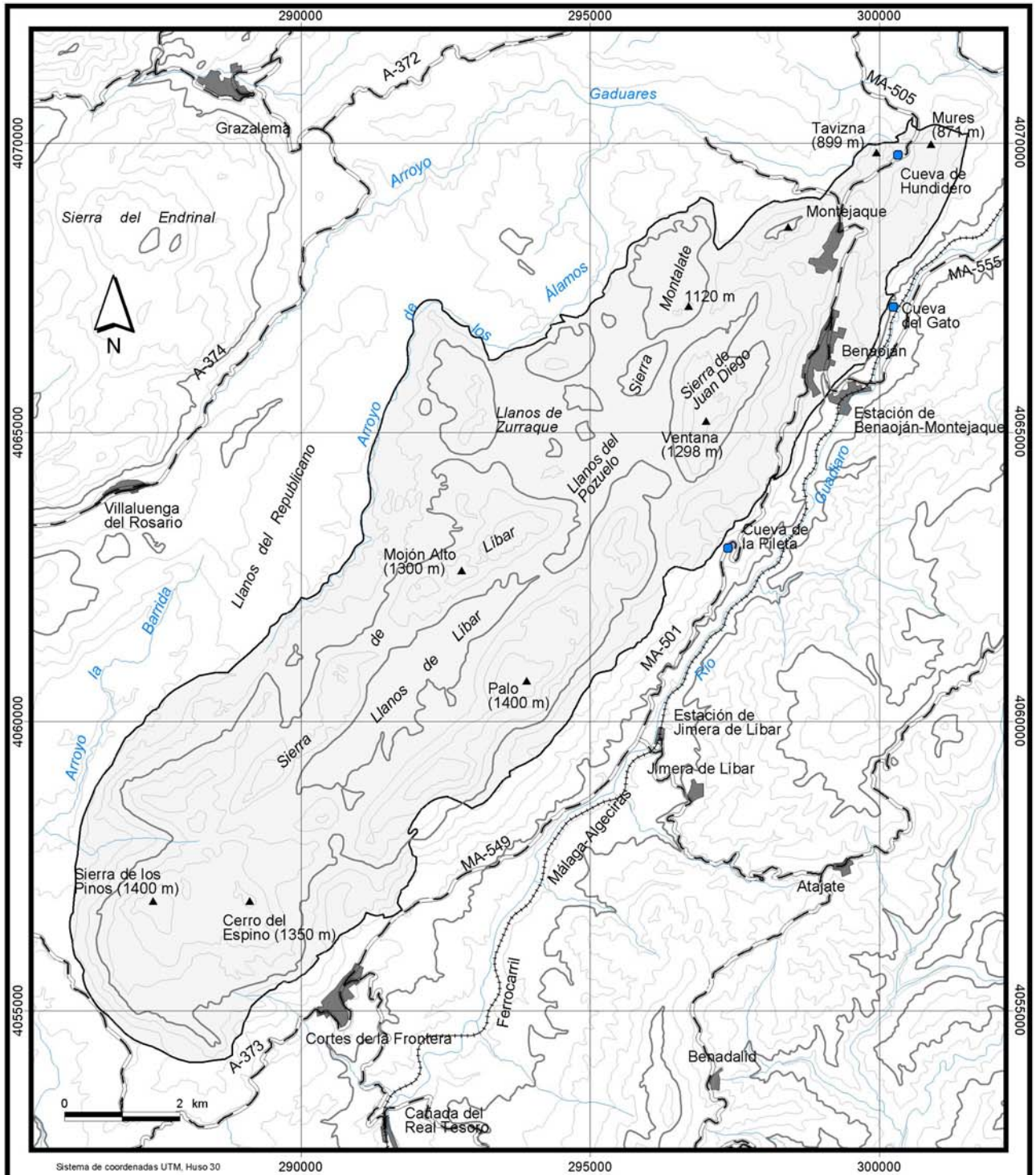


Figura 8.1. Localización de la sierra de Líbar.



Sistema de coordenadas UTM, Huso 30

- | | |
|--------------------------------------|-------------------|
| ▲ Vértice geodésico | — Ferrocarril |
| ● Cueva | — Carretera |
| — Ríos y arroyos | ■ Núcleo urbano |
| — Curva de nivel Equidistancia 100 m | ■ Área de estudio |
| — Curva de nivel maestra (500 m) | |

Fuente:
Mapa Digital de Andalucía (1999)

MAPA
Nº 1L

Acuífero de la sierra de Libar

TOPOGRÁFICO

TESIS DOCTORAL
Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG.
Aplicación en acuíferos del Sur de España

8.1.2. RELIEVE: ALTITUD Y PENDIENTE

La sierra de Líbar presenta una orientación NE-SO y unas dimensiones de 22 km de longitud máxima y 7 km de anchura máxima. Esta formada por dos alineaciones montañosas paralelas a los bordes occidental y oriental de la zona de estudio, que dejan un área deprimida en la parte central, denominada Llanos de Líbar y Llanos de Pozuelo (mapa 2L).

En la mitad oriental, las sierras que forman la alineación montañosa son, de sur a norte, son la sierra de Blanquilla (1350 m en el Cerro del Espino), la sierra del Palo (1400 m), sierra de Juan Diego (1300 m en el pico Ventana) y el cerro de Mures (870 m) en el límite norte de la zona de estudio. La alineación del sector occidental está constituida por la sierra de los Pinos (1400 m), la sierra de Líbar (1300 m en Mojón Alto), la sierra de Montalate (1120 m), la cima del Hacho (1050 m) y el cerro Tavizna (900 m) en el límite septentrional. En ambas alineaciones se observa una disminución progresiva desde el Sur (1400 m) hasta el Norte (900 m), lo cual equivale a un desnivel relativo de 500 m. El desnivel absoluto entre el punto más elevado (1400 m en la sierra de los Pinos) y el más deprimido (450 m en el manantial de Benaoján junto a la localidad del mismo nombre) es de 950 m. La parte central de la zona de estudio se encuentra deprimida respecto a las alineaciones montañosas, de forma que los sectores con menor altitud en los Llanos de Líbar están a 950 m y en los Llanos de Pozuelo a 900 m (mapa 3L).

La curva hipsométrica (figura 8.2) de la sierra de Líbar tiene una baja inclinación debido a la estructura geológica que favorece este tipo de relieve.

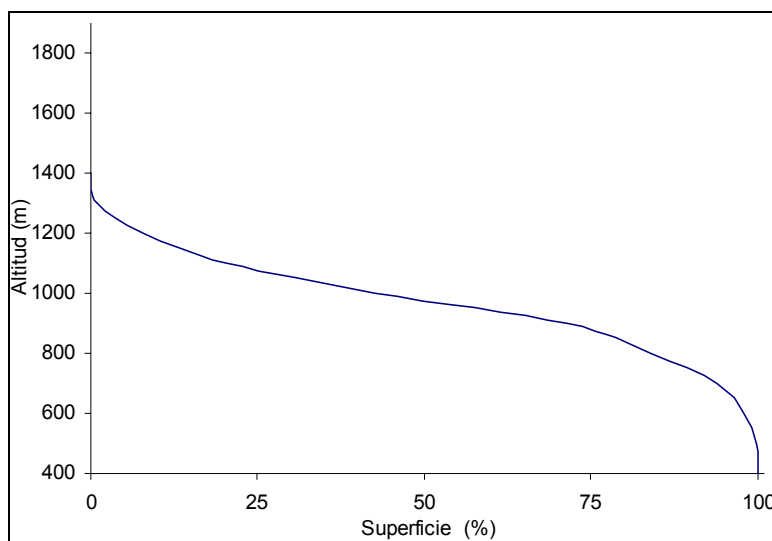
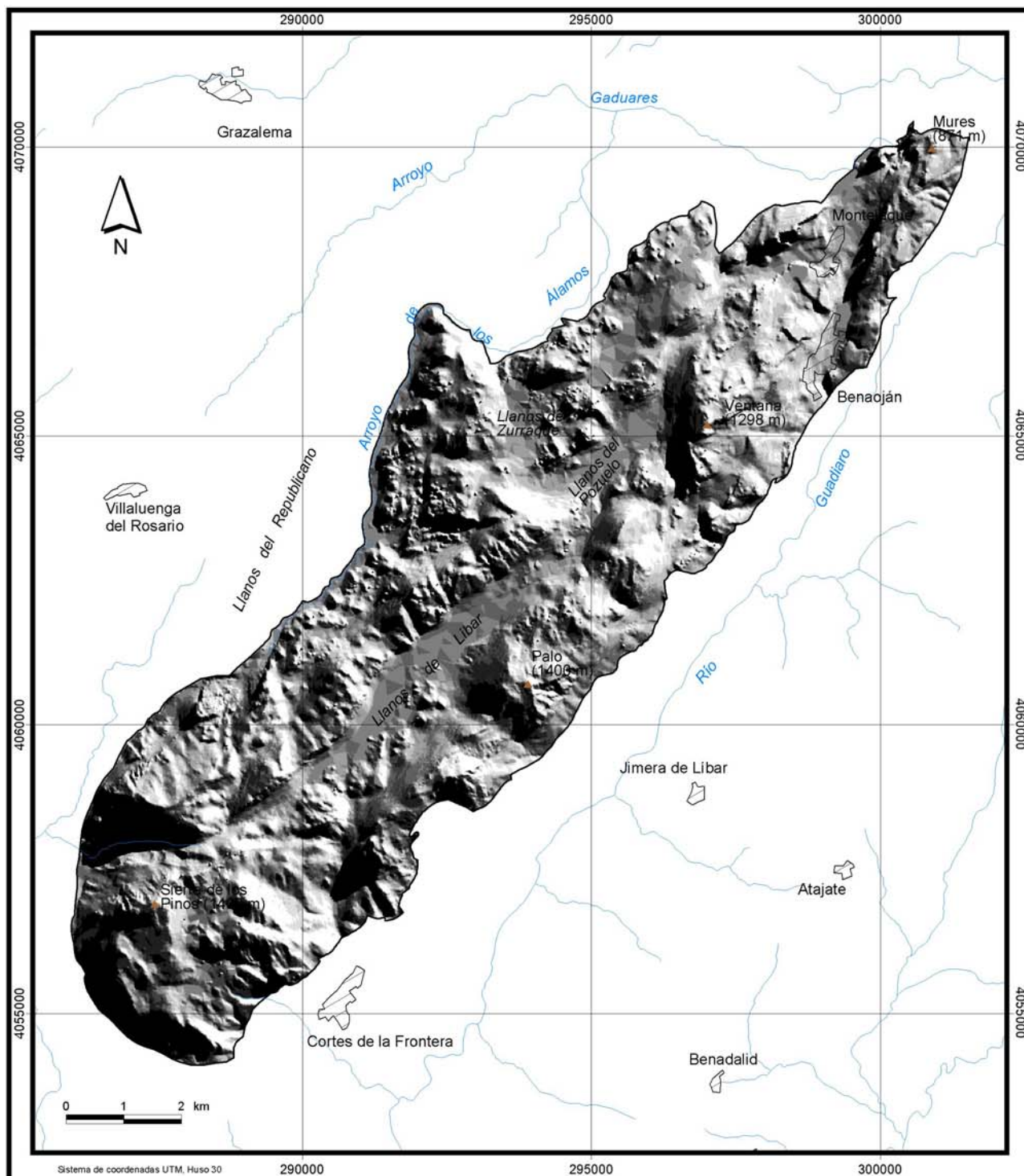


Figura 8.2. Curva hipsométrica de la sierra de Líbar.



Sistema de coordenadas UTM, Huso 30

Valores de iluminación Azimut: 45° Altitud: 20°	MAPA Nº 2L	
	Acuífero de la sierra de Libar	
	RELIEVE	
	TESIS DOCTORAL Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España	

En función de los intervalos de altitud de la figura 8.3 (izquierda) se observa que la mayor parte de la zona de estudio (75%) está comprendida entre 800 y 1200 m s.n.m. La altitud media es 950 m y el intervalo de 900-1000 m es el que representa un mayor porcentaje de superficie (casi un 30%), debido a la existencia de los Llanos de Líbar y Pozuelo en el sector central de la sierra, lo cual muestra la importancia de estas zonas deprimidas en el área de estudio.

La sierra de Líbar presenta, en general, una pendiente media elevada como consecuencia de un relieve montañoso y abrupto. En el mapa 4L, se puede observar que las zonas de menor pendiente son los llanos de Líbar, Pozuelo, Burfo y Zurraque, donde predominan pendientes inferiores al 15%. En la figura 8.3 (derecha) se observa un elevado porcentaje de las áreas con baja pendiente, si se tiene en cuenta el carácter montañoso de la sierra.

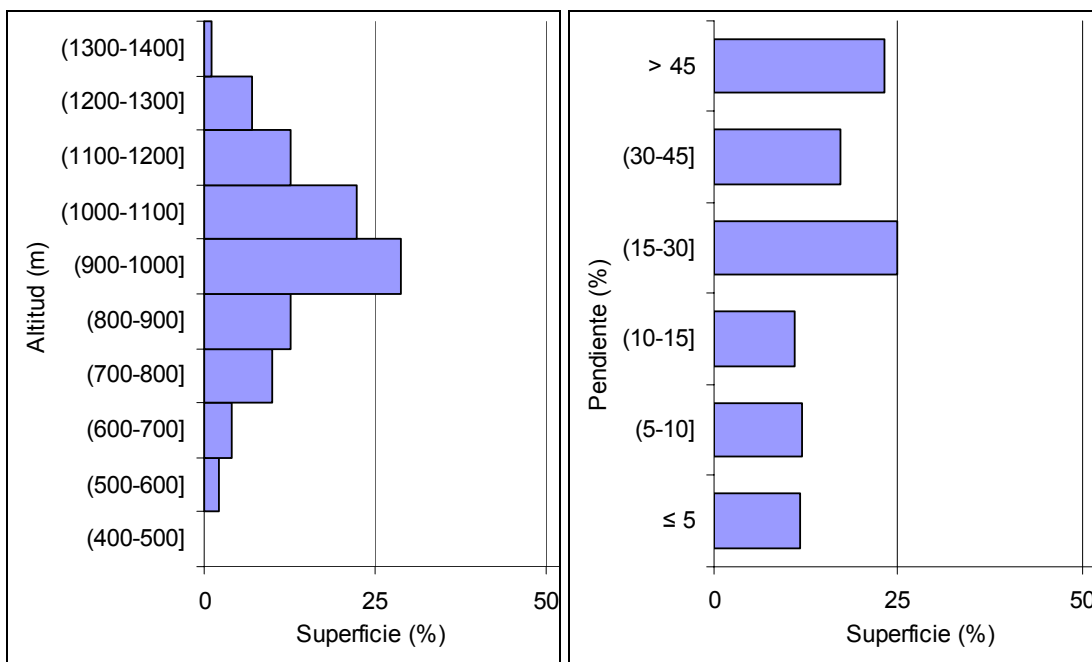
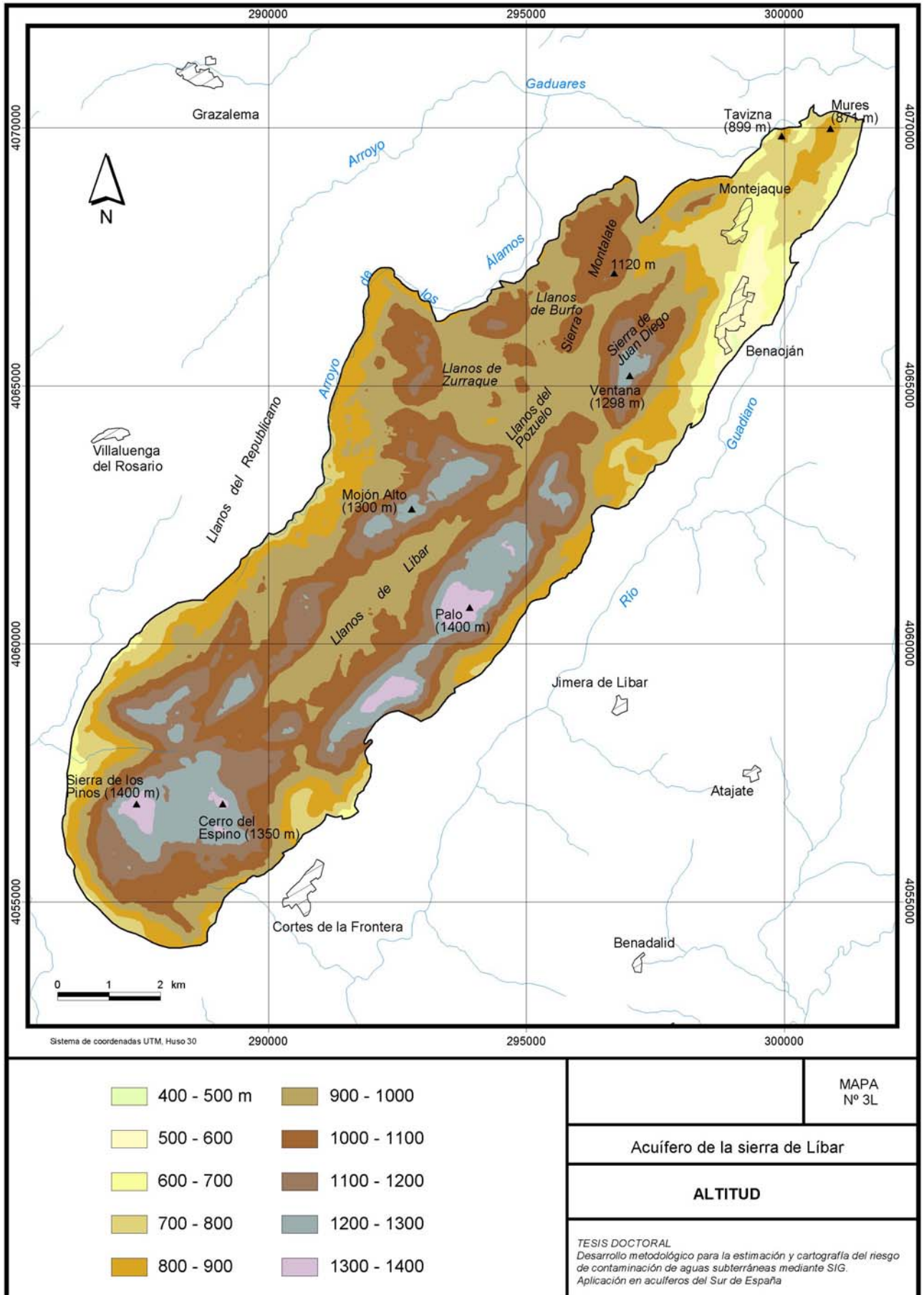
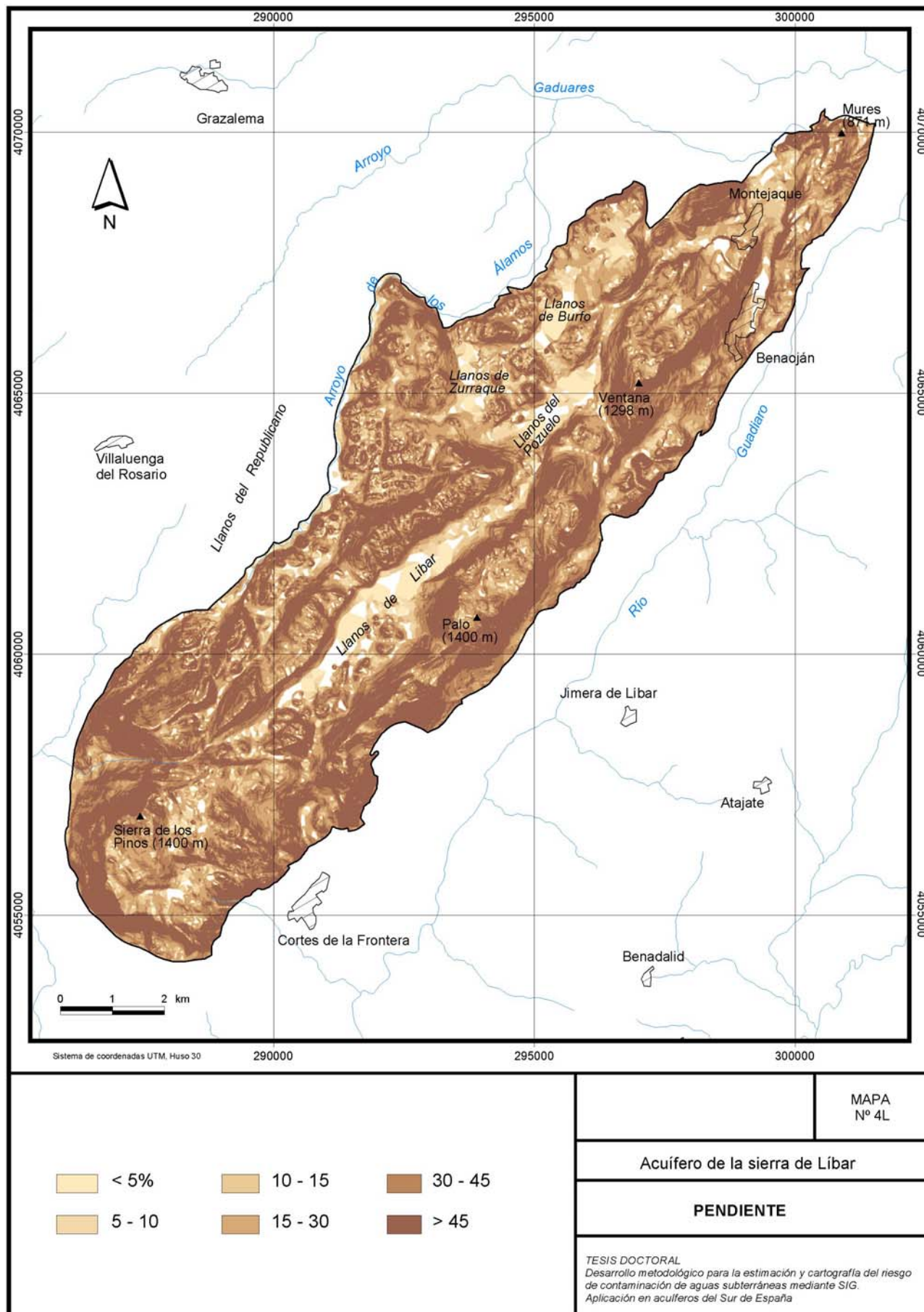


Figura 8.3. Porcentaje de superficie en función de la altitud (izquierda) y de la pendiente (derecha) en la sierra de Líbar.





8.1.3. CLIMA: PRECIPITACIÓN

8.1.3.1. INVENTARIO DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS

Para el análisis de la precipitación se han utilizado un total de cinco estaciones (cuadro 8.1) localizadas alrededor de la sierra, pero de forma predominante en la vertiente oriental (figura 8.4). Los datos de precipitación son valores anuales correspondientes al periodo comprendido entre 1970 y 2000, obtenidos a partir de los datos publicados en la página web de la Confederación Hidrográfica del Sur de España (CHSE), actualmente denominada Agencia Andaluza del Agua. En el caso de que falte algún valor de precipitación, para un año determinado, se ha utilizado la expresión recogida en Claver (coord.) (1991).

Estación pluviométrica	Altitud (m s.n.m.)	Coordenada	
		X	Y
Cueva de la Pileta (Benaoján)	920	297200	4063600
Montejaque	530	299100	4068000
Jimera de Líbar	429	296800	4058800
Majada de Bañuelos (Cortes de la Frontera)	520	290600	4055000
Villaluenga del Rosario	865	287064	4064031

Cuadro 8.1. Estaciones meteorológicas en el acuífero de la sierra de Líbar.

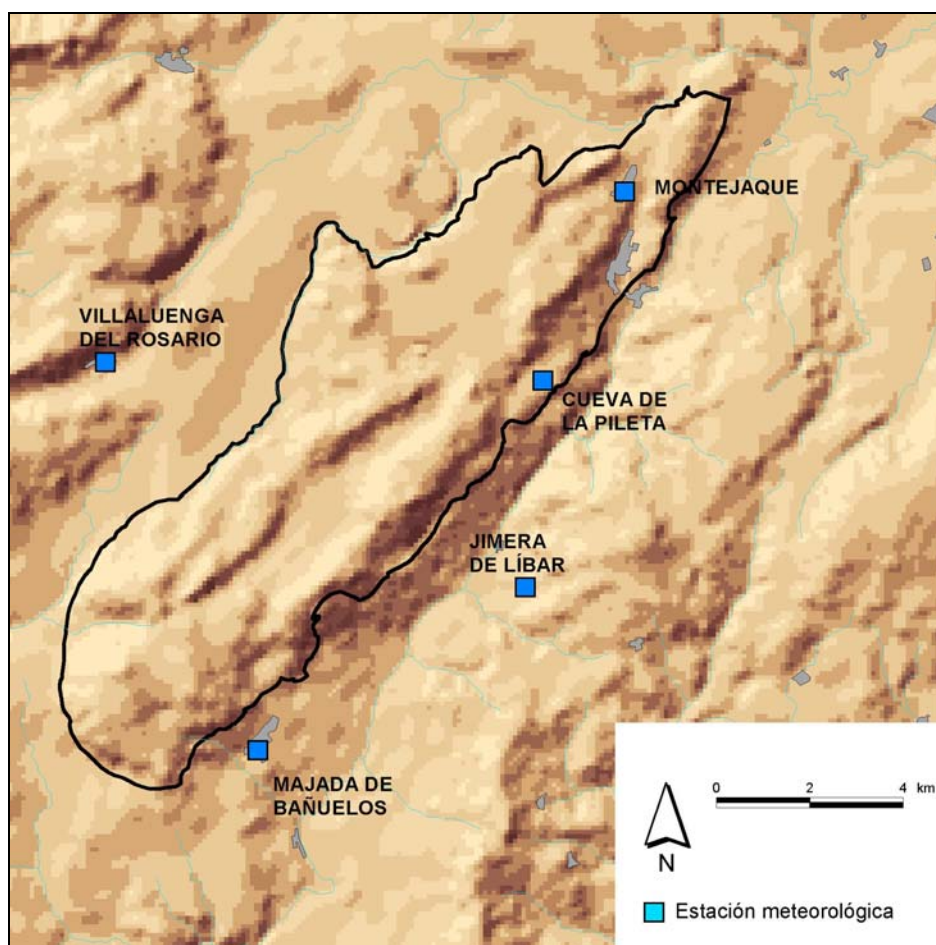


Figura 8.4. Localización de las estaciones meteorológicas en la sierra de Líbar y su entorno.

8.1.3.2. ANÁLISIS DE LAS PRECIPITACIONES

A partir de los datos del cuadro 8.2 se ha realizado el análisis de la precipitación en la sierra de Líbar y se han clasificado los años, en húmedos o secos, en función de que la precipitación anual sea un 15 % superior o inferior a la media, respectivamente

Año hidrológico	Jimera de Líbar	Majada de Bañuelos	Montejaque	Cueva de la Pileta	Villaluenga del Rosario	Sierra de Líbar
1970/71	1218	1747	699	1779	1693	1386
1971/72	1060	2055	588	1275	1516	1263
1972/73	778	1886	552	1078	1825	1165
1973/74	702	1765	415	973	1239	962
1974/75	706	1653	341	840	1027	871
1975/76	970	1669	591	1185	1174	1084
1976/77	1268	2677	746	1725	2280	1610
1977/78	1346	2477	628	1598	1979	1516
1978/79	1358	3055	678	1829	1920	1648
1979/80	821	1896	563	1095	1449	1121
1980/81	682	1235	416	759	1082	799
1981/82	941	1437	452	1192	1331	1019
1982/83	751	1413	379	991	988	864
1983/84	1215	1928	1012	1451	1477	1352
1984/85	1340	2032	961	1912	546	1320
1985/86	1164	1702	735	1458	2123	1348
1986/87	992	1701	772	1270	1568	1218
1987/88	1241	2291	836	1513	1650	1438
1988/89	997	1740	242	1072	1118	1010
1989/90	1219	2852	531	1812	1388	1553
1990/91	1116	2116	565	1334	1187	1210
1991/92	735	1759	448	979	1162	981
1992/93	793	1545	408	798	1009	881
1993/94	747	1554	506	909	1315	960
1994/95	444	983	290	563	872	604
1995/96	1869	3413	1226	2108	2613	2085
1996/97	1800	2830	1257	2168	2045	1940
1997/98	1483	2741	1023	2026	2419	1821
1998/99	151	1152	31	660	697	538
1999/00	612	1778	483	1226	1126	938
Promedio ¹	1032	1972	624	1319	1461	1217
Promedio ²	1017	1969	613	1319	1461	1217
Año húmedo	1170	2265	704	1517	1680	1399
Año seco	865	1674	521	1121	1242	1034

Cuadro 8.2. Datos de lluvia de las estaciones seleccionadas para el análisis de la precipitación. En negrita se han marcado los valores estimados. En azul se han resaltado los años húmedos y en amarillo los años secos. En la parte baja del cuadro se muestran los valores medios de las series de datos, sin los valores estimados (1) y con los valores estimados (2), y los valores límite de precipitación para considerar los años húmedos y secos.

El año 1996/1997 se ha considerado como representativo de un periodo de altas precipitaciones. El valor medio de precipitación anual en las estaciones analizadas es 1217 mm (cuadro 8.2). La mayor precipitación (1972 mm) tiene lugar en la estación de Majada de Bañuelos (Cortes de la Frontera) y la mínima en Montejaque (624 mm de media anual).

En la figura 8.5, se presenta la evolución de los valores de precipitación anual en la sierra de Líbar. En general, se observa una fuerte irregularidad interanual en las precipitaciones. El periodo de 1995/1996 a 1998/1999 es de máximas precipitaciones, superiores a las de 1989/1990 o las ocurridas entre 1976/1977 y 1978/1979. Los años hidrológicos de menores precipitaciones durante la última década se han producido inmediatamente antes y después del periodo de máximas precipitaciones de finales de los noventa. Los años 1994/1995 y 1998/1999 se caracterizan por ser años con muy escasas precipitaciones, inferiores a los 600 mm, la mitad del promedio anual.

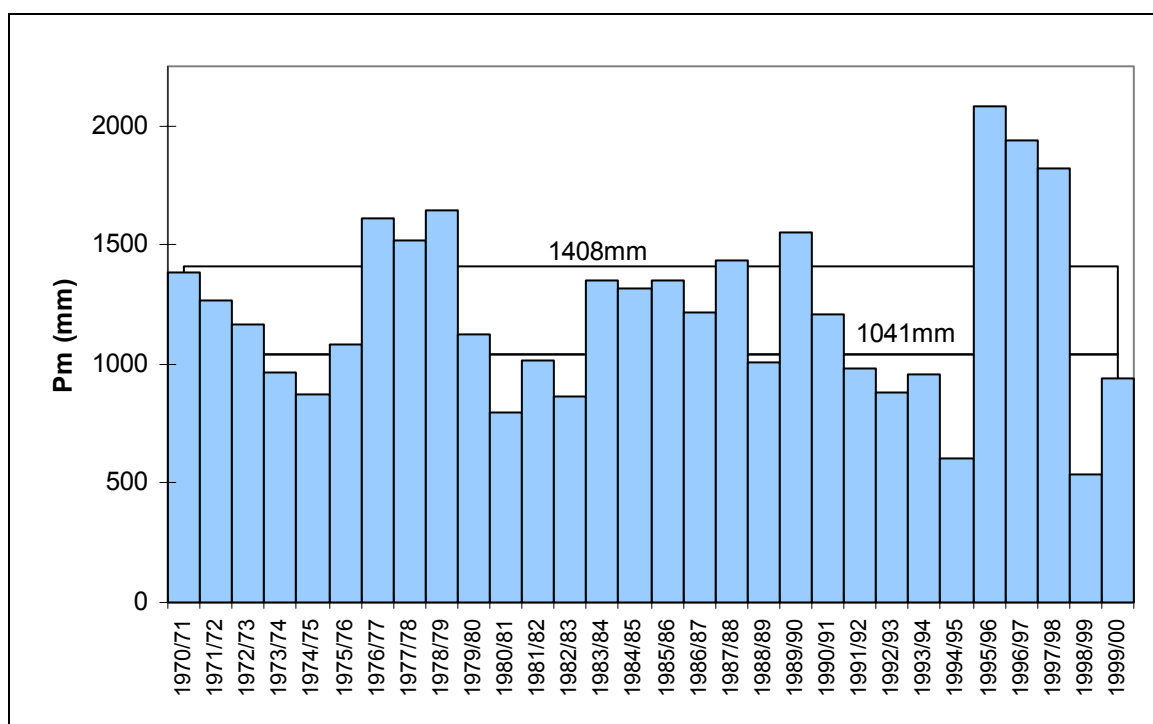
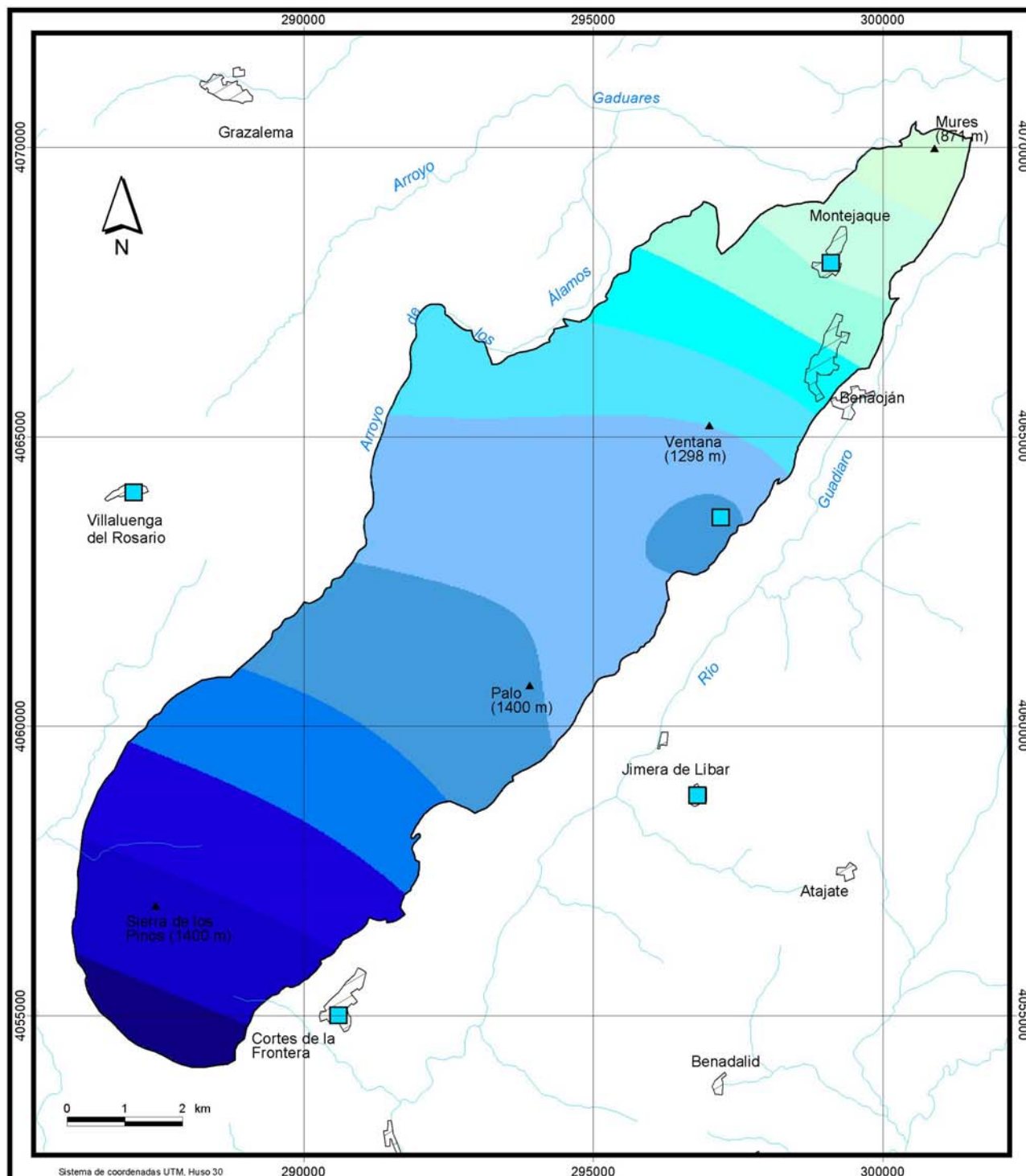


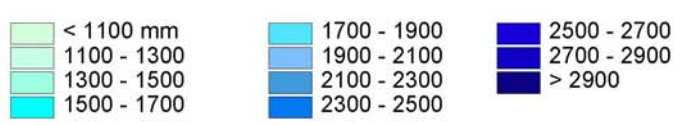
Figura 8.5. Evolución temporal de la precipitación anual en la sierra de Líbar.

La precipitación media en el acuífero de la sierra de Líbar es 2100 mm durante el año 1996/1997, según los datos del modelo digital elaborado. Las mayores precipitaciones tienen lugar en la parte sur de la sierra con valores cercanos a 3000 mm y disminuyen de forma progresiva hacia el norte hasta alcanzar valores inferiores a 950 mm. Estos datos demuestran que el sector SW del acuífero recibió el triple de precipitaciones que NE. La disminución de las precipitaciones parece estar relacionada con la altitud, por la cual disminuye la precipitación de Sur a Norte, al igual que la altura de la sierra.



Sistema de coordenadas UTM, Huso 30

Precipitación media = 2100 mm



MAPA N° 5L

Acuífero de la sierra de Libar

PRECIPITACIÓN EN EL AÑO 1996/1997

TESIS DOCTORAL
 Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG.
 Aplicación en acuíferos del Sur de España

Durante el año 1996/1997 se registró un promedio de 65 días con lluvia en las estaciones del área de estudio (cuadro 8.3). La estación donde llovió un mayor número de días fue la de Cueva de la Pileta y en la que el número de días con lluvias fue menor Montejaque.

Estación pluviométrica	Número de días lluviosos En el año 1996/1997
Jimera de Líbar	64
Majada de Bañuelos	71
Montejaque	51
Pileta	72
Villaluenga del rosario	67
Promedio de días con lluvia	65

Cuadro 8.3. Número de días con lluvia en los meses del año 1996/1997 en la sierra de Líbar.

8.1.4. GEOLOGÍA

La geología de la sierra de Líbar ha sido objeto de varios estudios entre los cuales caben destacar los de Martín (1987) y Sánchez *et al.* (1998), trabajos básicos para la caracterización geológica de la zona de estudio que se lleva a cabo en este epígrafe.

La sierra de Líbar se localiza en el extremo occidental de la Zona Externa de la Cordillera Bética y pertenece al dominio Penibético, la parte más occidental del Subbético Interno.

8.1.4.1. LITOLOGÍA

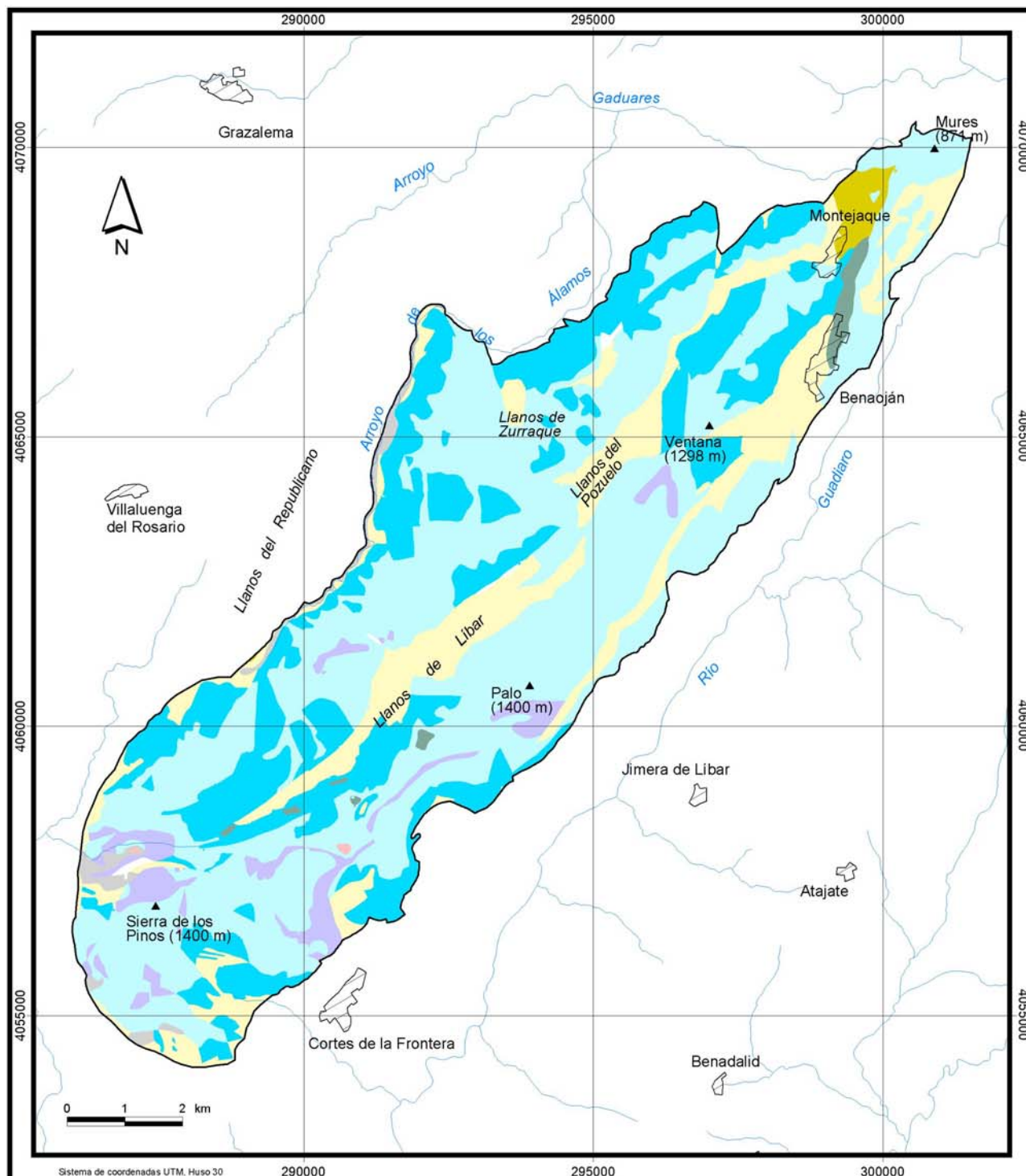
La serie estratigráfica del Penibético se divide en tres grupos de muro a techo (Martín, 1987): Hidalgo, Líbar y Espartina.

El Grupo de Hidalgo está formado por materiales triásicos: calizas del Muschelkalk y arcillas con evaporitas del Keuper. En la zona de estudio tiene muy poca representación y solamente afloran en un pequeño sector en la mitad meridional de la zona de estudio, concretamente, en la sierra Blanquilla al sureste de los Llanos de Líbar (mapa 6L).

El Grupo de Líbar aflora en el 80 % de la superficie de la zona de estudio. Está formado por materiales carbonáticos del Jurásico al que pertenecen tres formaciones.

La formación inferior se denomina Jarastepar y está constituida por dolomías de color grisáceo, de edad Lías, que afloran en la sierra de los Pinos, en la parte sur de la zona de estudio. Hacia muro, esta formación presenta una dolomía de grano fino que incrementa el tamaño de grano y se hace más masiva hacia techo. Los límites estratigráficos de las dolomías son difusos y se confunden entre las calizas. La dolomitización suele afectar a los 100 m inferiores del grupo de Líbar pero puede alcanzar el techo.

Sobre la Formación Jarastepar se sitúa estratigráficamente la Formación Endrinal que aflora en un 50% de la superficie de la sierra y está formada por calizas blancas oolíticas y calizas micríticas del Dogger. En las calizas es común la presencia de bioclastos, corales, algas y foraminíferos característicos de las facies neríticas, que aumentan la porosidad primaria. El espesor de la serie varía entre los 200 y los 300 m.



Sistema de coordenadas UTM, Huso 30

- Arcillas. Cuaternario
- Canchales, coluviones y conos de deyección. Cuaternario
- Flysch. Arcillas y calizas. Oligoceno
- Calizas margosas y margocalizas. Facies capas rojas. Cretácico superior
- Calizas nodulosas. Jurásico (Malm)
- Calizas oolíticas. Jurásico (Dogger)
- Dolomías. Jurásico (Lías)
- Margas y Arcillas. Triásico (Keuper)

Fuente:
Mapas geológicos serie Magna
Hojas 1050 y 1064 Escala 1/50.000

MAPA
Nº 6L

Acuífero de la sierra de Libar

LITOLOGÍA

TESIS DOCTORAL
Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España

El tramo superior del grupo de Líbar se denomina Formación Torcal por la semejanza que presenta con el relieve de la sierra del Torcal de Antequera, es de edad Malm y aflora en una cuarta parte de la zona de estudio. Está formada por calizas de facies pelágicas con presencia de fósiles marinos como ammonites y foraminíferos. El espesor de esta formación supera los 200 metros en los sectores de mayor potencia. Hacia muro predominan las calizas nodulosas y, en menor proporción, calizas nodulosas brechoides y estromatolitos. Hacia techo hay un tramo de mayor espesor formado, principalmente, por calcarenitas compactas blancas y grises con abundantes fósiles o bioclastos y, localmente, calizas nodulosas.

Dentro del tercer grupo de materiales que afloran en la sierra de Líbar, Grupo Espartina, de muro hacia techo se pueden diferenciar dos formaciones: capas blancas y capas rojas.

La Formación Capas Blancas, del Cretácico medio, tiene poco espesor en la sierra de Líbar y aflora sólo de forma puntual. Tiene un espesor máximo de 20 m que se reduce hasta unos pocos metros en el sector septentrional y áreas externas de la sierra. Estratigráficamente se sitúa sobre las calizas nodulosas de la Formación Torcal y está compuesta por margas y margocalizas.

La Formación Capas Rojas aflora en un 16 % de la superficie de la zona de estudio y está constituida básicamente por margas y margocalizas del Cretácico Superior. El espesor varía entre 150 y 200 m.

Los sedimentos terciarios en la sierra de Líbar son de tipo flysch (arcillas con bloques de calizas) y afloran en las inmediaciones de la localidad de Montejaque (mapa 6L).

Por último, los materiales cuaternarios están representados por depósitos de piedemonte, debido a la meteorización física de las rocas (Delannoy, 1998) y en menor medida a depósitos aluviales y coluviales. El cuaternario sólo representa el 2% de la superficie de la sierra y se localiza, principalmente, en el polje de Benaoján y en el sector de la sierra de los Pinos, en la parte sur de la zona de estudio.

8.1.4.2. ESTRUCTURA GEOLÓGICA Y TECTÓNICA

La sierra de Líbar presenta una estructura formada por anticlinales y sinclinales de orientación NE-SW (figura 8.6), cuyos ejes se inclinan ligeramente hacia el NE. Los principales relieves de la zona están formados por dos grandes anticlinales en cofre con charnela plana y flancos verticalizados, que dan lugar a la sierra de los Pinos, Líbar y Montalate en el sector occidental y Blanquilla, del Palo y Juan Diego en la mitad oriental.

En la parte central de la sierra, entre los anticlinales, se localiza una estructura sinclinal delimitada por fallas que da lugar a un área deprimida ocupada por margocalizas del Cretácico.

La sierra presenta una intensa fracturación (figura 8.6) que afecta principalmente a los materiales del Jurásico, aunque hay signos evidentes de fallas recientes que han afectado a los sedimentos cuaternarios (ITGE, 1987 y 1991). Hay fallas longitudinales a lo largo de los pliegues que hacen aflorar las calizas jurásicas y se forman semiorsts.

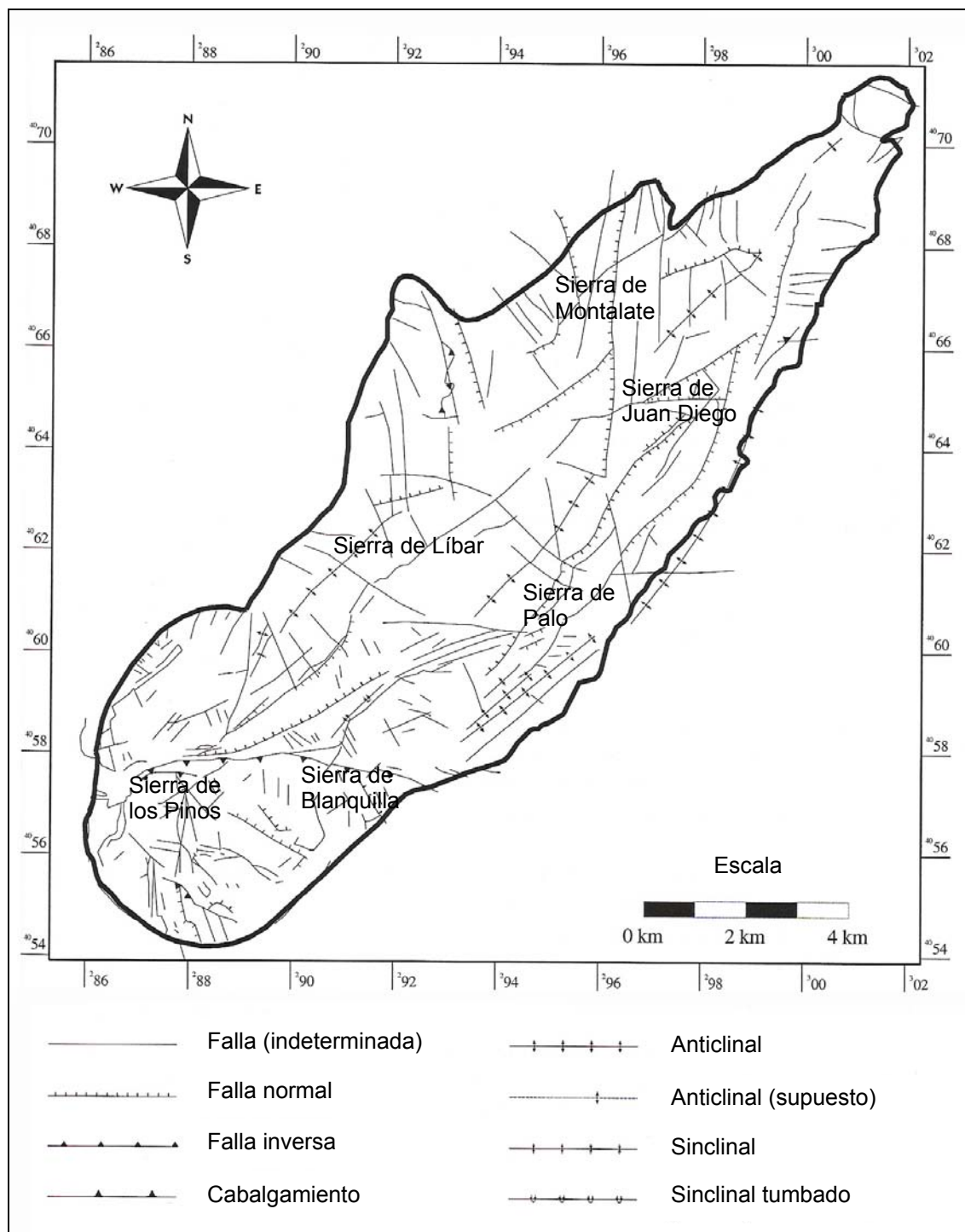


Figura 8.6. Esquema estructural de la sierra de Líbar según el mapa geológico del IGME a escala 1/50.000. Tomado de Brechenmacher (2002).

8.1.4.3. GEOMORFOLOGÍA: MODELADO KÁRSTICO

La sierra de Líbar se caracteriza por el importante grado de karstificación que presentan los materiales carbonáticos, tanto en superficie como en profundidad, y afecta principalmente a las calizas nodulosas de la Formación Torcal. Las principales formas exokársticas son lapiaces, dolinas, poljes y las endokársticas sumideros, simas o ponors y cuevas (mapa 7L).

8.1.4.3.1. FORMAS EXOKÁRSTICAS

La Sierra de Líbar presenta un relieve kárstico muy desarrollado y variado, de manera preferencial en las charnelas de los anticlinales donde las calizas están casi o completamente horizontales. En las charnelas, donde los estratos tienen algo de inclinación, es común la presencia de, lo que Delannoy (1987) denominó, *banquettes* de corrosión, como ocurre en la vertiente occidental de la zona de estudio (foto 8.1-A). Además, se han desarrollado otras formas espectaculares de tipo torcal: pila de platos y pináculos (foto 8.1-B). Otro elemento que caracteriza a la sierra y que está muy presente en toda su superficie, sobre todo en los pliegues anticlinales, es la existencia de lapiazes (foto 8.1-C y D).

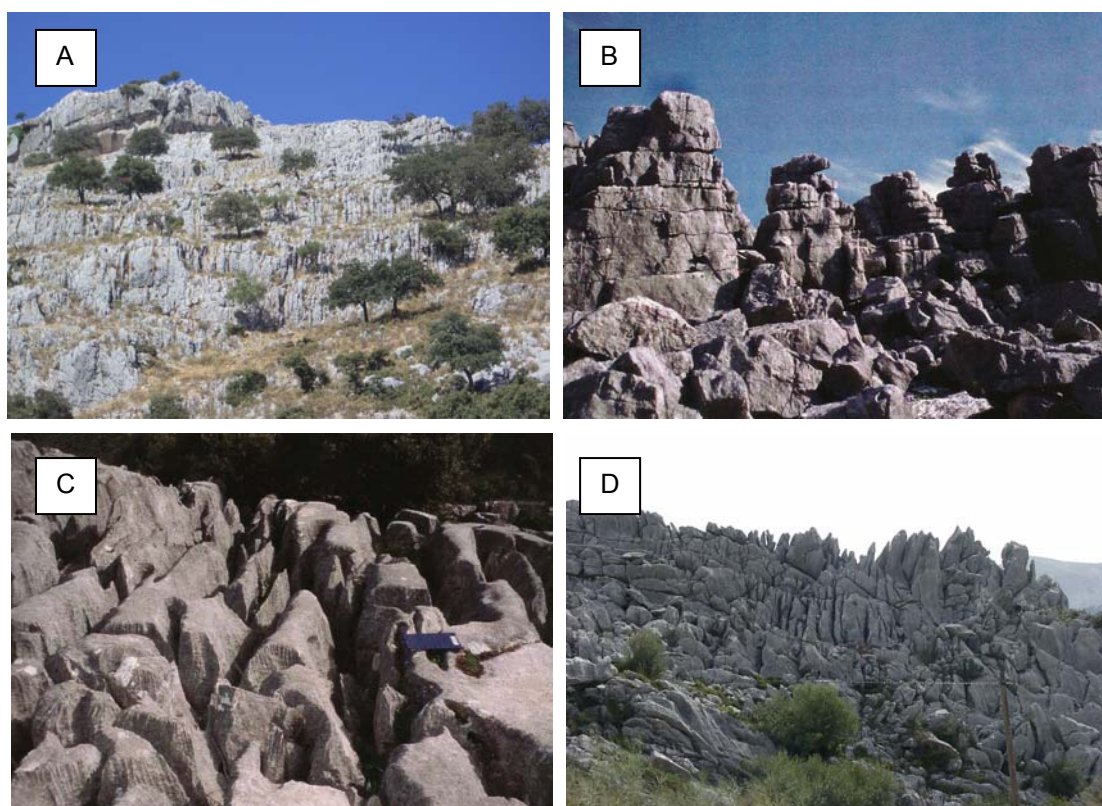
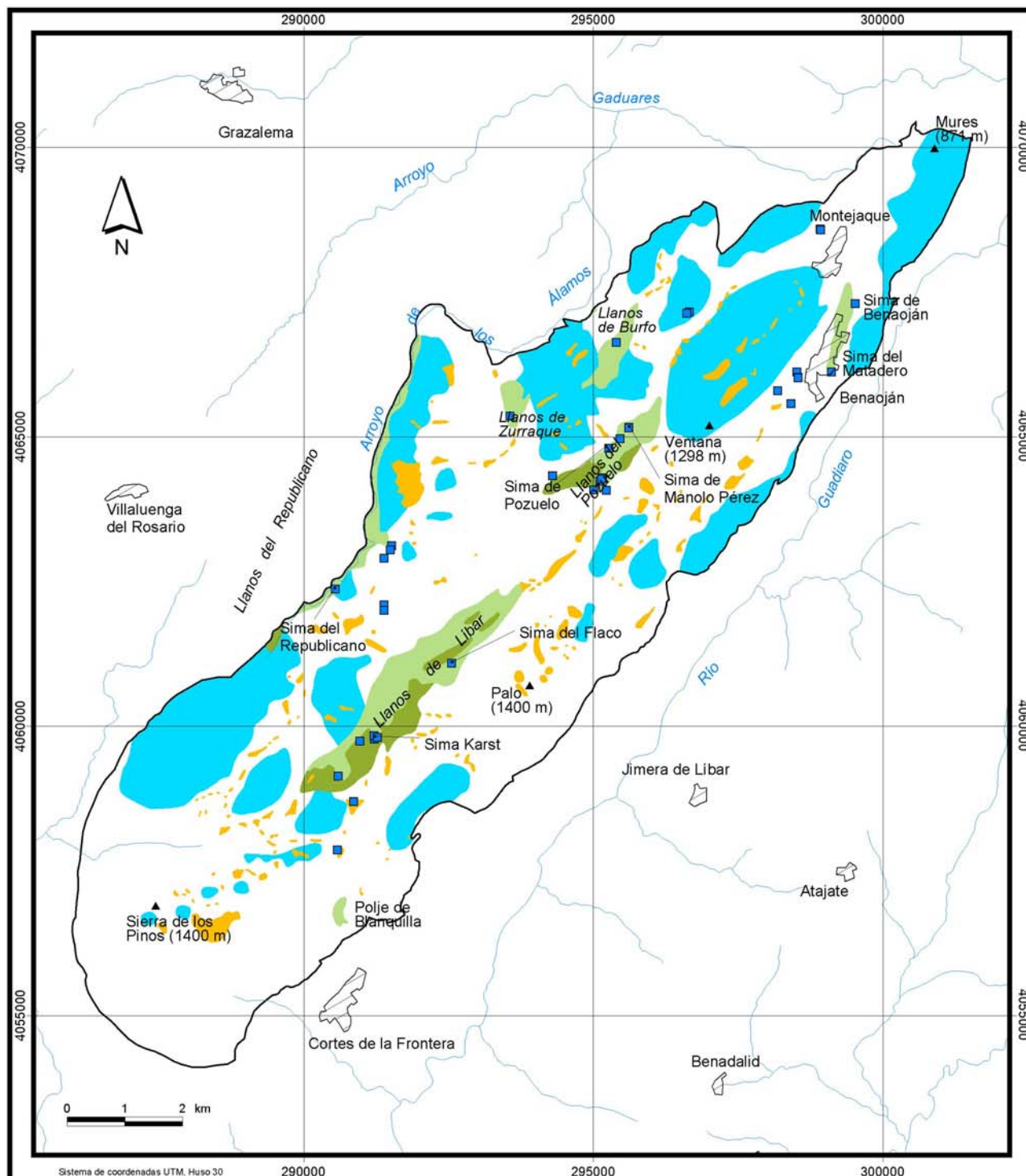


Foto 8.1. Paisaje kárstico en *banquettes* al norte del polje de Burfo (A), pináculos en la sierra de Juan Diego (B), lapiaz en el monte de las Canchas al Este del polje de Benaoján (C) y lapiaz en la sierra de Juan Diego (D).

Las dolinas son otra morfología kárstica muy presente en la sierra de Líbar. Estas depresiones cerradas, con drenaje subterráneo, tienen formas y tamaños muy diferentes. El diámetro varía entre metros y centenares de metros y su génesis puede ser por colapso o disolución superficial de los carbonatos. En cualquier caso, están muy presentes en los afloramientos de calizas, mientras que en las dolomías suelen manifestarse como pequeñas depresiones que no alcanzan relevancia individualmente pero forman campos de dolinas, como por ejemplo en la sierra de los Pinos o en sierra Blanquilla.



Sistema de coordenadas UTM, Huso 30

- Sima, sumidero
- Dolina
- Lapiaz
- Paleopolje
- Polje

Fuente:
modificado de Delannoy (1987)

MAPA
Nº 7L

Acuífero de la sierra de Libar

GEOMORFOLOGÍA

TESIS DOCTORAL
Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo
de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG.
Aplicación en acuíferos del Sur de España

Los poljes tienen una gran importancia en la vulnerabilidad del acuífero frente a la contaminación. Los poljes tienen una génesis estructural relacionada con fosas o semifosas tectónicas cubiertas por sedimentos aluviales, en el caso del polje de Benaoján, o por margocalizas cretácicas, como ocurre en los poljes de Líbar, Pozuelo, Burfo (o Montalate), Zurraque, de la Pileta y Republicano, este último al Oeste de la zona de estudio.

El polje más importante es el de Líbar con una superficie de 3'5 km². Está localizado en el sector central de la sierra y es drenado por un arroyo que se infiltra en varios sumideros. En este polje se pueden diferenciar varios niveles en función de los distintos periodos de su evolución; así, se pueden distinguir paleopoljes y paleoponors en los sectores más meridionales de los Llanos de Líbar (Delannoy, 1987).

El polje de Pozuelo, de 1 km², no presenta cauce alguno que lo drene, pero después de un episodio de lluvias intensas se forman arroyos que se infiltran a través de diferentes sumideros en los bordes del mismo. El polje de Pozuelo se inscribe en el mismo contexto estructural que el de Líbar, pero queda separado de éste por un afloramiento de las calizas jurásicas.

En Benaoján hay un polje abierto en su extremo sur sobre una semifosa tectónica, entre las sierras de Juan Diego y la de Algarrobo. Este semipolje tiene dos paleoponors al Sur y Este denominados sima del Matadero y sima de Benaoján, respectivamente. El drenaje se realiza de forma difusa y, ocasionalmente, a través del arroyo de Montejaque, que tras intensos periodos de lluvia la escorrentía excede la capacidad de infiltración y supera el umbral calizo al sur del polje (Lhénaff, 1988).

Los poljes de Montalate o Burfo, Zurraque y Blanquilla son de menor entidad espacial y se encuentran localizados en fosas tectónicas. En otras áreas endorréicas (Oeste de la sierra de Líbar) no se han localizado simas activas y, probablemente, el drenaje subterráneo se realice de forma algo difusa en los carbonatos.

El polje del Republicano, situado entre la sierra de Líbar y Peralto (al Oeste de la zona de estudio), es drenado por el arroyo de los Álamos, el cual se infiltra por la sima del Republicano.

8.1.4.3.2. FORMAS ENDOKÁRSTICAS

La karstificación subterránea también está muy desarrollada en la sierra de Líbar, como lo demuestra la abundancia y magnitud que adquieren algunos sistemas espeleológicos.

Las simas están activas en un gran número de casos, es decir, recogen aguas de escorrentía que recargan al acuífero. En total hay localizadas 30 simas de las cuales se estima que casi la mitad son activas. Entre las más importantes destacan las simas del Republicano, Karst, del Flaco, Manolo Pérez, Pozuelo y de Benaoján por ser las que recogen mayor cantidad de agua. Merecen especial atención la sima del Republicano que drena la escorrentía del arroyo de los Álamos, en el flanco noroccidental de la sierra de Líbar, y la cueva de Hundidero por donde se infiltran las aguas del arroyo Gaduares al noroeste del cerro Tavizna.

Las cuevas pueden alcanzar un gran desarrollo, en especial la cueva de la Pileta y el sistema Hundidero-Gato, que llegan a alcanzar diámetros de varias decenas de metros.

La cueva de la Pileta, situada a 3 km al sur de la localidad de Benaoján, tiene casi 2 km de longitud. Se encuentra a 350 m de altura respecto del cauce del río Guadiaro y constituye un paleodren kárstico desconectado del actual sistema de drenaje subterráneo.

El Sistema de Hundidero-Gato está localizado en el sector septentrional de la zona de estudio y es uno de los más famosos de Andalucía por su elevada longitud (7,8 km), solo superada por la cueva del agua en Sorbas con 8 km (González y Ramírez, 1998). El sistema Hundidero-Gato conecta el arroyo Gaduares con el río Guadiaro a través de un complejo sistema de galerías subterráneas, cuya entrada se localiza al pie del cerro Tavizna y salida en el flanco Este del monte Algarrobo, al Este de la localidad de Montejaque. Además, este sistema espeleológico recoge las aguas de dos arroyos subterráneos: la Galería Nueva o afluente de Montejaque, y un arroyo subterráneo perenne en el flanco Noreste de la sierra de Juan Diego. Existen dos niveles de karstificación, pero el nivel superficial solamente es funcional en condiciones de aguas altas. La salida del sistema se produce a través de la cueva del Gato situada a 20 m sobre el cauce del río Guadiaro.

8.1.5. HIDROGRAFÍA

La red hídrica superficial de la zona de estudio está muy influenciada por la elevada karstificación de los materiales carbonáticos, que impide la formación de cursos de agua permanentes. Los principales cursos de agua se encuentran en los bordes de la sierra: el río Guadiaro, situado al Este; los arroyos de los Álamos y Gaduares al Noroeste; y el arroyo de la Barrida al Suroeste (figura 8.7). Salvo el arroyo de la Barrida, el resto de cauces forman parte de la cuenca del río Guadiaro. El río Guadiaro es un cauce permanente, mientras que los arroyos Gaduares y Álamos sólo llevan agua en la época invernal. Estos dos arroyos drenan cuencas endorreicas de 48 y 30 km², respectivamente, cuyas aguas de escorrentía se infiltran en la sierra de Líbar.

En periodos de elevadas precipitaciones hay arroyos temporales como los del polje de Líbar, el arroyo de Montejaque y el arroyo del Almendral que, a su vez, es un afluente del arroyo Montejaque (figura 8.7), todos ellos desarrollados sobre materiales de baja permeabilidad (margocalizas del cretácico y arcillas del flysch).

El análisis de la infiltración y escorrentía superficial en la sierra de Líbar tiene especial interés, en la medida que el predominio de un proceso u otro condiciona la capacidad de protección de la zona no saturada. Si la recarga se produce a través de sumideros, la capacidad de atenuación de la contaminación es menor que si la recarga se produce de forma difusa.

La infiltración de agua, de forma concentrada, es un proceso importante en la sierra de Líbar. El escaso desarrollo de suelos y la marcada discontinuidad lateral de los mismos sobre las calizas, son factores significativos en la recarga. En las áreas donde afloran margocalizas cretácicas se producen zonas encharcamiento durante la época de lluvias. En los Llanos de Líbar, Zurraque, Burfo y Pozuelo tienen lugar procesos de encharcamiento o saturación de los suelos que se drenan hacia los arroyos temporales vertientes a los sumideros (foto 8.2). La implicación que este proceso tiene en el transporte de sustancias hacia las aguas subterráneas es directa e inmediata. El agua de lluvia arrastra los contaminantes potenciales y los introduce en el acuífero sin ningún tipo de atenuación, por parte de las capas de la zona no saturada, excepto la dilución propia del agua de lluvia.

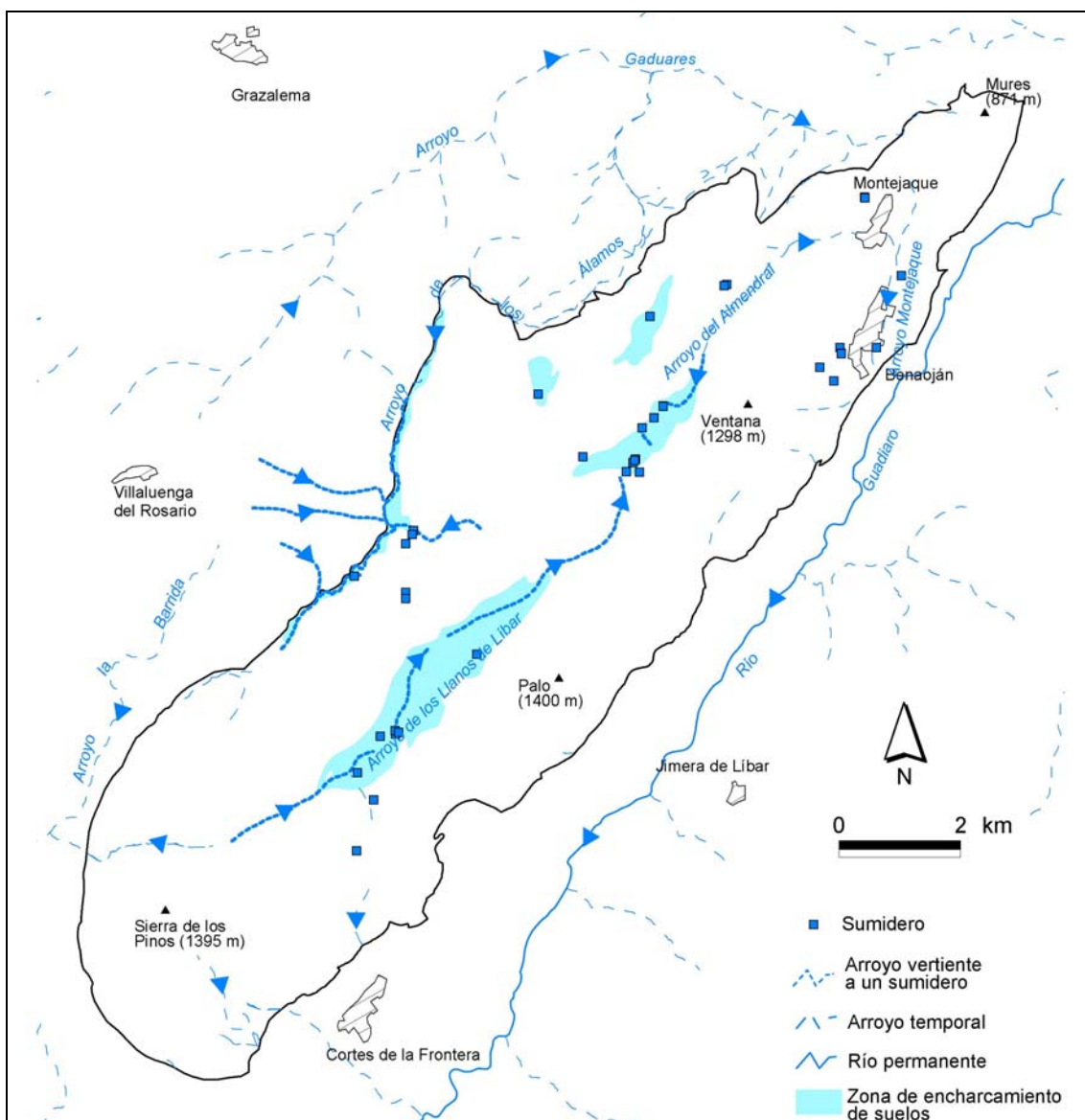


Figura 8.7. Red hídrica de la sierra de Libar.



Foto 8.2. Encharcamiento de los suelos en los Llanos de Libar (izquierda) y proceso de drenaje de terrenos encharcados hacia un sumidero en los Llanos de Pozuelo (derecha).

8.1.6. HIDROGEOLOGÍA

La sierra de Líbar constituye un acuífero formado por calizas y dolomías jurásicas muy karstificadas, con aproximadamente 600 m de espesor y que abarca una superficie de 70 km². La base del acuífero la componen arcillas y yesos del Trías y los límites laterales están constituidos por materiales poco permeables (margas y margocalizas cretácicas y arcillas del flysch).

En el acuífero de la sierra de Líbar hay tres afloramientos de calizas conectadas hidrogeológicamente (Mapa 8L). El Peñón del Berrueco y las Lomas de las Encinillas se localizan a 1 y 1'5 km de distancia, respectivamente, al SW de la sierra. Se trata de dos pequeños macizos calcáreos que forman un horst estructural en una ventana tectónica (Sánchez *et al.*, 1998). 5 km al Sur de la sierra se sitúa el Ojal de Buitrera, otra pequeña ventana tectónica de calizas jurásicas que ha sido erosionada por el río Guadiaro.

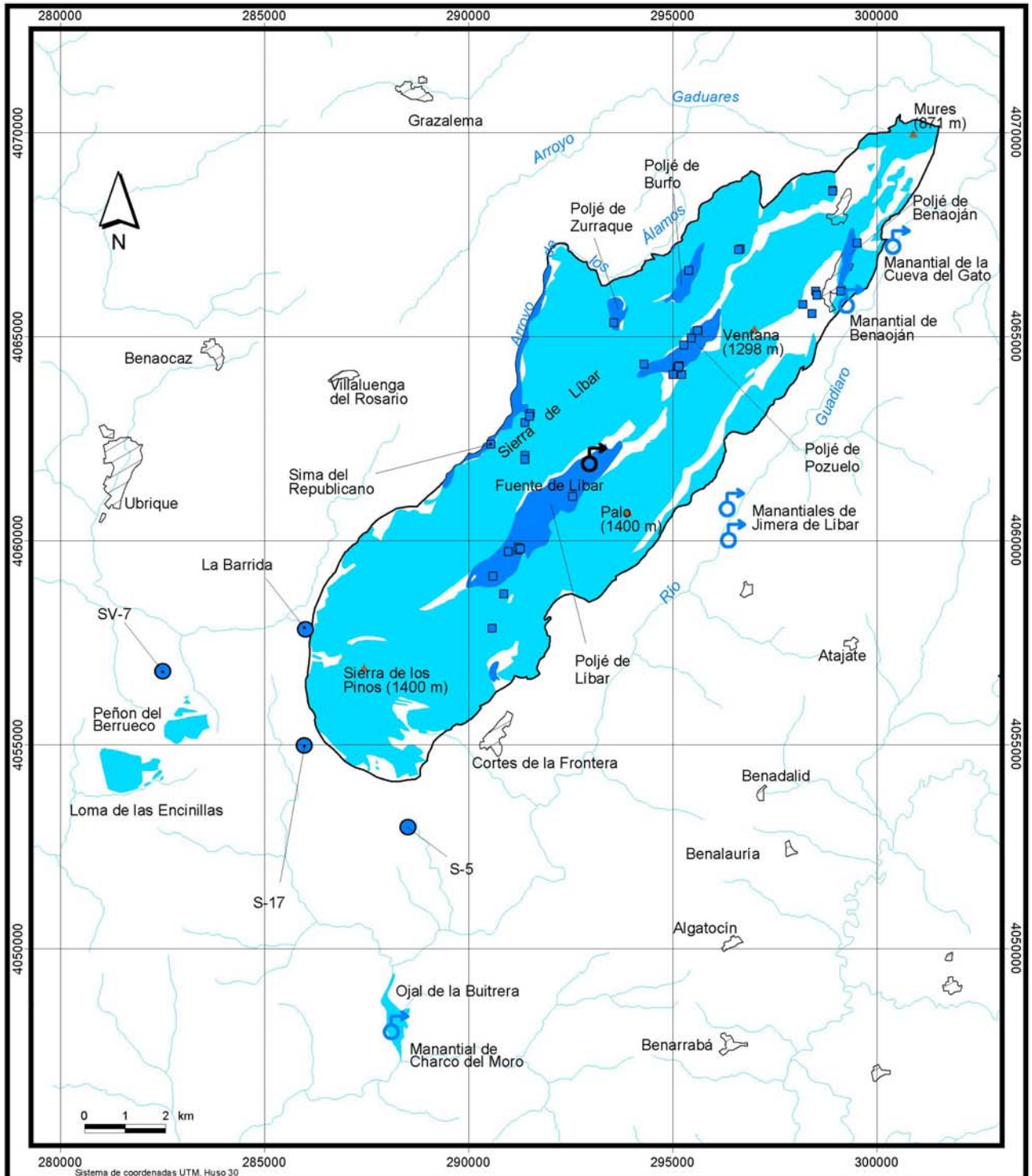
Los afloramientos de margocalizas de la parte alta de la sierra actúan como acuitardos, con pequeños volúmenes de agua almacenadas, pero suficientes para abastecer las necesidades de las explotaciones ganaderas situadas en los Llanos de Líbar y Pozuelo. En los Llanos de Líbar existe una pequeña fuente en el centro del polje, denominada Fuente de Líbar, que proporciona un caudal inferior a 1 l/s. Por otra parte, el afloramiento de arenas y arcillas aluviales del polje de Benaoján, sólo se utiliza de forma puntual para las explotaciones agrícolas del polje, debido a su escasa dimensión.

8.1.6.1. PUNTOS DE AGUA

En el acuífero de la sierra de Líbar los puntos de agua más importantes son los manantiales. Apenas hay sondeos y piezómetros, debido a la despoblación que, históricamente, ha sufrido esta zona, lo que ha permitido que el abastecimiento siempre haya sido satisfecho a partir de los recursos hídricos drenados por los manantiales, sin necesidad de poner sondeos en explotación. En el siguiente cuadro 8.4 se muestran los principales puntos de agua de la sierra de Líbar y en el mapa 9L la localización de los mismos. Sánchez *et al.* (1998) cifraron en 45, el total de puntos de agua de la sierra de Líbar, aunque la gran mayoría son pequeñas surgencias donde apenas se obtienen caudales superiores a 1l/s, por lo que no se han tenido en cuenta en el siguiente inventario.

Tipo	Nombre	UTM X	UTM Y	Cota piezométrica (m s.n.m.)
Manantial	Mayor de Jimera	296370	4060720	410
	Menor de Jimera	296340	4060930	470
	Cueva del Gato	300260	4067230	462
	Benaoján o El Ejío	299120	4065770	450
	La Fresnedilla	298930	4064920	445
	Fuente Grande	296410	4060040	410
	Charco del Moro	288120	4048030	223
Sondeo	S-5	288520	4052970	660
	S-17	285976	4054974	600
	La Barrida	286014	4057819	350
	SV-7	282513	4056793	470

Cuadro 8.4. Puntos de agua y cota piezométrica en la sierra de Líbar.



Afloramiento acuífero		Datos de sondeos tomados de Sánchez et al. (1998)	MAPA Nº 8L
Puntos de descarga Sondeo Manantial	Áreas y puntos de recarga Sumideros Áreas de encharcamiento de suelos y drenaje hacia sumideros Áreas de infiltración directa	Acuífero de la sierra de Libar HIDROGEOLOGÍA Y PUNTOS DE AGUA	
TESIS DOCTORAL Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España			

8.1.6.2. PIEZOMETRÍA

El acuífero de la sierra de Líbar es un acuífero típicamente kárstico, debido al importante grado de disolución que han sufrido los materiales carbonáticos, y se caracteriza por su elevada anisotropía. Es un acuífero muy influenciado por el desarrollo de conductos kársticos, a través de los cuales tiene lugar la mayor parte del flujo subterráneo.

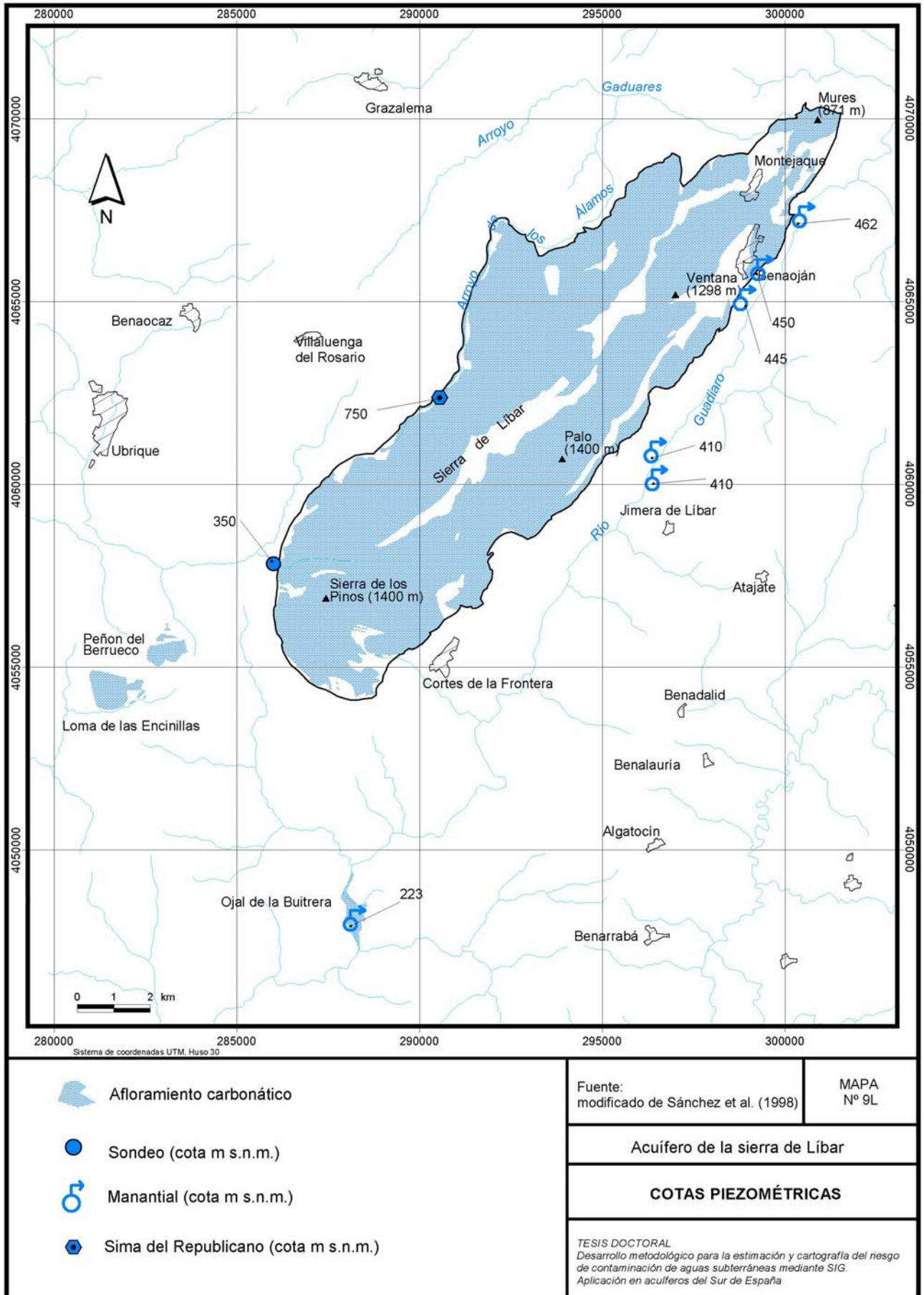
El estudio de la piezometría en la sierra de Líbar plantea el problema de la falta de puntos a partir de los cuales establecer las direcciones de flujos predominantes del acuífero. Los principales puntos de información están relacionados con las cotas de surgencia de los manantiales que se encuentran en el borde oriental. En el resto, hay muy poca información y sólo se han considerado 11 puntos con datos útiles.

Según los datos del IGME (1984), en la sima del Republicano existe un nivel de agua que podría corresponderse con el nivel piezométrico en situación de aguas altas. En cualquier caso, debe existir un gradiente hidráulico tal que permita un flujo hacia el Este, donde se encuentran los principales puntos de descarga natural del acuífero (mapa 9L).

Según Sanchez *et al.* (1998), el flujo del agua subterránea se produce principalmente hacia tres direcciones: hacia el Norte donde se encuentran los manantiales de la cueva del Gato y Benaoján, hacia el Este donde están los manantiales de Jimera de Líbar y hacia el Sur donde se halla el manantial del Charco del Moro. La piezometría y el flujo subterráneo están muy condicionados por la complejidad estructural y tectónica de la sierra y por la existencia de grandes sumideros que canalizan importantes volúmenes de agua.

A partir de un ensayo de trazadores, se ha deducido que la descarga en el manantial de Charco del Moro está condicionada por la recarga en el sector de la sima del Republicano (Andreo *et al.*, 2005). Estos puntos se encuentran interconectados por conductos kársticos en los que se alcanzan velocidades de flujo del agua, en torno a 120 m/h (figura 8.7). Además, el manantial del Charco del Moro recoge, posiblemente, la recarga de todo el extremo sur de la sierra. El sector central de la sierra (Llanos de Líbar) es el área de recarga de los manantiales de Jimera de Líbar y, de manera secundaria, también drena hacia el manantial de Benaoján. El manantial de la cueva del Gato recoge los aportes del sector más septentrional de la sierra desde los Llanos de Pozuelo hasta el cerro de Tavizna.

Los manantiales citados constituyen los principales puntos de descarga de la sierra, aunque puede existir un área de descarga difusa hacia el borde oriental de la sierra, donde se encuentra el río Guadiaro, que constituye el nivel de base del acuífero y que determina el flujo de agua subterránea de Oeste a Este.



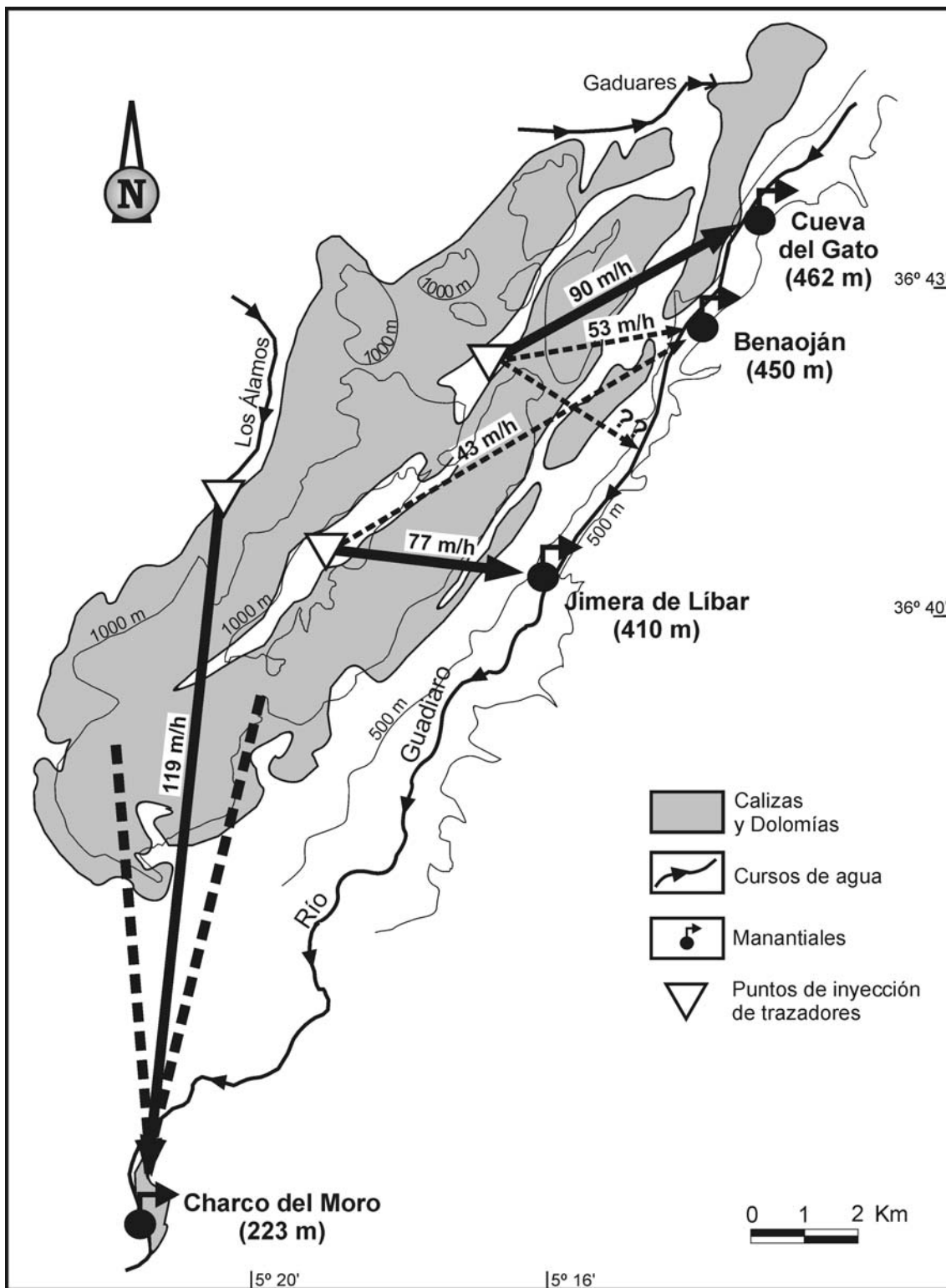


Figura 8.7. Flujos de agua subterránea predominantes en la sierra de Lívar (Modificado de Andreo *et al.*, 2005).

8.1.6.3. PARÁMETROS HIDRÁULICOS

Los manantiales del acuífero de la sierra de Líbar, generalmente, presentan caudales variables entre 50 y 2000 l/s con máximos invernales que se multiplican por diez (cuadro 8.5).

Manantial	Promedio Q (l/s)	Descarga anual (hm ³)
Mayor de Jimera	150	5 – 4,7
Cueva del gato	2000	65 – 60
Benaoján o el Ejío	2000	60 – 55
La Fresnedilla	12,5	0,5 – 0,4
Fuente Grande	10	0,4 – 0,3
Charco del Moro	2000	60 – 55

Cuadro 8.5. Caudales de los principales puntos de agua de la sierra de Líbar (modificado de Sánchez *et al.* 1998).

Los datos del cuadro 8.5 muestran cómo los manantiales de Cueva del Gato, Charco del Moro y Benaoján son los más importantes, con caudales de hasta a 20 m³/s. Todos los manantiales responden rápidamente a las precipitaciones, de manera que se alcanzan los mayores caudales inmediatamente después de los máximos pluviométricos.

Los manantiales de Benaoján y Jimera de Líbar sólo son utilizados para abastecimiento urbano. El manantial Mayor de Jimera presenta caudal de agua a lo largo de todo el año. El manantial de Benaoján tiene caudales de algunos l/s en época de aguas bajas y el máximo se ha cifrado en más de 20 m³/s.

Los manantiales de Charco del Moro y Cueva del Gato están muy influenciados por los arroyos Álamos y Gaduares, respectivamente, que como se ha mencionado anteriormente drenan cuencas endorreicas y se infiltran en sumideros kársticos conectados con los manantiales.

8.1.6.4. FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO Y BALANCE HÍDRICO

Los hidrogramas de los manantiales de la sierra de Líbar muestran picos en un breve espacio de tiempo frente a un episodio pluviométrico, y el tiempo de respuesta es alrededor de 1 ó 2 días (Sánchez *et al.*, 1998), lo que es indicativo de un comportamiento típico de acuíferos kársticos. Existe un importante desarrollo de la red kárstica por donde circulan grandes volúmenes de agua.

La recarga del acuífero se produce directamente por infiltración del agua de lluvia y del agua de escorrentía de los arroyos Álamos y Gaduares. Para un año medio, Sánchez *et al.* (1998) cifraron esta escorrentía en 32 hm³, mientras que en un año húmedo por encima de 93 hm³ (cuadro 8.6). El porcentaje de precipitación que recarga el acuífero es aproximadamente de un 55%.

En un año medio, la infiltración procedente de las cuencas endorreicas es similar a la generada por la lluvia sobre los afloramientos calcáreos, pero en un año húmedo la primera es bastante superior. Las salidas a través de los manantiales representan el 99 % de la descarga

del acuífero. En ambas situaciones hidrológicas, los balances hídricos están prácticamente equilibrados.

	Volumen Hm ³	
	Año Medio	Año Húmedo
Entradas	82,2	251,1
Transferencia otras unidades	16,6	32,5
Arroyo Álamos	13,4	50,9
Arroyo Gaduares	20,1	74,3
Infiltración agua de lluvia	32,1	93,4
Salidas	81,2	245,4
Arroyo de la Barrida	0,2	0,6
Explotación	0,7	0,7
Cueva del Gato	23,2	91,8
Manantial de Benaoján	28,1	83
Manantiales de Jimera de Líbar	4	19,3
Charco del Moro	25	50
Balance	1	5,7

Cuadro 8.6. Balance hidrogeológico de la sierra de Líbar. Datos tomados de Sánchez *et al.* (1998).

8.1.7. SUELOS

Según el mapa de suelos elaborado por el ICONA en el marco del proyecto LUCDEME, los tipos de suelos sobre la sierra de Líbar son, principalmente, Cambisoles calcáricos y Regosoles calcáricos. Los Regosoles se desarrollan, preferentemente, sobre los materiales más deleznable, caso de margocalizas, arcillas del flysch, depósitos aluviales y coluviales; mientras que los Cambisoles se forman sobre las calizas y dolomías jurásicas.

El trabajo de campo realizado en el marco de esta investigación, ha puesto de manifiesto que los suelos en el acuífero de la sierra de Líbar se caracterizan por el elevado grado de discontinuidad lateral, como consecuencia de un material parental que limita el desarrollo edáfico. Además, los suelos sobre los afloramientos carbonáticos son líticos, es decir, con muy poco espesor, salvo en grietas y formas kársticas donde se acumulan las arcillas de la descalcificación. Hay una diferencia clara entre los suelos de los poljes donde se alcanza más de 1 m de profundidad y tienen una componente arcillosa muy elevada, y los suelos sobre las sierras calizas que rodean los poljes muy poco desarrollados y discontinuos. A partir de la información recopilada en el campo y utilizando como base cartográfica un mapa de litofacies, debido a la importancia de la litología en el desarrollo edáfico, y como información edáfica los datos del proyecto LUCDEME (Aguilar *et al.*, 1995), se ha elaborado un nuevo mapa de suelos (Mapa 10L).

En el mapa de suelos se observan cambisoles sobre los materiales carbonáticos, una capa, generalmente, discontinua, que minimiza la capacidad de protección de la zona no saturada frente a los contaminantes potenciales, y una capa de suelos residuales arcillosos (Vertisoles) en las dolinas originadas por descalcificación. Por otra parte, se han diferenciado los Regosoles sobre el afloramiento de margocalizas y se ha establecido una nueva categoría de

suelos arcillosos en los poljes y sobre el flysch (en las inmediaciones de Montejaque) con características similares a los Vertisoles y Luvisoles, respectivamente. Esto se debe al alto contenido en arcillas y gran cantidad de materia orgánica que presentan. Los Cambisoles son los suelos predominantes en la zona de estudio, pues se desarrollan en un 80 % de su superficie (cuadro 8.7).

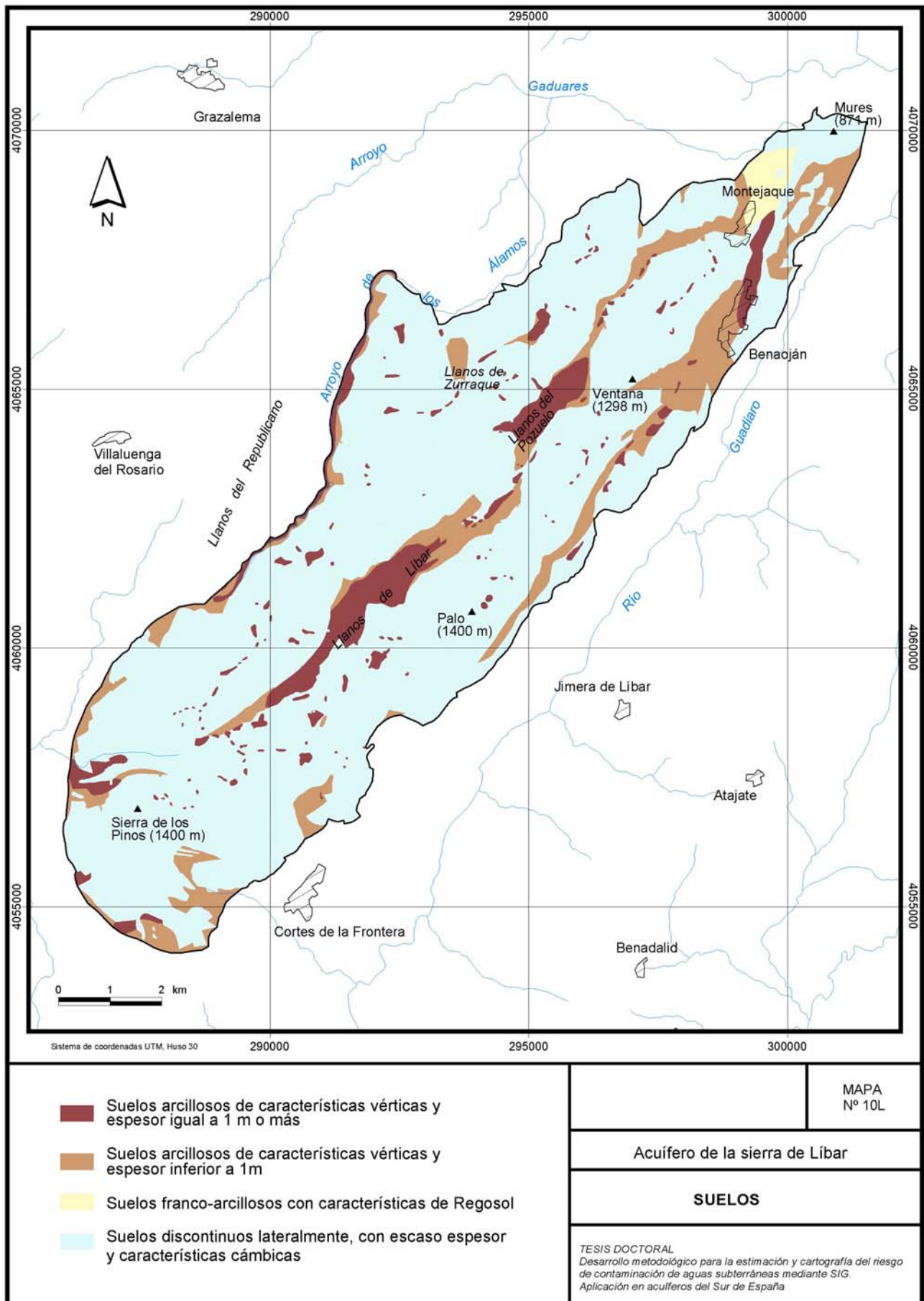
Orden de suelos	Área (km²)	Área (%)
Regosoles	10,8	12,2
Vertisoles y/o Luvisoles	7,8	8,7
Cambisoles	70,3	79,1
Área total	88,9	100

Cuadro 8.7. Porcentaje de superficie en función de órdenes de suelo.

Los Cambisoles calcáricos son suelos poco evolucionados de textura franca o franca-limosa que pasa a franco-arcillosa en profundidad. El contenido en carbonatos suele ser muy elevado (hasta el 75%), y la razón C/N indica el predominio de procesos de mineralización sobre los de humificación.

Los Regosoles calcáricos son suelos pedregosos que se desarrollan tanto en materiales consolidados y duros como en materiales blandos. Suelen presentar un único horizonte diagnóstico principalmente por la falta de espesor. La textura de estos suelos es muy variable en función del material sobre el que se desarrolla, pero tiende a ser arcillosa y franco-arcillosa sobre margas y materiales poco consolidados.

Los Vertisoles calcáricos son suelos muy uniformes con un alto contenido en arcilla y presencia de grietas, desde la superficie hasta una profundidad de 50 cm como mínimo. El contenido en arcillas y en materia orgánica permanece constante a lo largo de todo el perfil al igual que la ausencia de pedregosidad.



8.1.8. VEGETACIÓN NATURAL Y OTROS USOS DEL SUELO

La sierra de Líbar es un área de montaña ganadera y forestal. La ganadería extensiva y la presencia de espacios adherados dan carácter a una sierra donde los usos y aprovechamientos humanos son, en general, limitados y congruentes con el medio ambiente.

A partir de los mapas de Usos y coberturas vegetales del suelo de Andalucía (1996) y el mapa de cultivos y aprovechamientos en Andalucía (1999), se ha elaborado el mapa de vegetación natural de la sierra de Líbar. El porcentaje de superficie que representa la vegetación natural, más del 75 % (figura 8.8), es una cifra indicativa del peso que ostenta el uso forestal, o cuando menos no humanizado en la sierra de Líbar. El resto se encuentra repartido entre espacios dedicados a usos agrícolas, urbanos o simplemente no existe ningún tipo de cubierta vegetal como consecuencia de lo agreste del relieve o la deforestación.

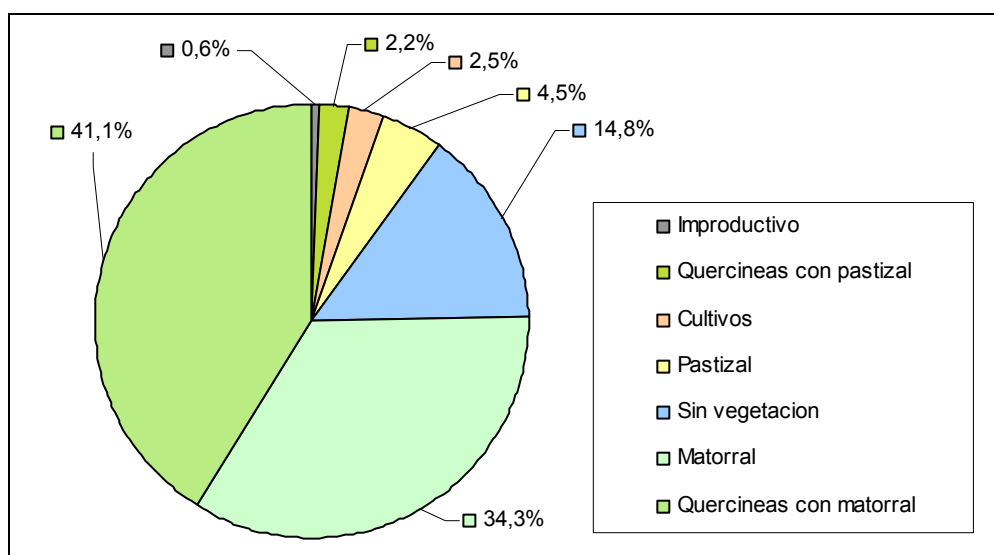
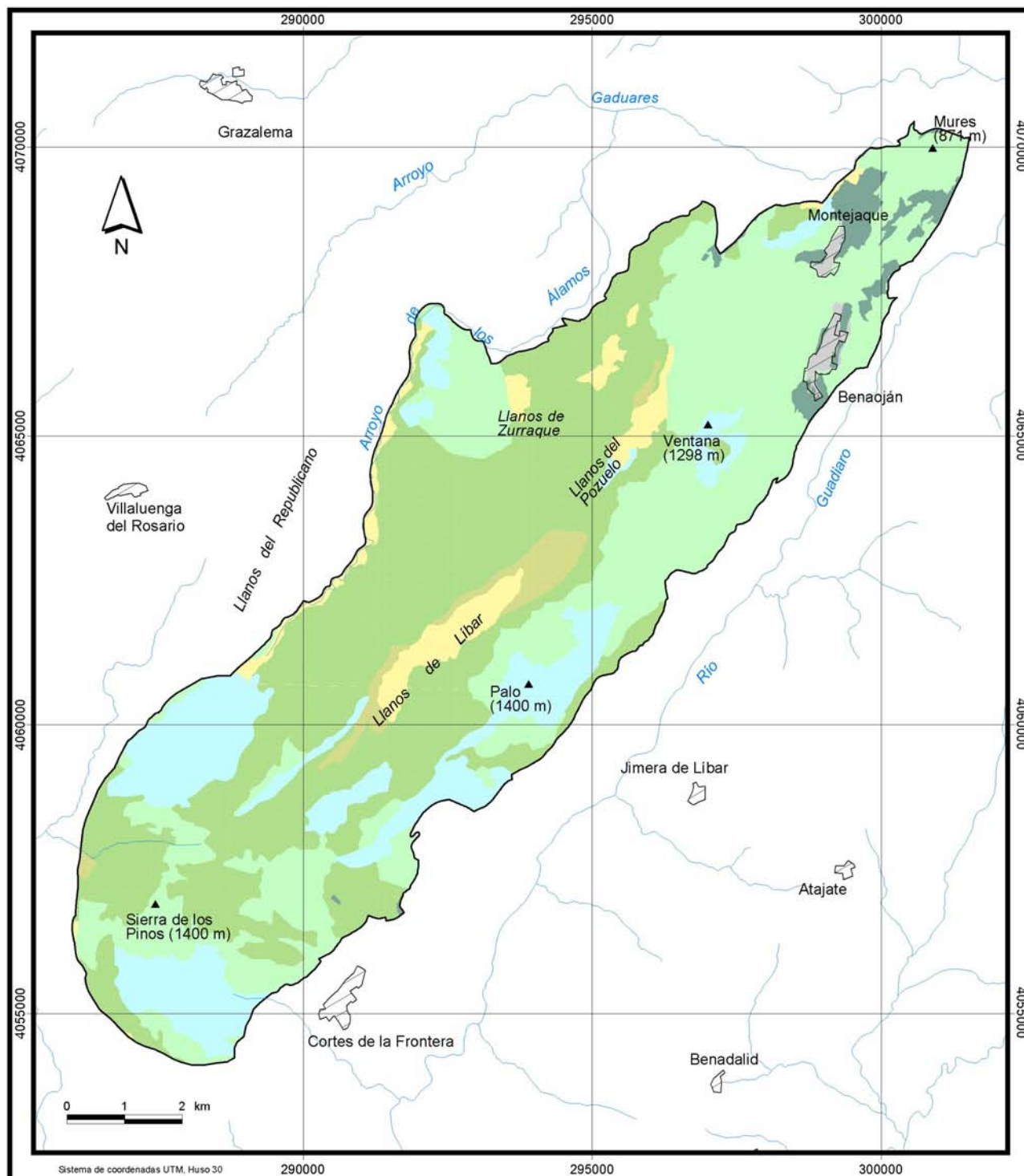


Figura 8.8. Porcentaje de superficie según vegetación natural otros usos del suelo.

Las zonas cultivadas se localizan alrededor de los núcleos de población de Montejaque y Benaoján, únicas poblaciones del interior de la sierra de Líbar, en la parte norte de la zona de estudio. Hacia el interior y bordeando estas zonas se observa una extensa superficie ocupada por matorral tipo mediterráneo que va mezclándose progresivamente con árboles del género *Quercus*, concretamente *Quercus ilex* y *Quercus rotundifolia* que configuran una asociación de encinar con matorral (mapa 11L). El encinar es la vegetación climácica de la sierra de Líbar. En la actualidad se encuentra en proceso de regeneración, tras la deforestación producida para el carboneo como fuente de energía de las localidades adyacentes y energía de la industria malagueña del siglo XIX.



<ul style="list-style-type: none"> Espacios cultivados Pastizal Improductivo: áreas urbanas Matorral mediterráneo Roquedos sin vegetación Zonas arboladas de quercinias con matorral Zonas arboladas de quercineas con pastizal 	<p>Fuente: Junta de Andalucía (1996 y 1999)</p> <p style="text-align: right;">MAPA Nº 11L</p> <p style="text-align: center;">Acuífero de la sierra de Libar</p> <p style="text-align: center;">VEGETACIÓN NATURAL Y OTROS USOS DEL SUELO</p> <p><small>TESIS DOCTORAL Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España</small></p>
---	--

La presencia de zonas adheradas tiene su origen en los modos de producción tradicionales, concretamente, el aprovechamiento extensivo del campo para la cría del ganado porcino que existe en los poljes (foto 8.3 izquierda). Así, en las altiplanicies del sector central de la sierra (Llanos de Líbar y del Pozuelo), la masa forestal se mezcla con pastos hasta dar origen a un encinar adherado, que delimita el área asociada a los afloramientos de margocalizas de los poljes de la sierra (foto 8.3 derecha).



Foto 8.3. Ganadería extensiva en el encinar de los Llanos del Pozuelo (izquierda) y encinar adherado en los llanos de Zurraque (derecha).

Las zonas donde no hay vegetación son consecuencia de la presencia de afloramientos carbonáticos que limitan el desarrollo de suelos y la elevada pendiente. En estas áreas, la regeneración del encinar es más lenta debido a los condicionantes del medio físico y se encuentran en un estadio evolutivo primario donde predomina la presencia de matorral y pastos.

8.1.9. POBLACIÓN

8.1.9.1. POBLACIÓN DE DERECHO

Los municipios que tienen núcleos de población abastecidos con recursos hídricos del acuífero de la sierra de Líbar son Montejaque, Benaoján, Jimera de Líbar y Cortes de la Frontera. Villaluenga del Rosario es un municipio que tiene alguna porción de su superficie sobre el acuífero, pero utiliza los recursos hídricos de otros acuíferos. Los manantiales de la sierra de Líbar están situados en la vertiente oriental de la sierra, mientras que Villaluenga del Rosario y sus localidades se sitúan en la vertiente occidental, una zona que actúa de recarga del acuífero, pero en la cual no hay manantiales relacionados con la descarga de la sierra de Líbar.

En concreto hay seis núcleos de población dependientes de los recursos hídricos de la sierra de Líbar: Cortes de la Frontera, Cañada del Real Tesoro (o estación de Cortes de la Frontera), Jimera de Líbar, Estación de Jimera de Líbar, Benaoján (incluyendo a la estación de Benaoján) y Montejaque. La población total de estos núcleos de población, según el último censo realizado por el Instituto Nacional de Estadística (año 2001) es de 5711 habitantes (cuadro 8.8).

Municipio	Núcleo de Población	Habitantes			
		Municipio (INE, 2004)	Núcleo (INE, 2004)	% respecto del total	% respecto del municipio
Benaoján	Benaoján	1588	1505	26,4	94,8
Cortes de la Frontera	Cortes de la Frontera	3557	2393	41,9	67,3
	Cañada del Real Tesoro		422	7,4	11,9
Jimera de Líbar	Jimera de Líbar	359	290	5,1	80,8
	Estación de Jimera de Líbar		69	1,2	19,2
Montejaque	Montejaque	1032	1032	18,1	100,0
Total		6536	5711	87,4	-

Cuadro 8.8. Población de los núcleos dependientes de los recursos hídricos de la sierra de Líbar en el año 2001 (www.ine.es).

En términos generales, la cantidad total de habitantes que se abastecen del acuífero de la sierra de Líbar es pequeña. El núcleo con mayor número de habitantes es Cortes de la Frontera que, junto con Cañada Real del Tesoro (Estación de Cortes de la Frontera), representa la mitad de la población abastecida desde la sierra de Líbar. En el extremo opuesto está la estación Jimera de Líbar, donde se concentra sólo el 1% de la población total. La población de los municipios de Benaoján, Montejaque y Jimera de Líbar se abastecen, en su conjunto, de los recursos de la sierra de Líbar, mientras que la población de Cortes de la Frontera se encuentra dividida en diversos núcleos de población. El Robledal, La Saucedá y El Colmenar representan a poco más de una quinta parte de la población del municipio de Cortes de la Frontera y se abastecen de fuentes ajenas a la sierra de Líbar.

La estructura por edad de la sierra de Líbar, en conjunto, presenta claros síntomas de envejecimiento. La pirámide de población indica que la dinámica poblacional de la sierra es de retroceso (figura 8.9).

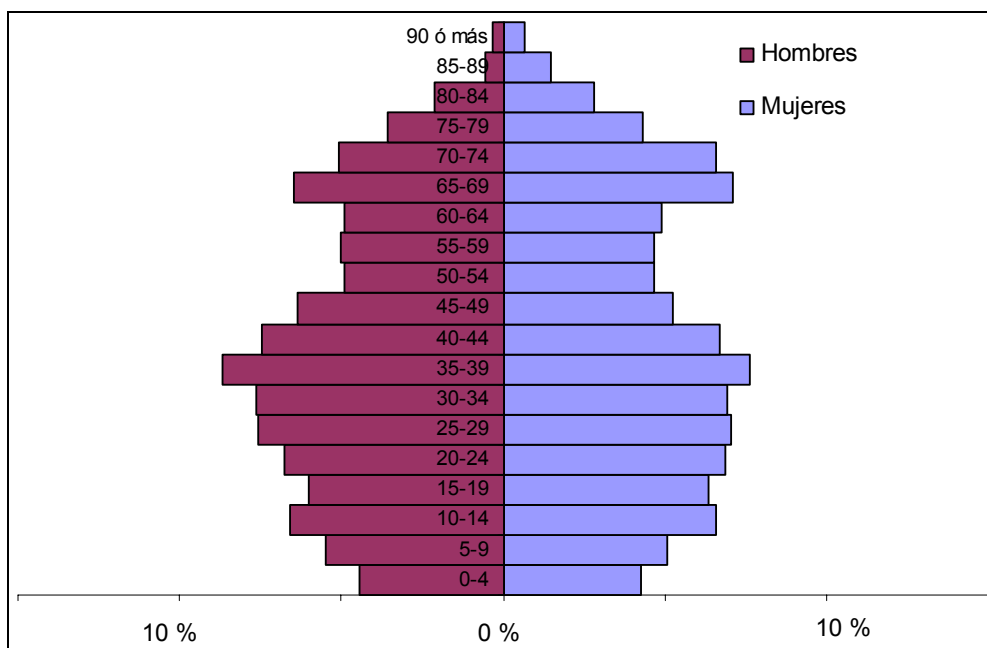


Figura 8.9. Pirámide de población para el conjunto de habitantes de la sierra de Líbar.

El número de habitantes ha descendido desde los años 60 a consecuencia de la emigración, principalmente de personas jóvenes, hacia poblaciones más dinámicas desde un punto de vista socioeconómico, lo cual influye en un descenso de las tasas de natalidad. Otra característica de la pirámide es la acentuada entalladura en los grupos de edad nacidos en los años siguientes a la guerra civil.

Un análisis más detallado de la población por núcleos urbanos muestra que Cortes de la Frontera, Benaoján y Montejaque (figura 8.10) mantienen una tendencia común con respecto a la tendencia genérica de la sierra de Líbar. Benaoján y Cortes de la Frontera tienden a la despoblación mientras que Montejaque muestra un mayor estancamiento pero igualmente anclado en un proceso de pérdida de población. Las localidades de Jimera de Líbar, Estación de Jimera de Líbar y, en menor medida, Cañada del Real Tesoro, son poblaciones desestructuradas máxime en el caso de la Estación de Jimera de Líbar.

Las localidades de Cortes de la Frontera y Benaoján son las que muestran una estructura de la población más similar. Ambas se caracterizan por encontrarse en retroceso, al igual que el conjunto de la sierra, pero destaca un aumento de la población a mediados de los años ochenta y a diferencia de los datos para el conjunto de la sierra donde se recoge un retroceso general desde los años sesenta. En el caso de Montejaque, este aumento de población se produce con diez años de antelación, es decir, a mediados de los setenta motivado posiblemente por un tardío aumento demográfico asociado al fenómeno del “baby boom”. Por tanto, en los casos de Cortes de la Frontera y Benaoján hay dos periodos de bonanza demográfica mientras que en el caso de Montejaque solo uno. Las pirámides obtenidas para las localidades de Cañada del Real Tesoro, y las poblaciones de Jimera de Líbar no responden a ningún esquema.

En el caso de la Cañada del Real Tesoro, está se desmarca de la tendencia de Cortes de la Frontera en el sentido que se produce la pérdida y aumento de efectivos humanos en periodos distintos para los hombres y las mujeres si bien para ambos sexos ocurre en las generaciones más jóvenes.

Las pirámides de población de Jimera de Líbar y la Estación de Jimera de Líbar están muy influenciadas por el escaso volumen de habitantes, de manera que los comportamientos individuales tienen un acentuado peso en la forma final de la pirámide y no se encuentran pautas comparables con la tendencia general de la sierra (figura 8.10).

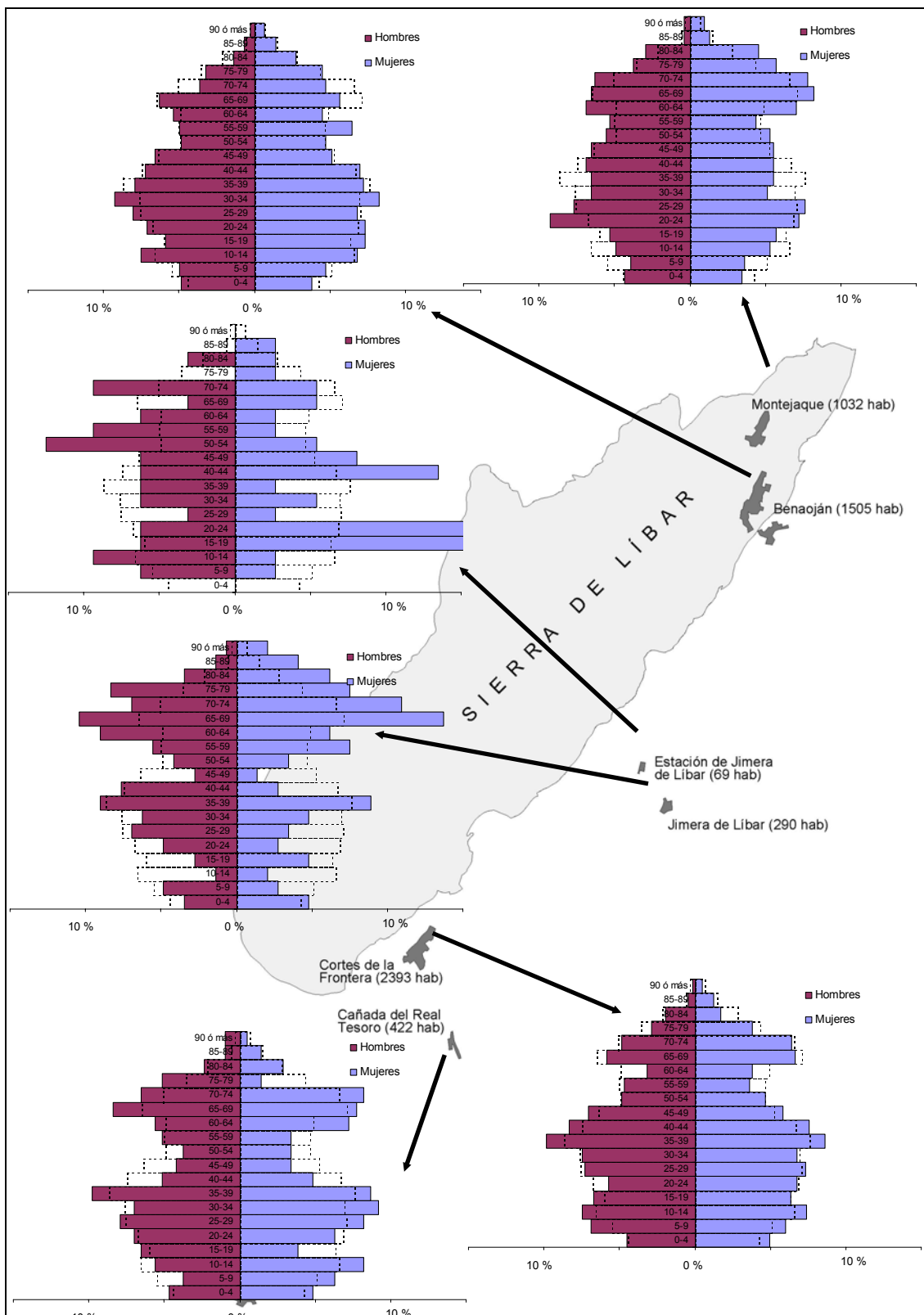


Figura 8.10. Pirámides de población de Montejaque, Benaoján, Cortes de la Frontera, Cañada Del Real Tesoro, Jimera de Libar y Estación de Jimera de Libar. Leyenda: con un trazo discontinuo se ha delimitado el perfil de la pirámide de población de la figura 8.9.

Un grupo de edad de especial relevancia frente a un evento de contaminación, en cuanto que las consecuencias se agravan en función de sus características fisiológicas, son los grupos de edad menores de 15 (niños) y los mayores de 65 años. El volumen de población agrupado en niños y ancianos se cifra en 2132, equivalente a un 37% de la población (cuadro 8.9), de los cuales son ancianos más de la mitad (55'6%).

El núcleo de población donde se registra un mayor porcentaje de población niños o ancianos es Jimera de Líbar que con un 47% está muy por encima del resto de localidades.

Municipio	Localidad	Total	Niños	Ancianos	Niños + ancianos	
					nº	%
Benaoján	Benaoján	1505	265	275	540	35,9
Cortes de la Frontera	Cañada del Real Tesoro	422	70	98	168	39,8
	Cortes de la Frontera	2393	445	437	882	36,9
Jimera de Líbar	Estación de Jimera de Líbar	69	7	12	19	27,5
	Jimera de Líbar	290	28	110	138	47,6
Montejaque	Montejaque	1032	132	253	385	37,3
Conjunto sierra de Líbar		5711	947	1185	2132	37,3

Cuadro 8.9. Porcentaje y número de habitantes más vulnerables a la contaminación del agua.

En general, el número habitantes de la categoría de ancianos supera a la de considerados como niños en todas las localidades a excepción de Cortes de la Frontera donde los habitantes con menos de 15 años superan en número al total de ancianos. El resto presenta valores en el grupo de ancianos cercano a los de niños, salvo en Jimera de Líbar y Montejaque donde el número de ancianos es muy superior.

8.1.9.2. POBLACIÓN OCUPADA

La ocupación de los habitantes de las localidades de la sierra de Líbar se concentra en los sectores secundario y terciario como se deduce de los datos de la figura 8.11. El 45% está ocupada en el sector industrial y casi la mitad de la población en el sector servicios, mientras que solamente un 6% está ocupada en el primario, en especial agricultura y ganadería.

En el sector industrial priman las actividades ligadas a la manufactura, concretamente, la elaboración de productos cárnicos y a la construcción. En el sector servicios, las actividades que mayor volumen de población aglutinan, por orden de importancia, son las siguientes: administración pública, hostelería, comercio y educación. En conjunto, estos seis grupos de actividades empresariales ocupan al 80% de la población. El resto queda repartido en otras actividades de los sectores secundario y terciario que apenas tienen importancia en el conjunto de la sierra y que no serán analizadas en detalle para cada localidad.

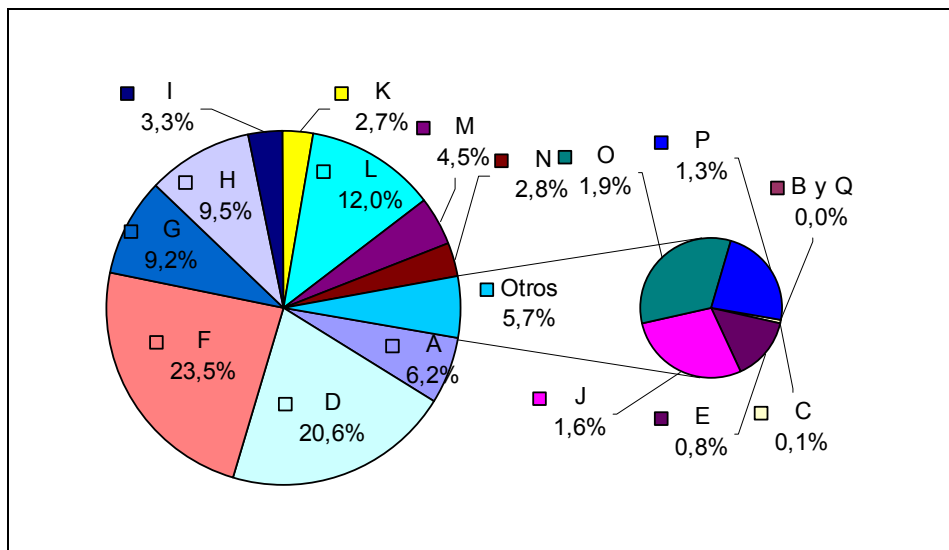


Figura 8.11. Porcentaje de población ocupada en los sectores productivos de los núcleos relacionados con la sierra de Libar en el año 2001. Leyenda: A - Agricultura, ganadería, caza y silvicultura; B - Pesca; C - Industrias extractivas; D - Industria manufacturera; E - Producción y distribución de energía eléctrica, gas y agua; F - Construcción; G - Comercio, reparación de vehículos y aparatos de uso doméstico; H - Hostelería; I - Transporte, almacenamiento y comunicaciones; J - Intermediación financiera; K - Actividades inmobiliarias y de alquiler; servicios empresariales; L - Administración pública, defensa y seguridad social obligatoria; M - Educación; N - Actividades sanitarias y veterinarias, asistencia social; O - Otras actividades sociales y servicios personales, P - Actividades de los hogares y Q - Organismos extraterritoriales.

A escala de núcleo de población o localidad (figura 8.12), se observa que la población se concentra en un tipo de actividad u otra, variable según la localidad, a excepción de Cortes de la Frontera y Montejaque que muestran un reparto más equilibrado de la población ocupada en los distintos sectores productivos. De forma genérica, se observa que la educación es el sector que menos población ocupa, mientras que la construcción y las manufacturas los que más.

En el caso de Benaoján la población se concentra en el sector de las manufacturas que ocupa a más de un tercio de la población, en especial, de las cárnicas, muy difundidas en todo el municipio, y casi una quinta parte en la construcción. El resto se reparte de manera equitativa, a excepción del porcentaje de ocupados en la educación que tiene poco peso en el conjunto de la población.

Montejaque presenta un esquema diferente a Benaoján, con un reparto equitativo de la población en los principales sectores productivos del municipio. La hostelería y el comercio son las principales actividades que emplean a la población y la educación es la que tiene menos ocupación.

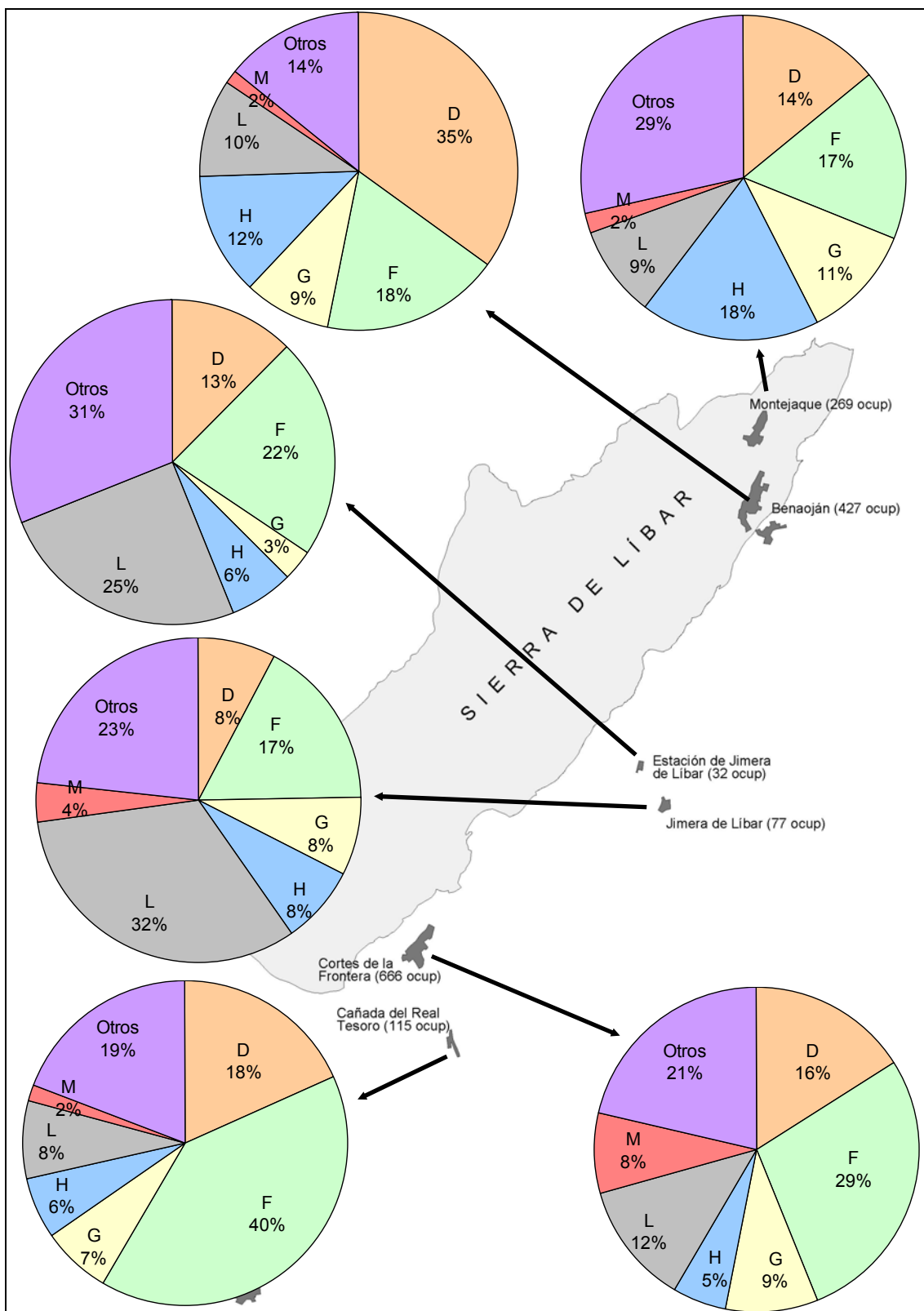


Figura 8.12. Distribución porcentual de la población ocupada en los principales sectores económicos de los núcleos de la sierra de Libar en el año 2001. Manufactura (D), Construcción (F), Comercio (G), Hostelería (H), administración pública (L) y Educación (M).

En las localidades de Cortes de la Frontera y Cañada del Real Tesoro el reparto de la población en los distintos sectores económicos es similar. En ambos se observa que el mayor peso lo tiene la construcción, aunque mucho más acentuado en la Cañada del Real Tesoro, donde casi la mitad está ocupada en esta actividad. En Cortes de la Frontera, la diferencia de población en la construcción respecto a Cañada del Real Tesoro queda absorbida por la educación. Cortes de la Frontera es la localidad que mayor volumen de población ocupa en el sector de la educación, lo cual también está en consonancia con el hecho de ser la localidad donde reside mayor número de habitantes y donde el volumen de población infantil es mayor.

En Jimera de Líbar y en la Estación de Jimera de Líbar, el sector económico que mayor peso tiene es la administración pública, en la cual trabaja más de una cuarta parte de la población ocupada, y la construcción que emplea a casi una quinta parte. En ambas localidades el reparto es muy similar, tanto para los sectores comentados como para el resto de actividades empresariales. La principal diferencia radica en que en la Estación de Jimera de Líbar no hay personas ocupadas en la educación y la ocupación en la construcción es muy baja. También resulta llamativo el hecho de que Jimera de Líbar es el municipio, de todos los analizados en la sierra de Líbar, que menor volumen de población aglutina y cómo la principal salida laboral recae sobre la administración pública.

8.1.10. ACTIVIDAD AGROPECUARIA

Las actividades ocupadas en la agricultura y la ganadería tienen una escasa ligazón con los recursos hídricos subterráneos de la sierra, en cuanto que no se han localizado espacios dedicados al regadío, y las pocas hectáreas cultivadas están ocupadas por olivar y herbáceos de secano. En el caso de la ganadería, dado el carácter trashumante de la mayor parte de la misma, la falta de agua en determinadas épocas del año se subsana con esta práctica ganadera.

La agricultura ha sido tradicionalmente una actividad secundaria y complementaria, en algunos casos, a la ganadería. La escasez de suelos fértiles no ha permitido su desarrollo salvo en momentos de mayor presión sobre el medio en los que se sembraban trigo y garbanzos en los llanos y laderas más accesibles.

La ganadería ha sido la actividad económica por excelencia de los habitantes de la sierra de Líbar. Aunque en la actualidad se encuentra en un proceso de retroceso, tradicionalmente ha mantenido una alta tasa de actividad hasta los tiempos de la emigración del campo a la ciudad, a mitad del siglo pasado. En los momentos de mayor esplendor llegó a albergar a más de un centenar de personas dedicadas a esta actividad, pero hoy en día no supera la decena repartidas en los cortijos de los llanos del interior de la sierra.

La ganadería es la actividad que conlleva algún tipo de dependencia de los recursos hídricos de la sierra. La existencia de fuentes, pilones, pilas, pozos y aljibes son una muestra de la variedad de infraestructuras hidráulicas en la sierra de Líbar para el abastecimiento del ganado. La relación con las aguas subterráneas se encuentra en la existencia de pozos en los cortijos del interior de la sierra para hacer frente a la sequía estival y garantizar el suministro de agua en verano. Estos pozos se localizan en las margocalizas cretácicas.

Según datos aportados por la Oficina Comarcal Agraria (OCA) de Ronda, el censo ganadero en la sierra de Líbar cifra en 280 el número de bovinos (raza Retinta), 1732 ovinos (Merina de Grazalema), 1130 caprinos (Payoya), 580 porcinos (Ibérico) y 15 equinos. La cabaña ganadera se reparte en 18 explotaciones, si bien, en los últimos diez años el número de explotaciones ganaderas ha descendido notablemente y se ha pasado de 29 en el año 1995 a 18 en la actualidad. Las que aun perduran presentan tres características: un carácter empresarial puesto que no solo se mantienen para su autoabastecimiento como en tiempos remotos, mixto porque la mayoría de ellas cuenta con distinto tipo de ganado y extensivo porque el ganado pasta libremente en los llanos.

El descenso en el número de explotaciones no tiene equivalencia en la productividad de las mismas y las importantes mejoras respecto a las instalaciones, accesos, alimentación, genética y sanidad han aumentado su productividad. Sin embargo, este aumento de la productividad no frena uno de los problemas acuciantes de la ganadería como es la falta de rentabilidad. El aumento de los costes de producción, como el gasoil y los piensos, y el estancamiento, cuando no el descenso, de los precios del ganado, sitúa a esta actividad económica en un estadio de retroceso de difícil solución.

Una de las salidas de las explotaciones a la crisis del sector está relacionada con la transformación de la cabaña ganadera hacia los productos de mayor repercusión en los mercados urbanos demandantes de elevada calidad. El cerdo ibérico es uno de los tipos de ganado que mayor aceptación tiene en los principales mercados, en comparación con otros tipos de ganado. Su repercusión en la economía de la comarca se hace patente por el crecimiento de la distribución de los productos de la comarca a través de las industrias cárnicas de Benaoján y por la implantación de nuevas explotaciones porcinas en el interior de la sierra, actualmente en fase de estudio y tramitación.

8.1.11. HOSTELERÍA Y OTRAS ACTIVIDADES PRODUCTIVAS

En este epígrafe se han analizado las empresas dedicadas a hospedería, restauración y las industrias cárnicas. La dependencia del agua en estas actividades es elevada, especialmente, en el caso de las cárnicas con sala de despiece y matadero, que necesitan grandes cantidades de agua para el limpiado de la carne y la eliminación de todo tipo de restos de vísceras y sangre.

Las industrias cárnicas son muy numerosas, pero sólo se han tenido en cuenta las que tienen matadero, que son dos localizadas en el municipio de Benaoján. Estas industrias emplean a unas 60 personas, de las cuales 14 trabajan en la sala de matadero. Los beneficios económicos que generan son importantes, alrededor de 3 millones de euros y actúan de matadero para especies de porcino, bovino y ovino, tanto de la sierra, como de los alrededores.

En cuanto a los establecimientos del sector hostelería, hay un total de 61 diferenciados en hoteles, apartamentos, campamentos, casas rurales y restaurantes, según los datos del Instituto de Estadística de Andalucía (IEA) para el año 2001 en los municipios de Cortes de la Frontera, Jimera de Líbar, Benaoján y Montejaque. Este dato muestra la escasa importancia que tiene el sector turístico en la economía de la zona.

Teniendo en cuenta el escaso número de establecimientos hosteleros, el apartamento es el tipo de establecimiento turístico más numeroso que hay en la sierra de Líbar. Esta tipología de están localizadas, principalmente, en el municipio de Montejaque, el cual aglutina una cuarta parte de los establecimientos hosteleros de los municipios analizados (figura 8.13). La sierra es un espacio muy visitado sobre todo por senderistas, un tipo de turista que, normalmente, no genera grandes beneficios económicos. Esto puede ser la razón por la cual en el municipio de Montejaque se concentra el mayor número de apartamentos, dado que es la localidad más cercana a las rutas senderistas del interior de la sierra de Líbar.

Cortes de la Frontera y Jimera de Líbar muestran una mayor distribución del tipo de establecimiento hostelero y menos concentrada en una sola categoría y junto con Benaoján son los que tienen una mayor importancia en el número de hoteles. Sin embargo, este dato no apunta a un elevado número de hoteles en estos municipios, sino que por el contrario, denotan el escaso peso de los establecimientos turísticos, dado que el municipio que más hoteles tiene es Cortes de la Frontera, concretamente dos, y el resto uno o ninguno.

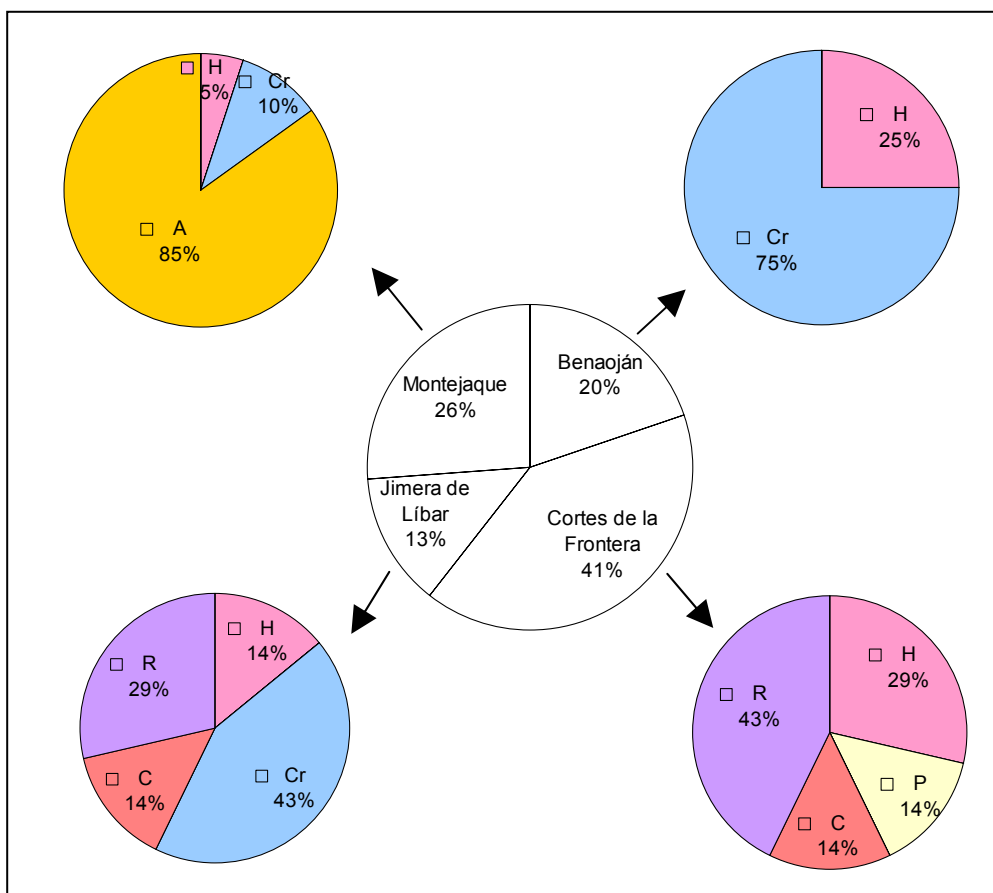


Figura 8.13. Distribución porcentual de los establecimientos hosteleros de los municipios dependientes del acuífero de la sierra de Líbar. Leyenda: H = hotel, A = Apartamento, P = pensión, C = campamento, Cr = casa rural y R = restaurante.

8.2. EVALUACIÓN Y CARTOGRAFÍA DE LOS PELIGROS DE CONTAMINACIÓN SOBRE EL ACUÍFERO DE LA SIERRA DE LÍBAR

8.2.1. INVENTARIO DE PELIGROS DE CONTAMINACIÓN

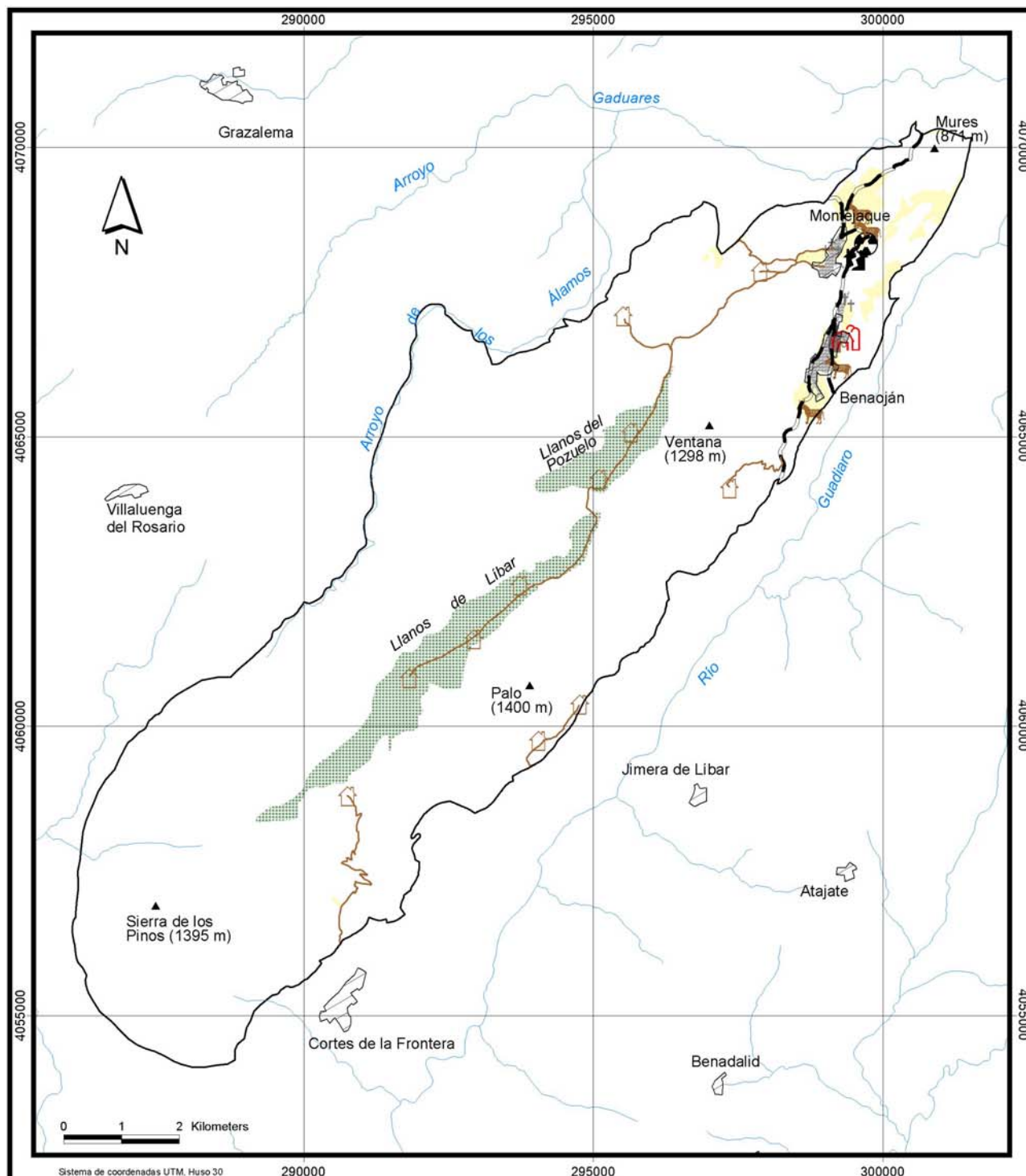
En la sierra de Líbar se han localizado once actividades potencialmente contaminantes (cuadro 8.10). Los peligros detectados se concentran principalmente en el nordeste de la zona de estudio, en torno a las localidades de Montejaque y Benaoján, donde tiene lugar la mayor parte de la actividad humana (mapa 12L). En el resto de la sierra no hay indicios de ocupación humana excepto las cortijadas en el entorno de los llanos del interior de la sierra, con las que se asocian los caminos terrizos y las áreas de pastoreo extensivo de ovino, porcino y vacuno.

	Tipos de peligros	Entidad cartográfica
Infraestructuras Urbanas	Áreas urbanas con sistema de alcantarillado	Polígono
	Casas aisladas sin sistemas de alcantarillado	Punto
	Carreteras	Línea
	Gasolinera	Punto
	Cementerio	Punto
	Depósito de escombros	Punto
	Vertedero residuos sólidos urbanos	Punto
Actividades Industriales	Industria alimenticia (cárnica)	Punto
Ganadería y Agricultura	Áreas de pastoreo intensivo	Polígono
	Establos	Punto
	Campos cultivados	Polígono

Cuadro 8.10. Peligros potenciales de contaminación localizados en la sierra de Líbar.

Los peligros localizados sobre el acuífero no son muy importantes y la gran mayoría están relacionados con infraestructuras del medio urbano, concretamente, seis actividades de un total de diez están relacionadas con este grupo. Sólo se ha observado una actividad industrial y tres agropecuarias.

Las áreas urbanizadas en la sierra de Líbar son de pequeña dimensión y están localizadas en los núcleos de población de Montejaque y Benaoján en la parte septentrional de la zona de estudio (foto 8.4). Estos núcleos de población concentran la mayoría de los procesos urbanísticos en la sierra y todos presentan sistema de alcantarillado, aunque el vertido posterior de las aguas sin depurar se realiza al río Guadiaro fuera de los límites del acuífero.



Sistema de coordenadas UTM, Huso 30		290000	295000	300000	MAPA Nº 12L
<ul style="list-style-type: none"> Establo Industria cárnica Cementerio Casa aislada Escombrera Vertedero RSU Gasolinera 	<ul style="list-style-type: none"> Carretera asfaltada Camino de tierra Área de pastoreo intensivo Campo de cultivo Zona urbanizada con sistema de alcantarillado 	<p>Acuífero de la sierra de Libar</p> <p>PELIGROS DE CONTAMINACIÓN</p>			<p>TESIS DOCTORAL Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España</p>



Foto 8.4. Vista de los núcleos de población de Benaoján (izquierda) y Montejaque (derecha).

En cuanto a las viviendas localizadas en la sierra sin sistema de alcantarillado (cortijos con fosas sépticas y pozos negros) presentan una gran dispersión y se localizan, preferentemente, en los llanos del interior de la sierra, asociadas a la actividad ganadera de carácter extensivo. Los cortijos representan un 54 % del total de peligros cartografiados de forma puntual.

Las carreteras que transcurren sobre el acuífero (foto 8.5) son muy escasas y tienen un índice medio diario de tránsito de vehículos es bajo. Si tiene mayor importancia, en cuanto al número de kilómetros cartografiados, la proporción de caminos terrizos que dan acceso a la mayoría de los cortijos del interior de la sierra, aunque el tránsito de vehículos por ellos es muy reducido (foto 8.5).



Foto 8.5. Detalle de la carretera entre cerro Tavizna y Montejaque (izquierda) y de la pista de acceso al Llano de Pozuelo desde Montejaque (derecha).

Hay dos cementerios de pequeña dimensión correspondientes a los pueblos de Montejaque y Benaoján, un vertedero de residuos sólidos urbanos entre las localidades de Montejaque y Benaoján, en la actualidad sellado y clausurado, y junto a él un depósito de escombros (foto 8.6). Se ha localizado una gasolinera en el pueblo de Benaoján junto a un taller de vehículos. Esta gasolinera surte principalmente gasóleo, para lo cual dispone de dos tanques con capacidad para almacenar 70000 litros de combustible.



Foto 8.6. Cementerio de Benaoján (izquierda) y vertedero RSU controlado de Benaoján y Montejaque (derecha).

En cuanto a las actividades industriales cabe señalar la presencia de una industria cárnica localizada en el polje de Benaoján que consta de un matadero, una sala de despiece y la fábrica de producción (foto 8.7). La empresa dispone de sistemas de depuración de las aguas residuales y transformación de los residuos sólidos con lo que reduce impacto sobre el entorno.



Foto 8.7. Localización y detalle de la sala de despiece del matadero de Benaoján. (Tomado de www.icarben.com).

Respecto a las actividades ligadas con el sector agropecuario destaca las relacionadas con la ganadería. El sector pecuario tiene un elevado peso en la actividad económica de la comarca que se manifiesta en la presencia de una importante cabaña ganadera de carácter extensivo de ovino, porcino y vacuno, principalmente. En relación con el ganado se han detectado dos zonas con un potencial peligro para la contaminación de las aguas subterráneas: los llanos de Líbar y de Pozuelo, áreas dedicadas al engorde del ganado, donde se concentra un elevado número de cabezas con los consiguientes problemas potenciales de contaminación microbiológica (foto 8.8). Al norte de la localidad de Montejaque se han localizado dos granjas con ganado estabulado (foto 8.8). Por lo que se refiere a la agricultura se ha tenido en cuenta el mapa de cultivos y aprovechamientos del año 1999 editado por la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía. La actividad agrícola se concentra en la parte norte de la zona de estudio donde se cultiva olivar y herbáceos de secano.



Foto 8.8. Áreas de pastoreo intensivo en los llanos del Pozuelo (izquierda) y vista de una granja al norte de Montejaque (derecha).

8.2.2. NOCIVIDAD DE LOS PELIGROS: FACTOR H

La nocividad de las actividades potencialmente contaminantes en la sierra de Líbar puede catalogarse como baja de acuerdo con los valores del cuadro 8.11. Los valores teóricos del factor H (nocividad) varían entre 10 y 100 según los criterios de De Keteleare, *et al.* (2004) y los correspondientes a las actividades y peligros potenciales que se han detectado en la sierra de Líbar son inferiores a la media, excepto en el caso de la gasolinera y el vertedero de residuos sólidos urbanos, si bien en ambos casos están muy próximos a la media.

El mapa del factor H en la sierra de Líbar (mapa 1L del anexo cartográfico) muestra valores de nocividad de clase Baja a excepción de la gasolinera y el vertedero RSU con una nocividad de clase Moderada. Por tanto, se puede concluir que la nocividad de los peligros cartografiados es poco importante en general.

Tipos de peligro	Factor H (nocividad)
Gasolinera	60
Vertedero residuos sólidos urbanos	50
Casas aisladas sin sistemas de alcantarillado	45
Industria alimenticia (cárnica)	45
Carretera	40
Áreas urbanas con sistema de alcantarillado	35
Cebadero	30
Establo	30
Cementerio	25
Áreas de pastoreo intensivo	25
Campo de cultivo	25

Cuadro 8.11. Nocividad de los peligros potenciales de contaminación en la sierra de Líbar.

La mayor nocividad se encuentra ligada a las infraestructuras de desarrollo urbano, concretamente la gasolinera representa un peligro potencial de contaminación relativamente elevado, máxime si se tiene en cuenta que las medidas de protección frente a escapes y fugas no han sido completamente implantadas. En el extremo opuesto, las actividades menos

nocivas son las agropecuarias dado que la ganadería es, principalmente, extensiva y la agricultura es de secano, modos de producción que no suelen ser muy nocivos para el medio ambiente.

8.2.3. INTENSIDAD DE LA CONTAMINACIÓN: FACTOR Q_n

El factor Q_n presenta, en general, valores bajos para todos los peligros cartografiados (mapa 1L anexo cartográfico). Las carreteras tienen un reducido índice medio diario de tránsito de vehículos (SET, 2002), los cementerios son de reducidas dimensiones dada la escasa población de las localidades a los que pertenecen, la densidad de vivienda es muy baja, el vertedero de residuos sólidos urbanos es de pequeño volumen y se encuentra sellado, la capacidad de almacenamiento de los tanques de gasolina es pequeña y los cultivos son, generalmente, de secano. Estas características se han tenido en cuenta para puntuarlas con un valor 0,8, es decir, la cantidad de contaminantes que pueden verter estas actividades es mínima en comparación con otras zonas y otras actividades.

La industria cárnica, los cortijos del interior de la sierra y las granjas de ganado estabulado son actividades en las cuales no se ha observado característica alguna que induzca a una modificación del factor y que reduzca o incremente la cantidad de contaminantes susceptibles de ser vertidos con respecto a una actividad estándar. Estas actividades presentan un rendimiento normal en su sistema productivo y han sido evaluadas con un valor 1. La falta de datos para su estimación al alza o a la baja es una razón por la cual tampoco se ha modificado este factor como ha ocurrido en el caso de las granjas. Las áreas de engorde para el ganado de los llanos de Líbar y Pozuelo han sido estimadas con un valor 0,9 (Andreo *et al.*, 2004). En estos puntos se ha observado una concentración importante de cabezas de ganado en comparación con otros sectores de la sierra, pero en ningún caso implican un aumento significativo de la peligrosidad.

8.2.4. PROBABILIDAD DE CONTAMINACIÓN: FACTOR R_f

La probabilidad de que ocurra un evento de contaminación en la sierra de Líbar es elevada (otra cosa es que esa contaminación sea peligrosa) y solamente tres de las actividades catalogadas puede decirse que tengan una baja probabilidad de contaminación, concretamente, los cementerios, el vertedero de residuos sólidos urbanos y la fábrica cárnica de Benaoján. En el caso de los cementerios, predominan los enterramientos en nicho, con lo cual se reduce la probabilidad de contaminación. El vertedero de residuos sólidos urbanos se encuentra actualmente clausurado y sellado. La industria cárnica tiene modernos sistemas de depuración y reciclaje de los residuos orgánicos generados en la sala de matadero y despiece, de manera que se asegura la buena gestión ambiental de la fase de producción. Los cementerios han sido evaluados con un factor R_f igual a 0,5, mientras que el vertedero y la industria cárnica con un valor 0,75 (mapa 1L, anexo cartográfico).

El resto de actividades se ha evaluado con un valor 1 (mapa 1L, anexo cartográfico). El valor 1 indica que las medidas de protección o bien son inexistentes, como ocurre en el caso de los cultivos y de las áreas de pastoreo del ganado, o bien no presentan un sistema de

control que garantice su funcionamiento correcto frente a un evento de contaminación de aguas subterráneas.

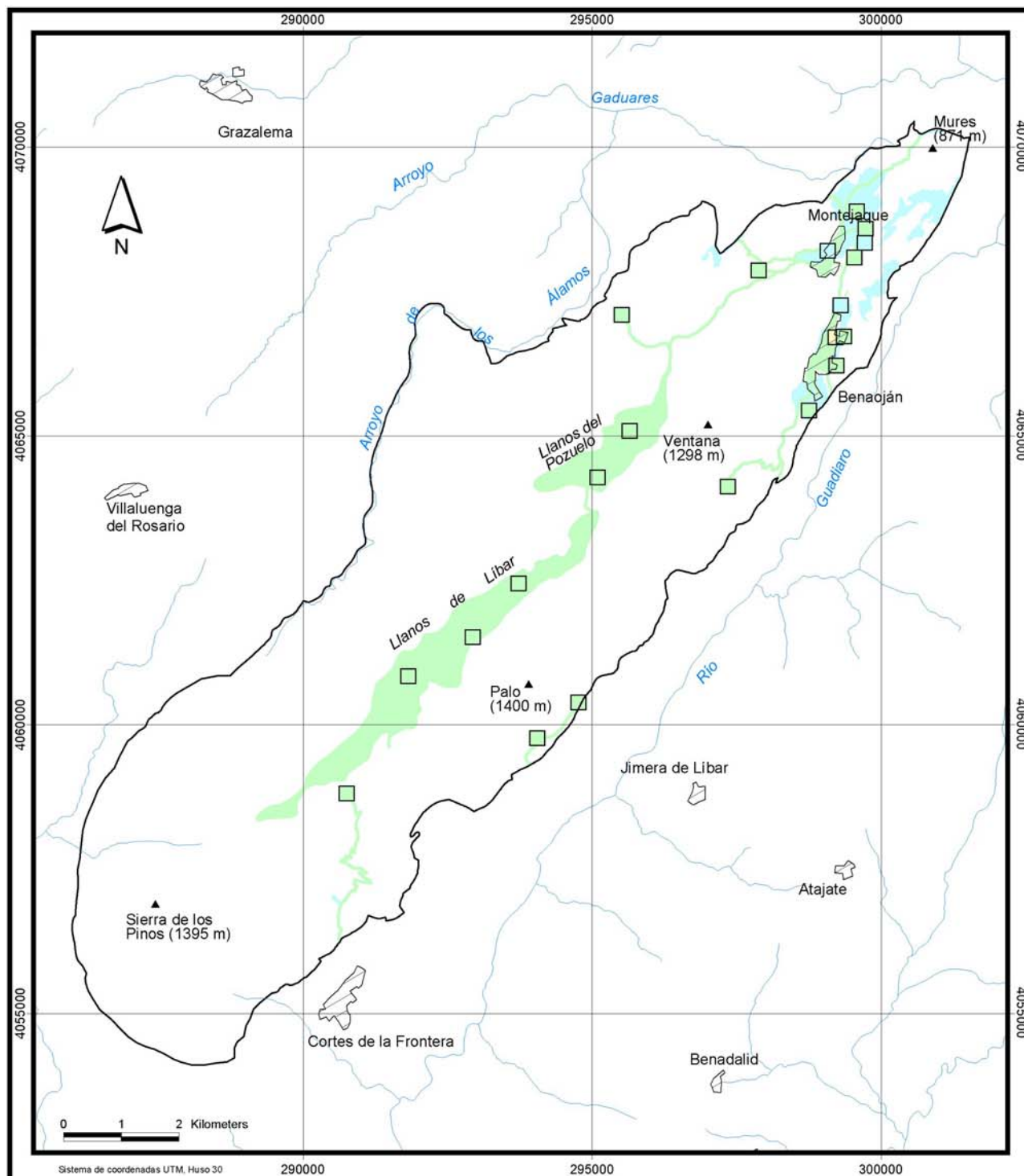
8.2.5. ÍNDICE DE PELIGROSIDAD HI

En general, la peligrosidad obtenida para el acuífero de la sierra de Líbar es Baja (mapa 13L y 1L del anexo cartográfico), lo que es representativo del bajo grado de antropización que sufre este espacio como parte del Parque Natural de Grazalema. Sólo se ha localizado un tipo de actividad potencialmente contaminante donde la peligrosidad es superior, de clase Moderada, como es una gasolinera en la localidad de Benaoján, y dos de clase Muy Baja, caso de los cementerios de Montejaque y Benaoján y las áreas cultivadas en el norte de la sierra.

La gasolinera presenta una mayor peligrosidad que el resto de actividades como consecuencia de la mayor nocividad de los compuestos orgánicos utilizados (bencenos, alkanos, compuestos aromáticos y alifáticos en general). La elevada nocividad o toxicidad de esta fuente motiva que la peligrosidad no se reduzca en función de la intensidad, es decir, de la cantidad de combustible que pueda ser almacenado y tampoco en función de la probabilidad de que se produzca un evento de contaminación puesto que las medidas de protección son exiguas en comparación con los sistemas adoptados por gasolineras de nueva implantación.

Los cementerios reducen su nocividad inicial de clase Baja a una peligrosidad final de clase Muy Baja en función principalmente del factor probabilidad. La probabilidad de ocurrencia de evento contaminante es muy baja y ello limita la peligrosidad de los compuestos asociados a esta fuente potencial de contaminación. También influye el hecho de que sean cementerios de localidades con un pequeño número de habitantes, por lo que la cantidad de contaminantes que podrían ser vertidos es baja. En el caso de los campos de cultivo, el principal factor que influye en la reducción de la peligrosidad es la intensidad, puesto que el sistema de producción y tipo de cultivo no suele utilizar grandes cantidades de sustancias nocivas. Además, el valor de nocividad muy cercano a una clase de peligrosidad Muy Baja implica que cualquier leve influencia de los factores Q_n o R_f tenga importante trascendencia en la peligrosidad final.

El resto de actividades tienen una peligrosidad de clase Baja. Actividades o fuentes de contaminación potencial como el vertedero de RSU, la industria cárnica, los campos de cultivo, las áreas de engorde del ganado, las áreas urbanizadas con sistema de alcantarillado y las carreteras son elementos cuya nocividad inicial queda modificada en función de la intensidad y de la probabilidad de contaminación, aunque esta modificación no es lo suficientemente intensa como para provocar una variación cualitativa de su peligrosidad en el mapa final del índice HI (mapa 1L del anexo cartográfico).



Sistema de coordenadas UTM, Huso 30



MAPA
Nº 13L

Acuífero de la sierra de Libar

**PELIGROSIDAD DE LAS ACTIVIDADES
POTENCIALMENTE CONTAMINANTES**

TESIS DOCTORAL
Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España

8.3. EVALUACIÓN Y CARTOGRAFÍA DE VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DEL ACUÍFERO DE LA SIERRA DE LÍBAR

En la sierra de Líbar se han aplicado los cinco métodos de evaluación y cartografía de la vulnerabilidad expuestos en el apartado 5.2: DRASTIC, GOD, AVI, EPIK y COP.

8.3.1. MÉTODO DRASTIC

El método DRASTIC (Esquema 1, anexo) se ha aplicado en la sierra de Líbar según los valores del cuadro 8.12.

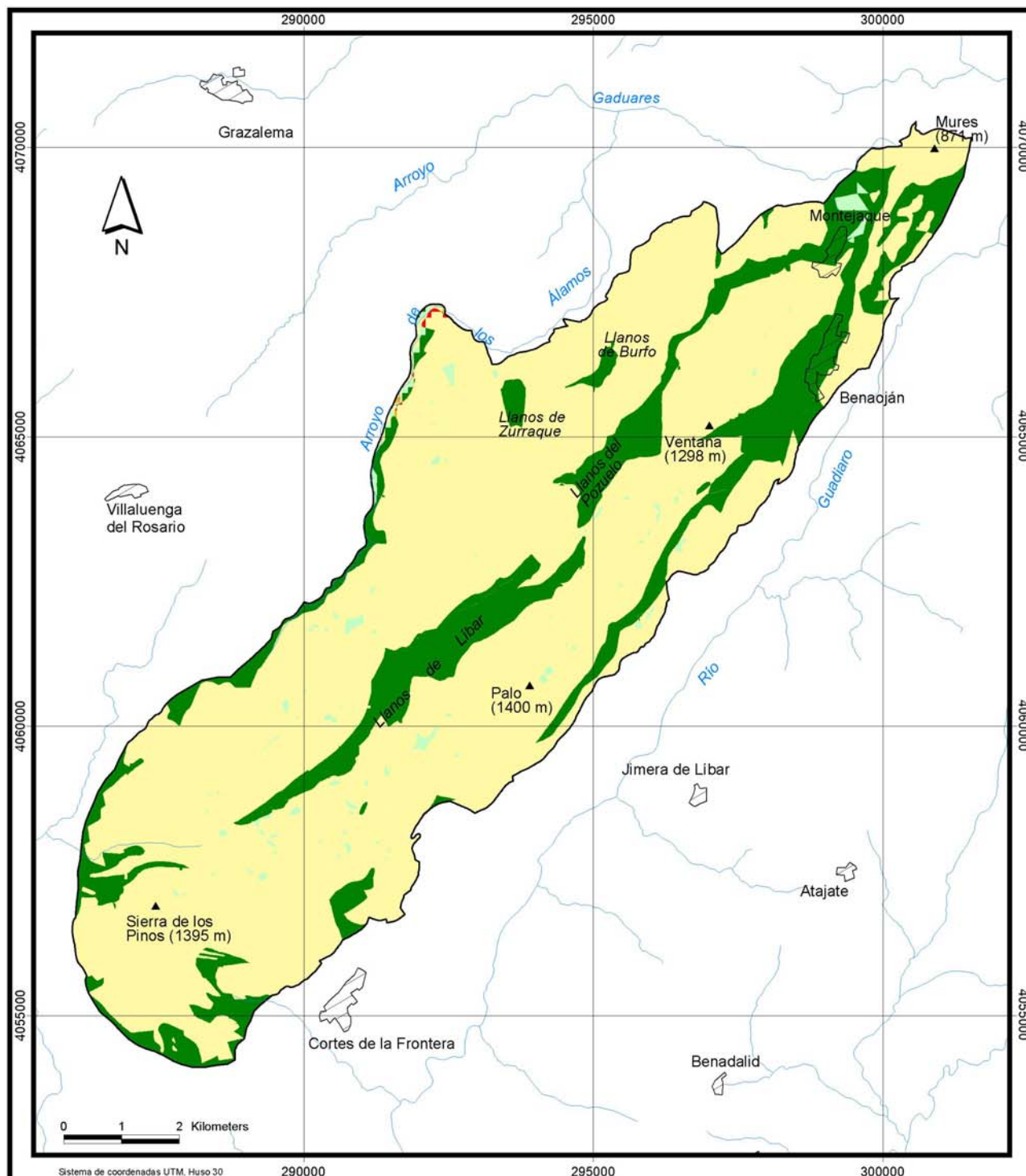
Variable, unidad de medida y valores							Puntuación (R)
D (m)	R (mm)	A	S	T (%)	I	C (m/día)	
≤ 1			Delgado o ausente y gravas	0 - 2	Caliza muy karstificada	> 80	10
1 - 5	> 254	Caliza karstificada		2 - 6	Caliza karstificada		9
							8
5 - 10			Arcilla con agregados				7
							6
10 - 15			Franco	6 - 12			5
					Margocalizas		4
15 - 25			Franco arcilloso	12 - 18	Flysch		3
25 - 30							2
> 30				>18			1

Cuadro 8.12. Puntuación de los parámetros del método DRASTIC en la Sierra de Líbar.

A partir de los valores del cuadro 8.12 se obtiene el mapa de vulnerabilidad mediante el método DRASTIC (mapa 14L y mapa 2L del anexo cartográfico). En este mapa se observa que los valores de vulnerabilidad obtenidos están próximos a los intervalos centrales. Las zonas de mayor vulnerabilidad, índice entre 160 y 180, coinciden con los sectores de la sierra donde afloran los materiales carbonáticos (color amarillo), los cuales representan el 80% de la superficie del acuífero (figura 8.14). De forma muy puntual se han localizado zonas con una vulnerabilidad elevada, valores del índice superiores a 180, paralelas al arroyo de los Álamos antes de su infiltración por la sima del Republicano. Esto se debe a la escasa profundidad del nivel piezométrico en este sector (IGME, 1984) que reduce la capacidad de protección de la zona no saturada.

Las zonas donde afloran materiales de baja permeabilidad que protegen el acuífero, como las margocalizas (en la parte central y bordes de la sierra) y materiales flyschoides (en el norte de la sierra) tienen una vulnerabilidad intermedia. La vulnerabilidad también es de grado intermedio en aquellos sectores donde la pendiente del terreno es muy pronunciada. El resto de la sierra presenta un grado de vulnerabilidad menor.

☞



Sistema de coordenadas UTM, Huso 30

Vulnerabilidad Mayor	Vulnerabilidad Intermedia	Vulnerabilidad Menor
■ 200 - 280	■ 140 - 160	■ 100 - 120
■ 180 - 200	■ 120 - 140	■ 80 - 100
■ 160 - 180		■ < 80

MAPA Nº 14L

Acuífero de la sierra de Libar

**VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO:
MÉTODO DRÁSTIC**

TESIS DOCTORAL
Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España

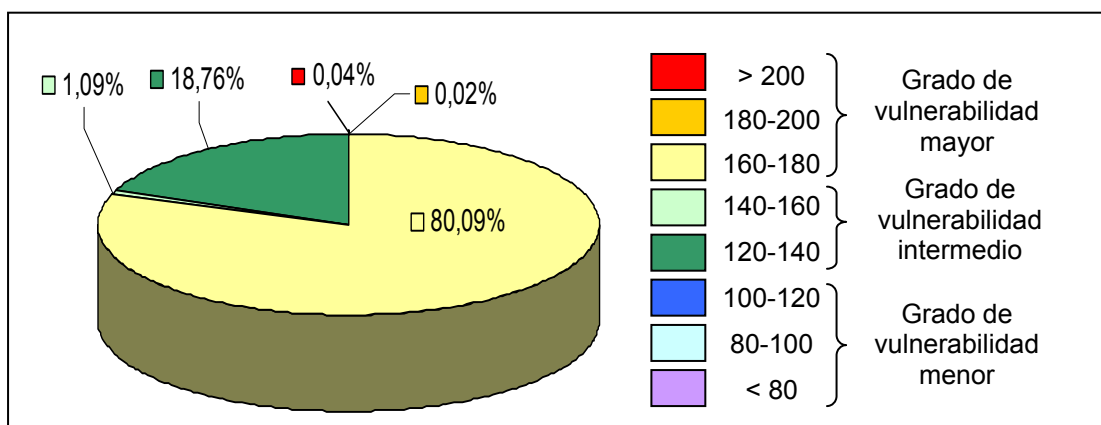


Figura 8.14. Porcentaje de superficie según intervalos de vulnerabilidad del método DRASTIC en la sierra de Líbar.

La vulnerabilidad mediante el método DRASTIC es función de siete parámetros pero en la distribución de las distintas clases de vulnerabilidad no influyen por igual los siete parámetros.. Con el propósito de conocer cuales son los parámetros que influyen con mayor o menor intensidad en las clases de vulnerabilidad, se ha realizado un análisis de regresión por mínimos cuadrados entre cada parámetro y el índice DRASTIC. A partir del análisis estadístico se han obtenido dos coeficientes representativos de la correlación entre una variable y el índice final: el coeficiente de correlación de Pearson y el de Determinación. En general, la correlación obtenida entre cada parámetro y el índice de vulnerabilidad es baja o intermedia en el mejor de los casos (cuadro 8.13).

Parámetro	Coficiente de Pearson ρ	Coficiente de Determinación R^2
D	0,62	0,39
R	0	0
A	0	0
S	0,59	0,35
T	0,14	0,02
I	0,66	0,44
C	0	0

Cuadro 8.13. Coeficientes de Pearson y de Determinación entre las variables y el índice DRASTIC en la sierra de Líbar.

Las variaciones en la distribución de las clases de vulnerabilidad son consecuencia, principalmente, de los parámetros D e I, relacionados con la capacidad de autodepuración de la zona no saturada, y el parámetro S que hace referencia al suelo como principal filtro biogeoquímico en el acuífero. Los parámetros R, A y C no tienen correlación alguna puesto que se comportan como constante de acuerdo con los valores asignados. El parámetro R del método no introduce variaciones en la vulnerabilidad a partir de una recarga superior a 250 mm/año, como ocurre en la sierra de Líbar (mapa 2L anexo cartográfico). En parámetro A, relacionado con la litología del acuífero, se ha considerado homogéneo en toda la zona

saturada y la conductividad hidráulica constante, ante la ausencia de variaciones litológicas y la falta de datos puntuales en sondeos. Por último, la pendiente tiene una correlación muy baja con el índice de vulnerabilidad. La correlación entre la pendiente y el índice no representa un dato importante desde un punto de vista cuantitativo, aunque sí presenta mayor importancia desde un punto de vista cualitativo, pues las zonas de color verde claro en el mapa (valores intermedios de vulnerabilidad) son consecuencia de cambios en el valor de la pendiente.

8.3.2. MÉTODO GOD

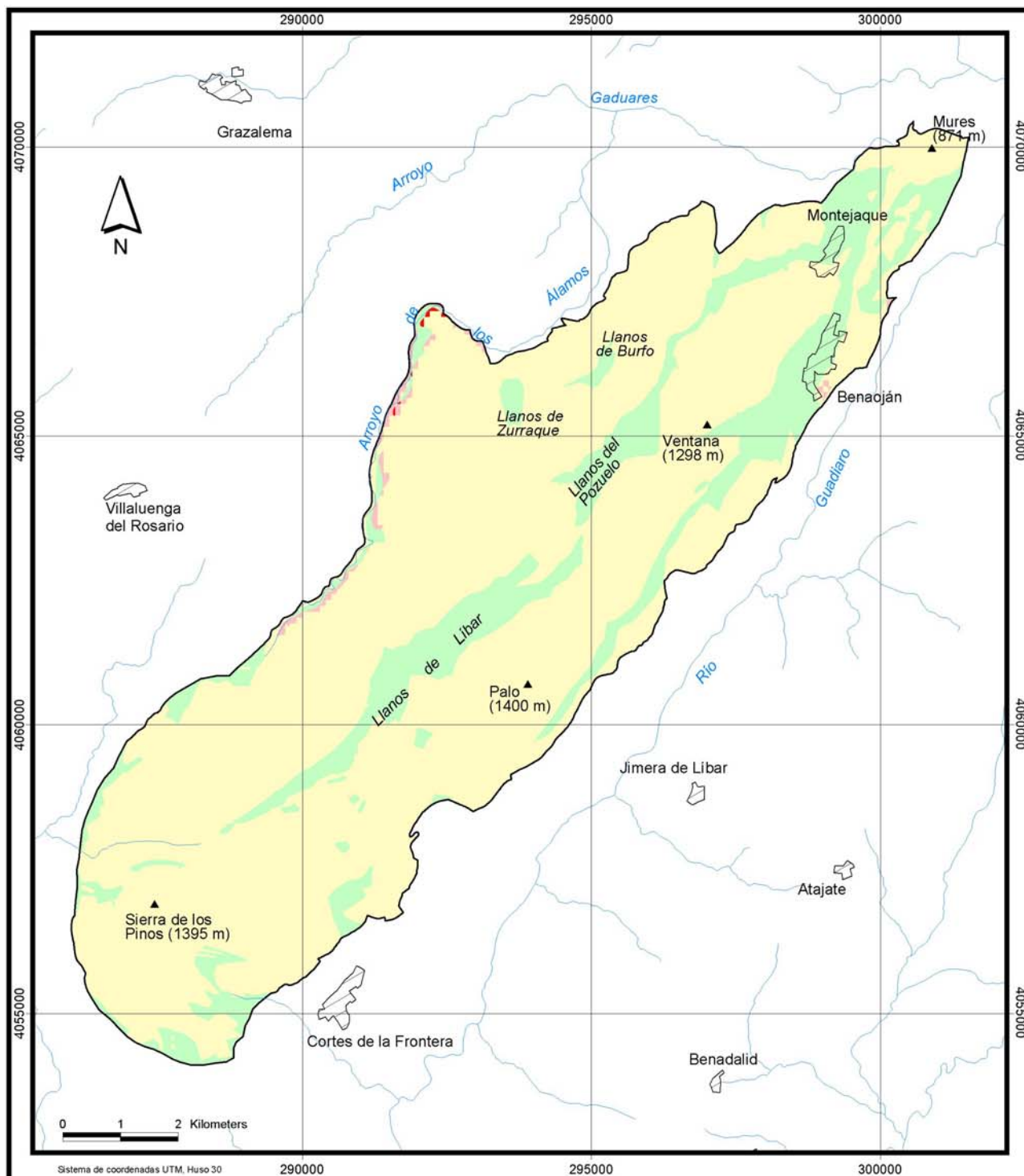
El método GOD (esquema 2 del anexo) se ha aplicado en la sierra de Líbar en función de las puntuaciones del cuadro 8.14.

Variable, unidad de medida y valores			Puntuación (R)
G	O	D (m)	
Libre	Calizas y dolomías	≤ 2	1
		2 – 5	0,9
	Derrubios y gravas coluviales	5 – 10	0,8
Cubierto	Gravas y arenas aluviales	10 – 20	0,7
	Margocalizas y materiales tipo flysch	20 – 50	0,6
		50 – 100	0,5
		Suelos residuales: arcillas	> 100

Cuadro 8.14. Puntuación de los parámetros del método GOD en la Sierra de Líbar.

Los resultados de aplicar el método GOD a la sierra de Líbar se muestran en el mapa 15L (ver también mapa 3L del anexo cartográfico). En este mapa se observa que la vulnerabilidad del acuífero es, principalmente, de grado Moderado allí donde afloran los materiales carbonáticos y el espesor de la zona no saturada supera los 50 m. Según este método, solamente las zonas con un espesor inferior a 50 m tienen una vulnerabilidad más elevada, de grado Alto, mientras que con un espesor inferior a 10 m la vulnerabilidad es máxima, es decir, de clase Muy Alta.

Las zonas que tienen una vulnerabilidad Alta se localizan, por un lado, en el borde occidental de la sierra, en el cauce del arroyo de los Álamos desde la sima del Republicano hasta el polje de Zurraque y, por otro lado, en las proximidades de los manantiales de Benaoján y Cueva del Gato. Con un grado de vulnerabilidad Muy Alto sólo se ha localizado un pequeño sector en el arroyo de los Álamos, junto a zonas de vulnerabilidad Alta.



Sistema de coordenadas UTM, Huso 30

- | | |
|--|--|
| Muy Alta | Baja |
| Alta | Muy Baja |
| Moderada | |

MAPA
Nº 15L

Acuífero de la sierra de Libar

**VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO:
MÉTODO GOD**

*TESIS DOCTORAL
Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo
de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG.
Aplicación en acuíferos del Sur de España*

Los sectores del acuífero que tienen un grado de vulnerabilidad Bajo son los que se encuentran más protegidos. No se han obtenido zonas con una vulnerabilidad mínima (clase Muy Baja). Las zonas de vulnerabilidad Baja se corresponden con los afloramientos de materiales de baja permeabilidad que cubren el acuífero. Se trata de las margocalizas cretácicas de la parte central de la sierra, poljes de los Llanos de Líbar y Pozuelo y borde de la sierra; de las arcillas del flysch al norte de la localidad de Montejaque y de los suelos residuales localizados en dolinas al sureste de los Llanos de Líbar y polje de Benaoján.

En la figura 8.15 se muestra la importancia de cada una de las clases de vulnerabilidad en función de la superficie del acuífero que ocupan. La clase de vulnerabilidad Moderada es la que caracteriza al acuífero puesto que en un 80% de la superficie del mismo se obtiene este grado de vulnerabilidad. Por el contrario, las zonas con una vulnerabilidad más elevada (clases Alta y Muy Alta) apenas tienen importancia en cuanto a superficie ocupada, tan sólo 55 ha, aproximadamente. Los espacios menos vulnerables de la sierra representan cerca de una quinta parte de la superficie de la zona de estudio pero se corresponden con aquellas áreas donde los procesos antrópicos son más importantes.

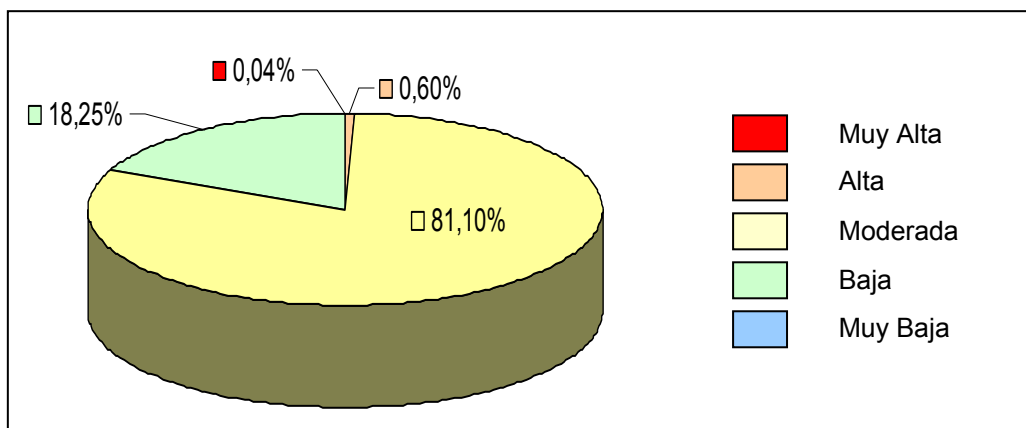


Figura 8.15. Porcentaje de superficie según clases de vulnerabilidad del método GOD en la sierra de Líbar.

En función de los coeficientes de Pearson y de Determinación (cuadro 8.15), se ha deducido que parámetros están más correlacionados con el índice de vulnerabilidad.

Parámetro	Coefficiente de Pearson ρ	Coefficiente de Determinación R^2
G	0,59	0,35
O	0,75	0,57
D	0,65	0,42

Cuadro 8.15. Coeficientes de Pearson y de Determinación entre las variables y el índice GOD en la sierra de Líbar.

Todos los valores obtenidos muestran una correlación positiva, más intensa entre el parámetro O y el índice, pero no muy elevada. Todos los parámetros muestran una correlación similar, aunque el parámetro G (relacionado con el tipo de confinamiento) es el que presenta un coeficiente menor, el cual sólo explica un 35% de las variaciones del índice. En una situación

intermedia queda el parámetro D, relacionado con el espesor de zona no saturada, pero que resulta determinante a la hora de establecer dos clases de vulnerabilidad: Alta y Muy Alta.

8.3.3. MÉTODO AVI

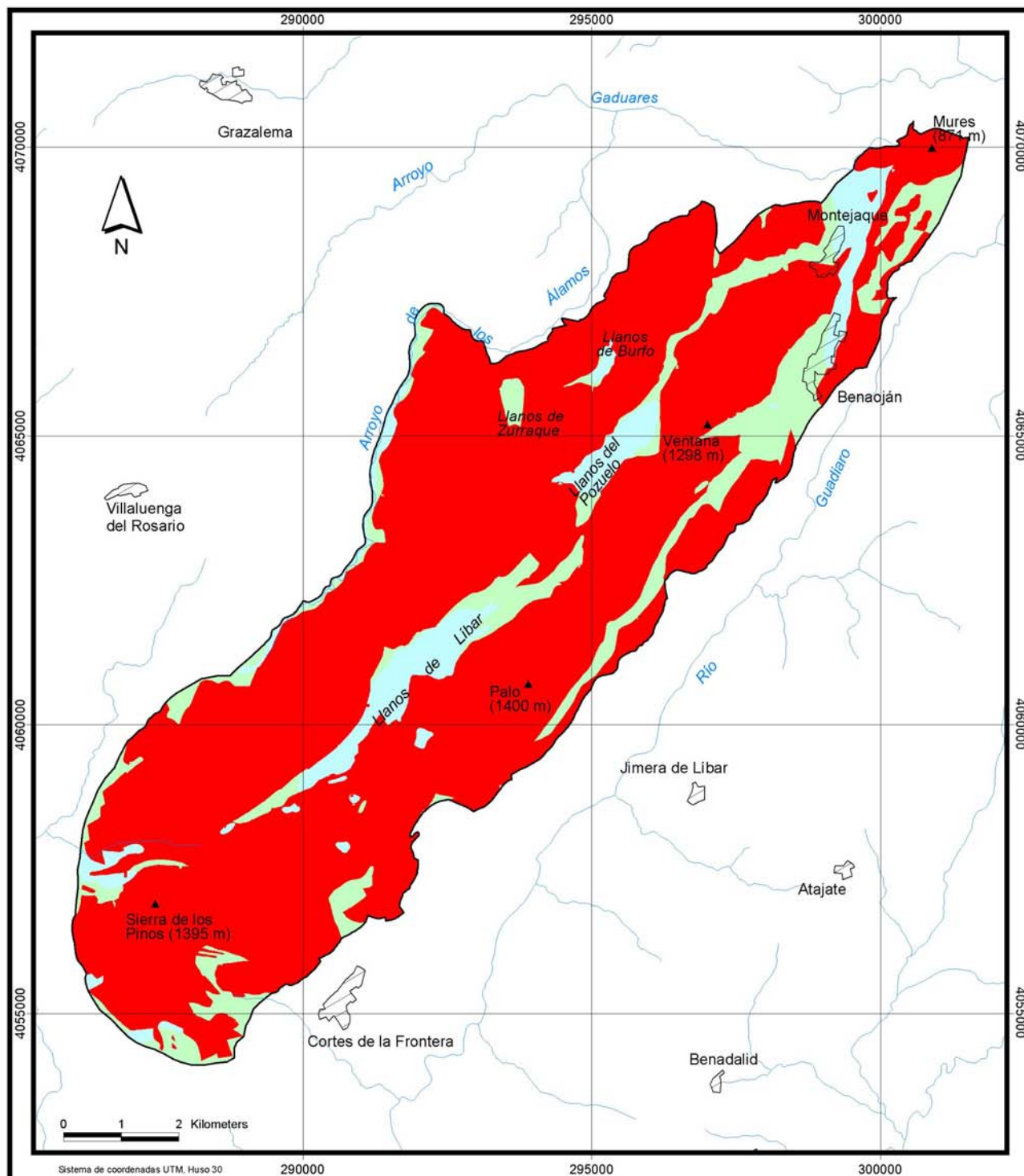
De los métodos aplicados en la sierra de Líbar, AVI es el único que no asigna puntuaciones a los valores de los parámetros empleados para obtener el índice de vulnerabilidad, sino que se utilizan valores estimados de cada uno de ellos. El índice de vulnerabilidad se obtiene mediante la expresión 5.4 (epígrafe 5.2.3), también incluida en el esquema 3 del anexo cartográfico. Los valores que se han utilizado para los parámetros del método se muestran en el cuadro 8.16.

Capa de la zona no saturada		Parámetro	
		d (m)	k (m/día)
Rocas	Calizas	0 - 1000	10^3
	Margocalizas	60	10^{-2}
	Flysch	20	10^{-4}
Suelos	Suelos residuales en poljes (Vertisoles)	1	10^{-4}
	Suelos en poljes (Cambisoles)	0,5	10^{-4}

Cuadro 8.16. Valores de los parámetros del método AVI en la sierra de Líbar.

El resultado del cociente entre los parámetros d y k, que permite calcular el índice de vulnerabilidad y, por tanto, el mapa de vulnerabilidad mediante el método AVI, se muestra en el mapa 16L (ver también mapa 3L anexo cartográfico). Según este mapa, el acuífero de la sierra de Líbar presenta una vulnerabilidad de clase Muy Alta (máxima). Las zonas de máxima vulnerabilidad se corresponden con el afloramiento de materiales carbonáticos (calizas y dolomías del Jurásico) a consecuencia de la elevada permeabilidad de los mismos. El resto del acuífero presenta una elevada capacidad de protección debido a la existencia de capas de baja permeabilidad sobre las calizas y dolomías (materiales tipo flysch, margocalizas y suelos arcillosos); en estos casos la vulnerabilidad es de clase Baja o Muy Baja. La diferencia entre zonas con una clase Baja y Muy Baja se debe a la presencia de suelos: donde hay suelos profundos (aprox. 1 m) como en los poljes de Líbar, Pozuelo, Burfo y Benaoján, la vulnerabilidad es de clase Muy Baja y donde los suelos son menos profundos aumenta hasta la clase Baja.

El acuífero puede considerarse que es muy vulnerable, dado que en un 80% de la superficie del mismo la vulnerabilidad es de clase Muy Alta (figura 8.16). Las áreas del acuífero que tienen mayor protección natural, es decir, aquellas en las que la vulnerabilidad es de clase Baja o Muy Baja, representan una quinta parte del mismo. Por tanto, una escasa proporción del acuífero es poco vulnerable a la contaminación, aunque casualmente es en estas zonas donde se concentra la población y donde tienen lugar la mayoría de las actividades humanas.



Sistema de coordenadas UTM, Huso 30

- | | |
|---|--|
| Muy Alta | Baja |
| Alta | Muy Baja |
| Moderada | |

MAPA
Nº 16L

Acuífero de la sierra de Libar

**VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO:
MÉTODO AVI**

TESIS DOCTORAL
Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo
de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG.
Aplicación en acuíferos del Sur de España

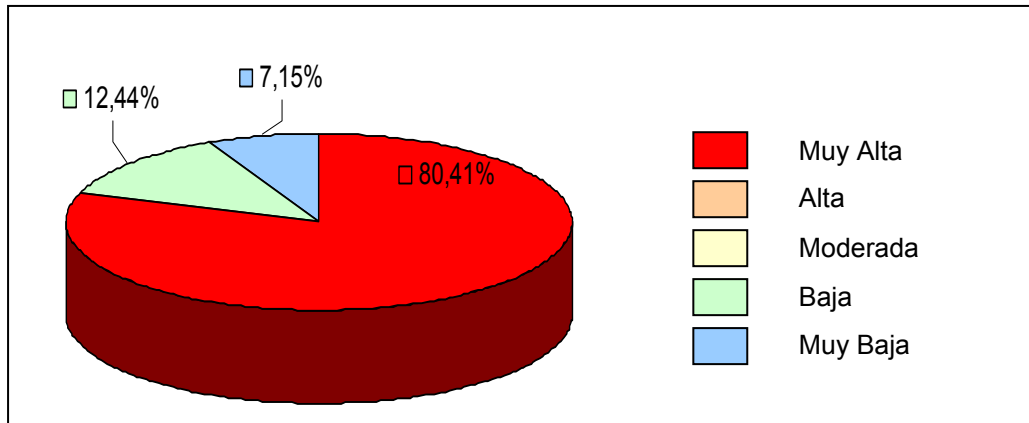


Figura 8.16. Porcentaje de superficie según clases de vulnerabilidad del método AVI en la sierra de Líbar.

La influencia de cada parámetro del método AVI en la vulnerabilidad del acuífero se ha obtenido a partir de los coeficientes de Pearson y de Determinación, calculados entre los parámetros del método y el índice de vulnerabilidad en cada capa de la zona no saturada (cuadro 8.17).

Capa de la zona no saturada	Parámetro	Coefficiente de Pearson ρ	Coefficiente de Determinación R^2
Suelo	d	0,55	0,31
	k	-0,27	0,07
Materiales no kársticos	d	-0,04	0
	k	-0,29	0,08
Materiales kársticos	d	-0,25	0,06
	k	0	0

Cuadro 8.17. Coeficientes de Pearson y de Determinación entre las variables y el índice AVI en la sierra de Líbar.

Las correlaciones obtenidas indican que el principal parámetro que muestra variaciones en la vulnerabilidad es el espesor de suelos (parámetro d de la capa edáfica). El parámetro d en la capa edáfica presenta un coeficiente de correlación positivo, es decir, a mayor espesor de suelo mayor valor del índice y menor vulnerabilidad. En el resto de capas este parámetro, y también k, muestran una correlación no significativa.

8.3.4. MÉTODO EPIK

El método EPIK (esquema 4 del anexo cartográfico) se ha aplicado en la sierra de Líbar teniendo en cuenta las puntuaciones asignadas a los elementos del acuífero relacionados con cada parámetro (cuadro 8.18).

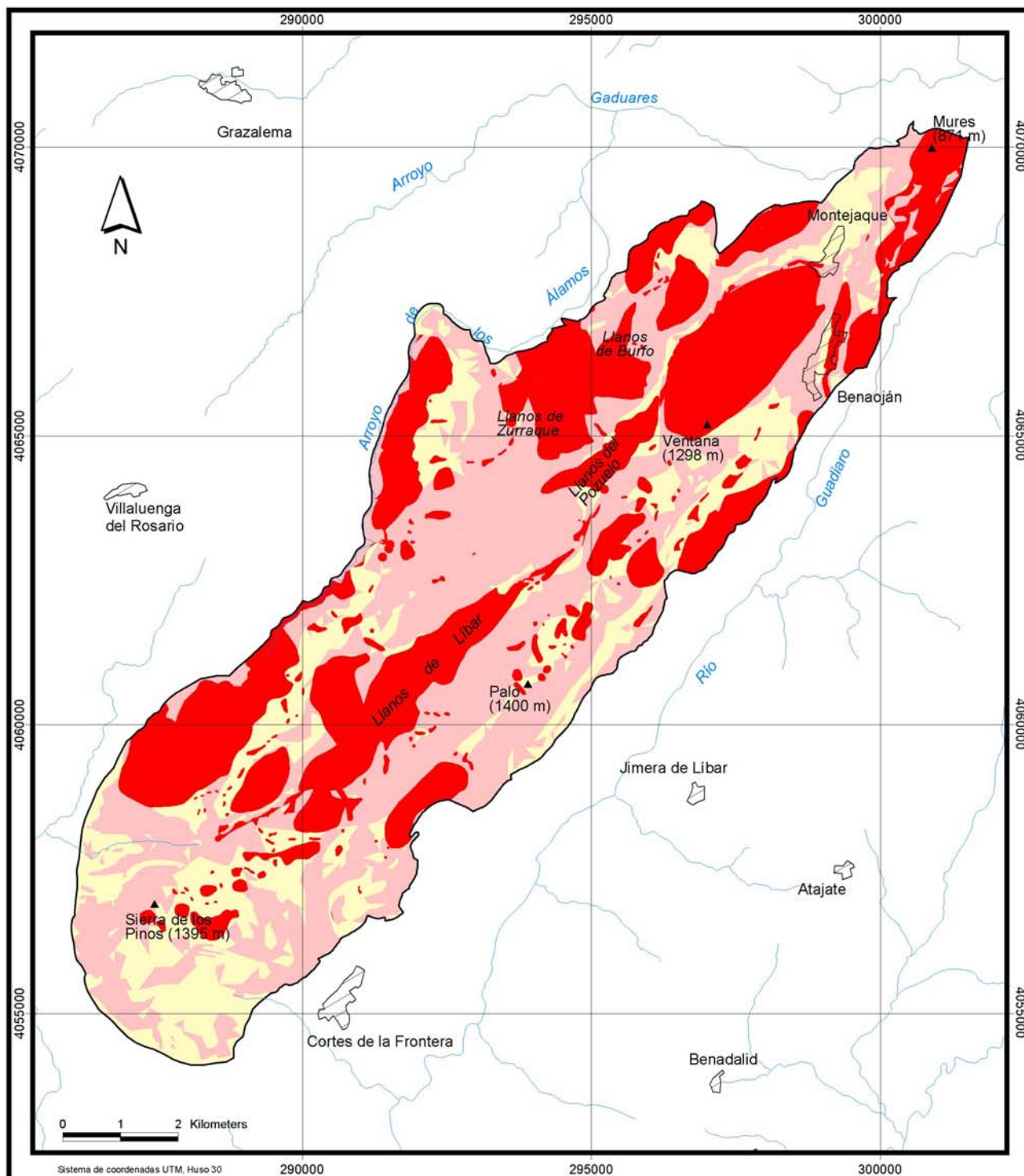
Variable y valor				Puntuación o valor típico (R)
E Epikarst	P Capa protectora	I Condiciones de infiltración	K Red kárstica	
Sumideros, dolinas, lapiares, afloramientos con intensa fracturación	< 20 cm	Arroyos perdedores (temporales o perennes), lechos y riberas de arroyos, curso de agua que alimenta un sumidero y drenes artificiales en el interior de la cuenca vertiente a un sumidero	Red kárstica bien desarrollada: conductos de tamaño decimétrico a métrico, bien conectados y raramente obstruidos	1
		Sectores no drenados de la cuenca vertiente a un sumidero cuya pendiente es mayor de 10% para zonas cultivadas y mayor del 25% para praderas y pastizales		2
Zonas intermedias entre alineamientos de dolinas; valles secos	> 100 cm o una formación geológica de baja permeabilidad	- Sectores no drenados de la cuenca vertiente a un sumidero cuya pendiente es menor del 10% para zonas de cultivos y menor de 25% para pastos y praderas - Sectores no drenados de la cuenca no vertiente a un sumidero cuya pendiente es superior al 10% para zonas cultivadas y mayores del 25% para praderas y pastizales		3
Resto de la cuenca de alimentación	> 100 cm de suelo con una formación geológica de baja permeabilidad	Resto de la cuenca no vertiente a un arroyo que alimenta un sumidero		4

Cuadro 8.18. Puntuación de los parámetros del método EPIK en la Sierra de Líbar.

Una de las características más significativas del método EPIK es la utilización de solo tres clases del índice de vulnerabilidad, y una cuarta clase condicionada por un valor concreto del parámetro P (P = 4). La aplicación realizada en la sierra de Líbar solo muestra tres clases del índice y no se han detectado zonas consideradas como P₄ (mapa 17L y mapa 4L del anexo cartográfico).

Las áreas de mayor vulnerabilidad se extienden por toda la sierra, si bien son menos abundantes en el extremo Sur donde hay una baja presencia de formas kársticas. Las zonas de mayor vulnerabilidad están estrechamente ligadas a la presencia de formas kársticas en superficie como dolinas, lapiares y poljes (ver mapa 8L de geomorfología).

Las zonas con vulnerabilidad Muy Alta (mapa 17L), están relacionadas con lapiares, poljes, dolinas y campos de dolinas. Con un grado de vulnerabilidad Alto ha sido evaluado el resto del acuífero, donde afloran materiales carbonáticos no drenados a través de un sumidero y cuya una pendiente es inferior a 25%. Los sectores de calizas y dolomías jurásicas que tienen pendiente superior a 25 %, tienen una vulnerabilidad menor (Moderada), al igual que las zonas no vertientes a un sumidero y en las que afloran materiales de baja permeabilidad como flysch y margocalizas del cretácico.



Sistema de coordenadas UTM, Huso 30

- | | |
|--|--|
| ■ Muy Alta (S1) | ■ Moderada (S3) |
| ■ Alta (S2) | ■ Débil (P4) |

MAPA
Nº 17L

Acuífero de la sierra de Libar

**VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO:
MÉTODO EPIK**

*TESIS DOCTORAL
Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo
de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG.
Aplicación en acuíferos del Sur de España*

Los datos de superficie del acuífero según la clase de vulnerabilidad (figura 8.17) muestran que la sierra de Líbar tiene una baja capacidad de autoprotección, dado que más de una tercera parte de la misma presenta vulnerabilidad Muy Alta (S1) y en más de tres cuartas partes hay una vulnerabilidad Alta o Muy Alta. Poco más de una quinta parte de la superficie de la zona de estudio tiene una vulnerabilidad Moderada equivalente a una figura de protección S3, el resto necesita de protección frente a los peligros de contaminación puesto que la capacidad de autodepuración es inferior.

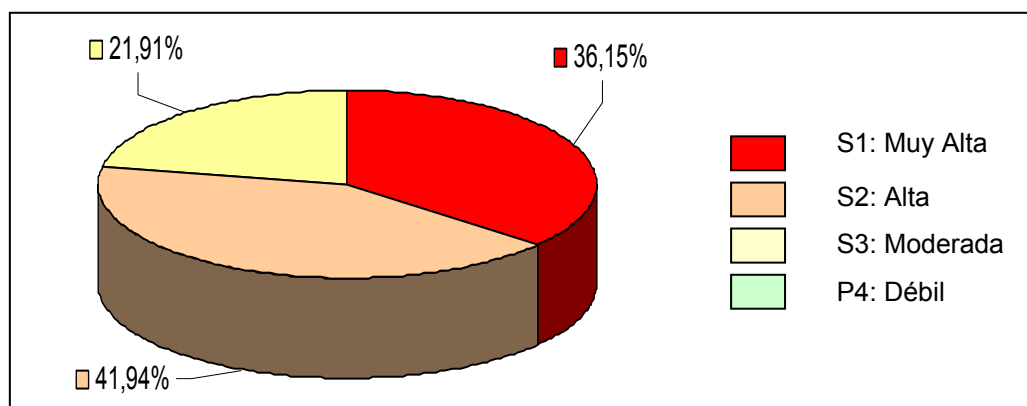


Figura 8.17. Porcentaje de superficie según clases de vulnerabilidad del método EPIK en la sierra de Líbar.

A partir de los coeficientes de correlación del cuadro 8.19 se establece que E e I son los parámetros con una mayor correlación con el índice. E (Epikarst) es el parámetro que mayor importancia tiene en la distribución de la vulnerabilidad, en el 62% de los casos la vulnerabilidad está determinada, principalmente, por este parámetro. Otro parámetro que actúa de forma determinante en la distribución de la vulnerabilidad es I (condiciones de infiltración) aunque sólo en un 35% de los casos. Los otros parámetros, P y K, no tienen peso en la distribución de la vulnerabilidad (sí en el valor del índice) pues muestran una correlación nula, en el caso de K, y prácticamente nula, en el caso de P.

Parámetro	Coefficiente de Pearson ρ	Coefficiente de Determinación R^2
E	0,79	0,62
P	0,18	0,03
I	0,59	0,35
K	0	0

Cuadro 9.19. Coeficientes de Pearson y de Determinación entre las variables y el índice EPIK en la sierra de Líbar.

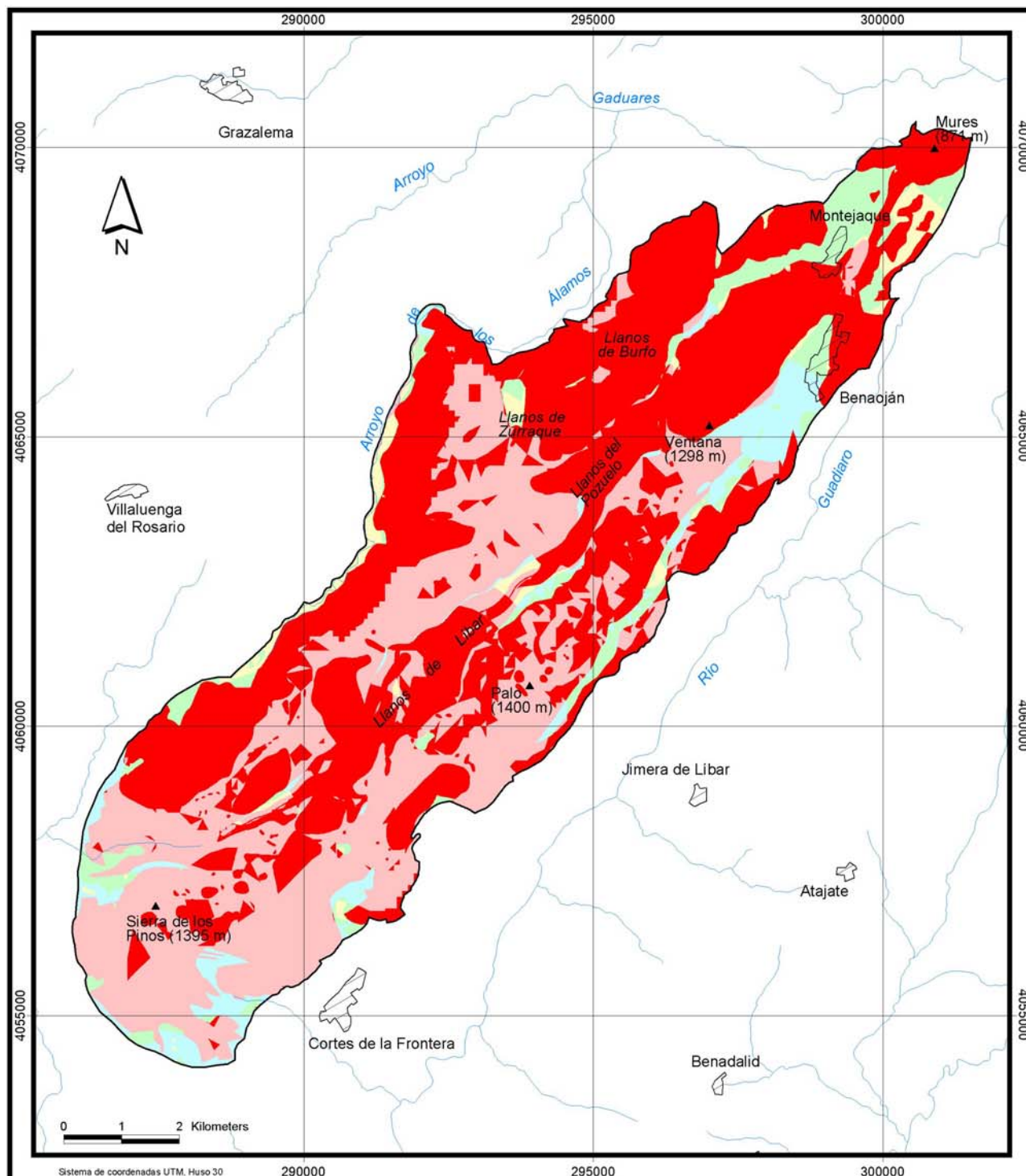
8.3.5. MÉTODO COP

El método COP (esquema 5 del anexo cartográfico) ha sido aplicado en la sierra de Líbar mediante los valores del cuadro 8.20 y el resultado se muestra en el mapa 18L (mapa 5L del anexo cartográfico).

Factor	Subfactor	Variable		Puntuación
C	Escenario A: Dentro de un área vertiente a un sumidero	Distancia al sumidero	Entre 0 y 3500 m	0 – 0,6
		Distancia al arroyo vertiente	0 – 10 m	0
			10 – 100 m	0,5
		> 100 m ó ausencia de arroyo vertiente	1	
	Pendiente y vegetación	0 – 8 %	1	
		8 – 31 % y sin vegetación	0,9	
		31 – 76 % y sin vegetación	0,8	
Escenario B: Resto del acuífero	Formas superficiales	Karst bien desarrollado desnudo	0,25	
		Karst desarrollado cubierto por una capa permeable	0,5	
		Karst escasamente desarrollado y desnudo	0,5	
	Ausencia de formas kársticas	1		
Pendiente y vegetación	0 – 8 %	0,75		
	8 – 31 % y sin vegetación	0,85		
O	Suelos (O _S)	Textura y espesor	Arcilloso y > 1 m	5
			Arcilloso y 0.5 - 1 m	4
			Arcilloso y 0 - 0.5 m	3
			Limoso y 0.5 - 1 m	3
	Litología (O _L)	Litología y fracturación	Flysch margoso	1000
Margocalizas cretácicas			500	
	Grado de confinamiento	Arenas y gravas aluviales	10	
		Calizas y dolomías jurásicas	1	
P	Cantidad (P _Q)	Precipitación media en año húmedo	> 1600 mm/año	0,4
			> 1200 y ≤ 1600 mm/año	0,3
	Intensidad (P _I)	Precipitación y nº de días	> 800 y ≤ 1200 mm/año	0,2
			> 20 mm/día	0,2
			> 10 y ≤ 20 mm/ día	0,4

Cuadro 8.20. Puntuación de los parámetros del método COP en la Sierra de Líbar.

La vulnerabilidad del acuífero de la sierra de Líbar es principalmente de grado Alto o Muy Alto (mapa 18L). Toda la superficie del acuífero donde aflora las calizas y dolomías del Jurásico tiene una vulnerabilidad elevada (Alta o Muy Alta). La diferencia entre una clase y otra depende del espesor de la zona no saturada, la pendiente y la presencia de formas kársticas en superficie, principalmente, sumideros activos que recogen el agua de escorrentía. En el borde occidental de la sierra hay zonas con vulnerabilidad Muy Alta debido a que el espesor de calizas y dolomías karstificadas sin cubierta edáfica es inferior a 250 m. Otras zonas con una vulnerabilidad Muy Alta son los afloramientos carbonáticos sin suelo donde la pendiente es inferior al 8 % (independientemente del espesor de zona no saturada). Además de los afloramientos de calizas y dolomías, también se han localizado áreas con vulnerabilidad Muy Alta, como ocurre en los poljes de los Llanos de Líbar, Pozuelo, Benaoján y Burfo donde los sumideros activos constituyen puntos de drenaje de la escorrentía superficial generada sobre los materiales de baja permeabilidad, concretamente sobre las margocalizas cretácicas. A medida que aumenta la distancia al sumidero y a los arroyos vertientes al mismo, disminuye la vulnerabilidad del acuífero hasta un grado de vulnerabilidad Moderado, como mínimo.



Sistema de coordenadas UTM, Huso 30

- Muy Alta
- Alta
- Moderada
- Baja
- Muy Baja

MAPA
Nº 18L

Acuífero de la sierra de Libar

**VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO:
MÉTODO COP**

*TESIS DOCTORAL
Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo
de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG.
Aplicación en acuíferos del Sur de España*

Sectores del acuífero con alta protección, es decir, baja vulnerabilidad, son aquellos donde afloran materiales de baja permeabilidad en cuencas no vertientes a sumideros activos como ocurre en el extremo septentrional de la zona de estudio, al Norte y Este de la localidad de Montejaque y al Sur de la localidad de Benaoján. En el extremo meridional de la zona de estudio también se pueden observar algunos sectores donde la vulnerabilidad es Baja o Muy Baja, en cualquier caso como consecuencia de la presencia de materiales de baja permeabilidad.

El porcentaje de superficie que ocupa cada clase de vulnerabilidad en la zona de estudio (figura 8.18) muestra que el acuífero de la sierra de Líbar es muy vulnerable. Más del 85% de su superficie tiene vulnerabilidad Alta o Muy Alta y más de la mitad tiene un grado de vulnerabilidad de clase máxima. El resto, apenas un 15%, tiene menores grados de vulnerabilidad.

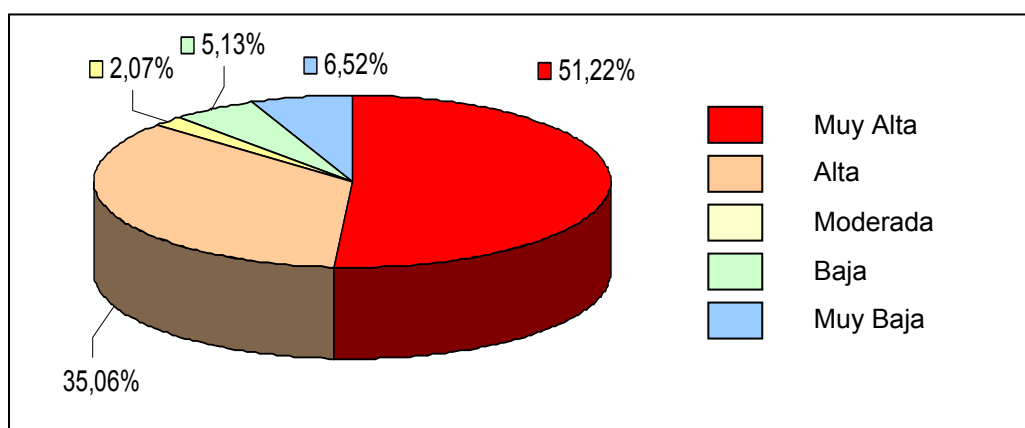


Figura 8.18. Porcentaje de superficie según clases de vulnerabilidad del método COP en la sierra de Líbar.

Los factores, que en mayor medida, se correlacionan con el índice de vulnerabilidad del método según los coeficientes de Pearson y de Determinación (cuadro 8.21), son C y, en menor medida, O. El factor C tiene una elevada correlación con el índice COP, en el 65% de los casos las variaciones en el índice son consecuencia de variaciones en el factor C. El factor O presenta una menor correlación, mientras que el factor P apenas tiene significación en la distribución de la vulnerabilidad.

Factor	Coficiente de Pearson ρ	Coficiente de Determinación R^2
C	0,81	0,65
O	0,51	0,26
P	0,09	0,01

Cuadro 8.21. Coeficientes de Pearson y de Determinación entre las variables y el índice COP en la sierra de Líbar.

8.3.6. ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS EN LA SIERRA DE LÍBAR

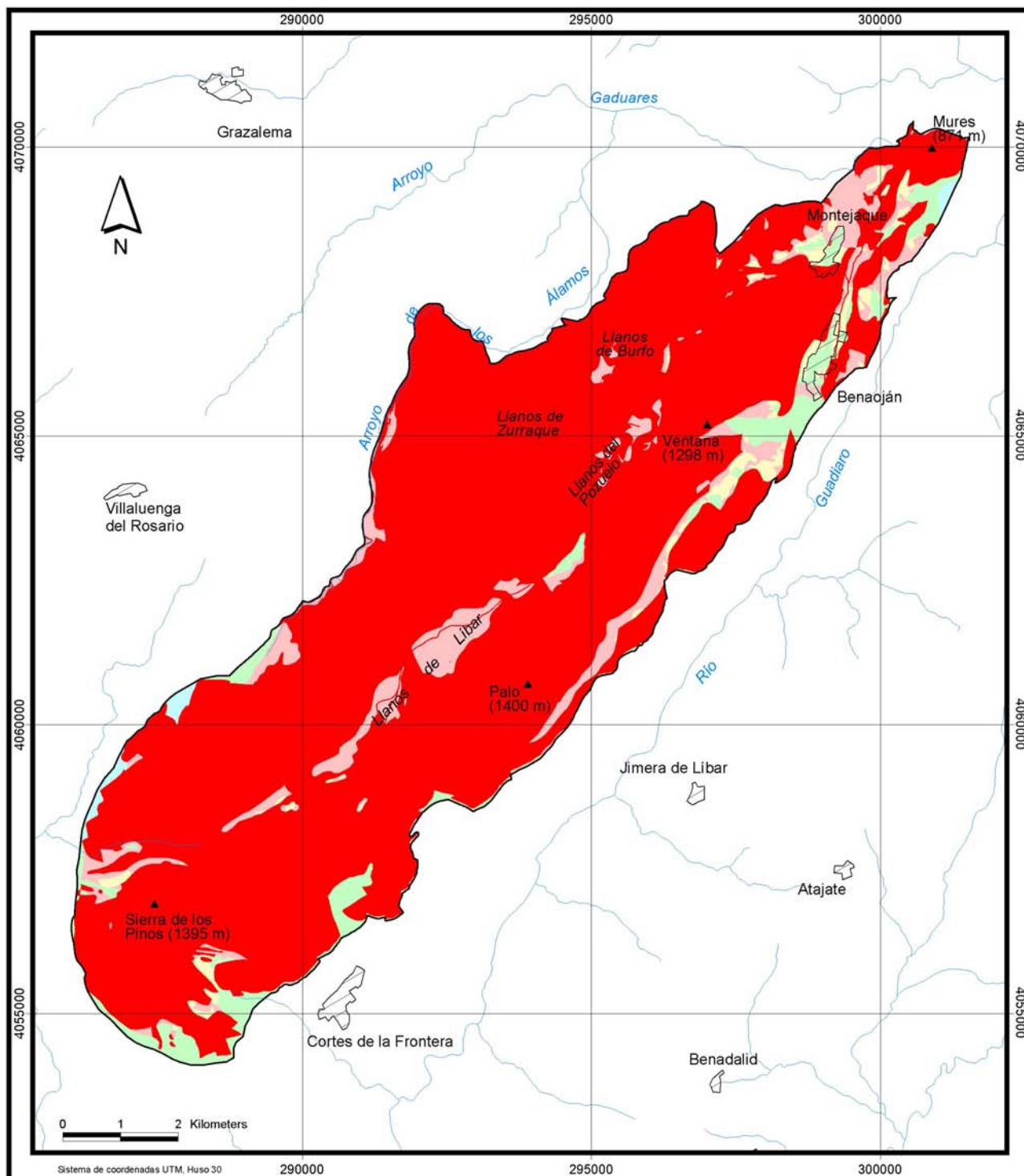
La comparación y análisis de los resultados obtenidos con los distintos métodos, sirve de base para la elección del resultado de un método como componente de la vulnerabilidad del acuífero en la posterior estimación del riesgo. Además, se han recopilado mapas de vulnerabilidad elaborados previamente en la sierra de Líbar para compararlos con los resultados obtenidos en este trabajo. En este sentido, se ha utilizado el mapa de vulnerabilidad obtenido por Brechenmacher (2002) quien aplicó el método PI (mapa 19L).

Debido a la disparidad de intervalos que utilizan los métodos para cartografiar la vulnerabilidad, lo cual impide que sean fácilmente comparables, se ha establecido como criterio de clasificación del índice una leyenda de cinco intervalos de acuerdo con los criterios apuntados por Adams *et al.* (1994). En el caso del método DRASTIC ocho clases de vulnerabilidad, la clasificación del índice ha sido modificada y se ha agrupado el número original de intervalos de ocho a cinco, como muestra el cuadro 8.22 (y esquema 1 del anexo). Las nuevas clases mantienen los límites de los intervalos originales, de manera que el mapa final es una simplificación del original, con lo que no se modifica el significado de los intervalos propuestos por Aller *et al.* (1987). El resultado de la nueva clasificación del método DRASTIC se muestra en el mapa 20L.

Intervalos del índice de vulnerabilidad DRASTIC, según Aller <i>et al.</i> (1987)	Intervalos agrupados del índice de vulnerabilidad DRASTIC	Clase de vulnerabilidad
≥ 200	≥ 200	Muy Alta
180 - 200	160 - 200	Alta
160 - 180		
140 - 160		
120 - 140	120 - 160	Moderada
100 - 120	80 - 120	Baja
80 - 100		
< 80	< 80	Muy Baja

Cuadro 8.22. Conversión de la leyenda del método DRASTIC en cinco intervalos.

En el caso del método EPIK, se utiliza una clasificación de la vulnerabilidad en cuatro clases, pero el hecho de interpretar el índice mediante criterios cualitativos (clase de vulnerabilidad Baja o Débil igual a P₄) y cuantitativos, dificulta la posibilidad elaborar cinco clases de vulnerabilidad que mantengan, a su vez, el mismo significado de las clases y los límites de los intervalos originales. Por tanto, se ha optado por mantener las clases propuestas por Doerfliger y Zwhalen (1997), teniendo en cuenta que no se puede obtener una clase de vulnerabilidad Muy Baja, hecho que denota la elevada vulnerabilidad de los acuíferos kársticos (acuíferos para los cuales fue creado el método).



Sistema de coordenadas UTM, Huso 30

- | | |
|---|--|
| Muy Alta | Baja |
| Alta | Muy Baja |
| Moderada | |

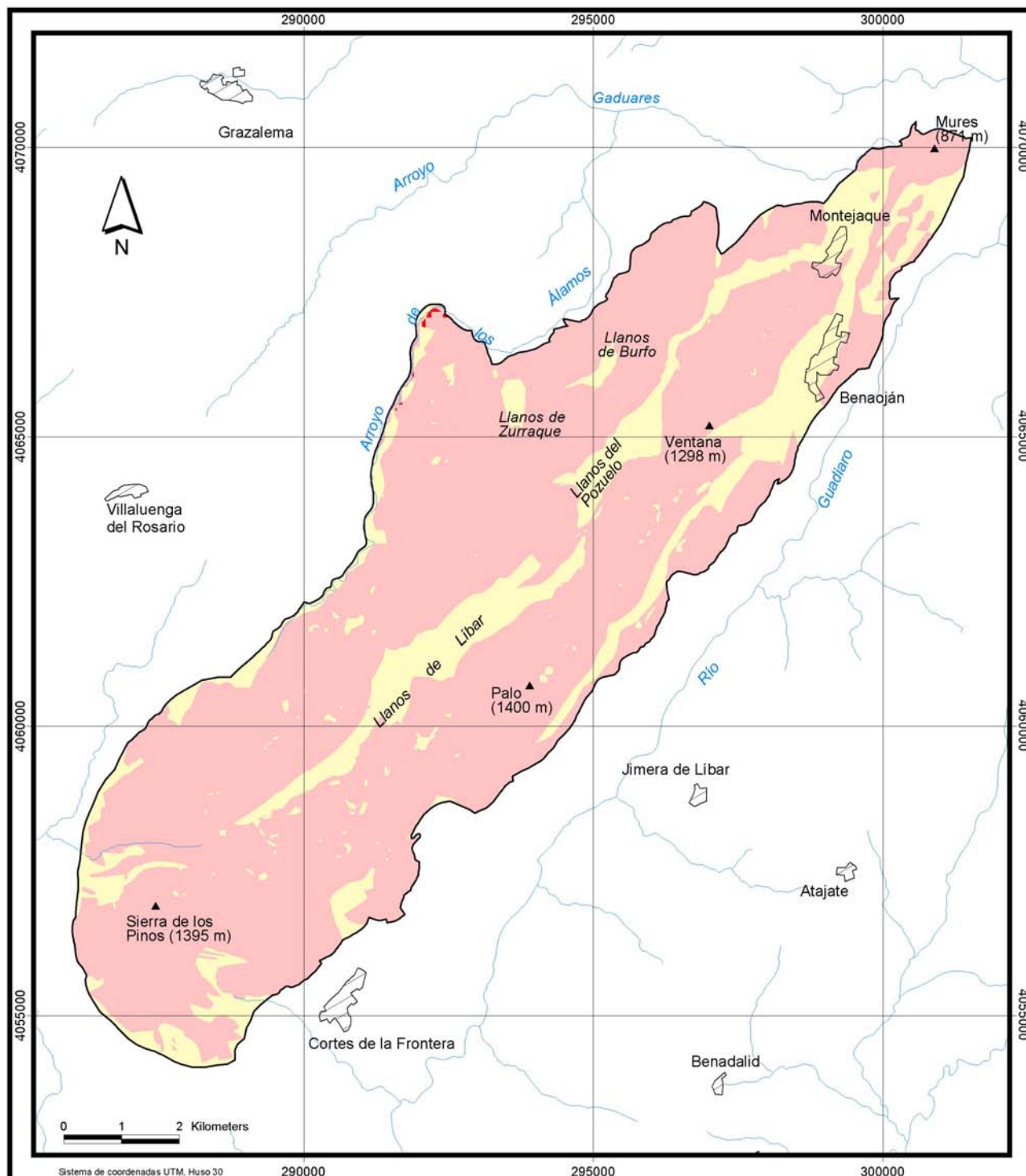
Fuente:
Adaptado de Brechenmacher (2002)

MAPA
Nº 19L

Acuífero de la sierra de Libar

**VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO:
MÉTODO PI**

TESIS DOCTORAL
Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España



Sistema de coordenadas UTM, Huso 30

- Muy Alta (200-280)
- Alta (160-200)
- Moderada (120-160)
- Baja (80-120]
- Muy Baja < 80

MAPA
Nº 20L

Acuífero de la sierra de Libar

**VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO:
MÉTODO DRÁSTIC**

*TESIS DOCTORAL
Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo
de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG.
Aplicación en acuíferos del Sur de España*

A partir de la comparación de los seis mapas de vulnerabilidad se observa que la distribución espacial de la vulnerabilidad del acuífero tiene un carácter homogéneo, a excepción de los resultados obtenidos con los métodos EPIK y COP, los cuales dan una visión más heterogénea. El carácter homogéneo o heterogéneo está referido al afloramiento carbonático, pues todos los métodos muestran variaciones de la vulnerabilidad entre las zonas donde afloran las margocalizas y los materiales carbonáticos.

En la figura 8.19 se puede observar cómo los métodos AVI, DRASTIC, GOD y PI concentran la vulnerabilidad del acuífero en un intervalo. Los métodos COP y PI son los que mayor discriminación muestran del acuífero, en la medida que diferencian hasta un total de cinco (máximo) clases de vulnerabilidad. En cambio, los métodos AVI, DRASTIC, GOD y EPIK sólo diferencian tres clases de vulnerabilidad, aunque en los casos de los métodos DRASTIC y GOD la vulnerabilidad queda expresada prácticamente en dos clases.

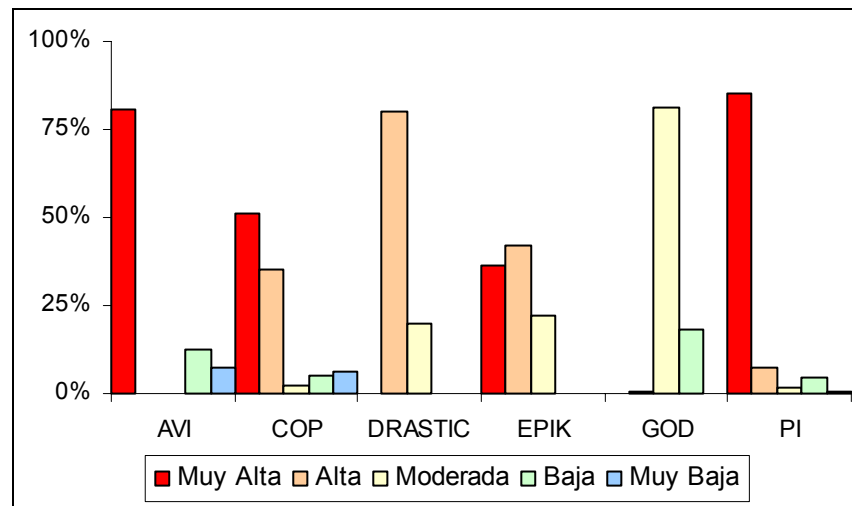


Figura 8.19. Porcentaje de superficie del acuífero de la sierra de Líbar según las clases de vulnerabilidad de los métodos AVI, COP, DRASTIC, EPIK, GOD y PI.

En cuanto al grado de vulnerabilidad predominante en la sierra de Líbar, también se observan discrepancias según el método. Se puede diferenciar desde una vulnerabilidad genérica de grado Muy Alto, caso de los métodos AVI y PI, a una vulnerabilidad Alta (DRASTIC) y Moderada (GOD). EPIK muestra una vulnerabilidad principalmente de grado Alto y Muy Alto e incluso zonas con un grado de clase Moderado en la parte sur del acuífero, donde predominan las dolomías, materiales menos karstificados. El método COP permite clasificar al acuífero con una vulnerabilidad Alta y Muy Alta. Las zonas cubiertas por materiales de baja permeabilidad, fuera de las áreas que drenan hacia un sumidero, tienen una vulnerabilidad menor.

El acuífero de la sierra de Líbar tiene una elevada heterogeneidad hidrogeológica y su funcionamiento está muy condicionado por la elevada karstificación de los materiales carbonáticos. Por tanto, la vulnerabilidad del acuífero debería de recoger esas variaciones que establecen la marcada heterogeneidad del mismo. Este hecho queda recogido mediante los métodos COP y EPIK, los cuales muestran una distribución de la vulnerabilidad más acorde con las características del acuífero, a diferencia del resto de métodos que muestran un grado

de vulnerabilidad más homogéneo y no recogen variaciones en el afloramiento de materiales carbonáticos.

El método EPIK permite diferenciar la vulnerabilidad del acuífero entre Alta y Muy Alta en gran parte del afloramiento de materiales carbonáticos, en función del grado de karstificación de los mismos. En cambio, muestra algunos sectores del acuífero en los que también afloran materiales carbonáticos con un grado de vulnerabilidad de clase Moderada, al igual que zonas donde afloran margocalizas del cretácico, materiales de baja permeabilidad que añaden una mayor capacidad de protección al acuífero.

El método COP evalúa con una vulnerabilidad Alta o Muy Alta, en función del grado de karstificación, todo el afloramiento de materiales carbonáticos, e incluso zonas que están cubiertas por margocalizas, pero en sectores del acuífero que drenan hacia sumideros conectados con la zona saturada. Con un grado de vulnerabilidad menor se clasifica el resto del acuífero, es decir, aquellos sectores que están cubiertos por materiales de baja permeabilidad y que no forman parte de las áreas de recarga de un sumidero.

Por tanto, el método COP parece ser el más adecuado para cartografiar la vulnerabilidad del acuífero de la sierra de Líbar. El resultado es más acorde con las características del acuífero, tanto en lo referente a la distribución espacial de las clases de vulnerabilidad, como en la gradación asignada a cada zona.

8.4. EVALUACIÓN Y CARTOGRAFÍA DE VULNERABILIDAD DE LA POBLACIÓN Y SUS BIENES (MEDIO HUMANO) EN EL ACUÍFERO DE LA SIERRA DE LÍBAR

8.4.1. VULNERABILIDAD DE LA POBLACIÓN (V_P)

En la sierra de Líbar se han localizado siete núcleos de población que utilizan los recursos del acuífero para abastecerse: Cortes de la Frontera, Cañada del Real Tesoro, Estación de Jimera de Líbar, Jimera de Líbar, Benaoján (junto con la estación) y Montejaque.

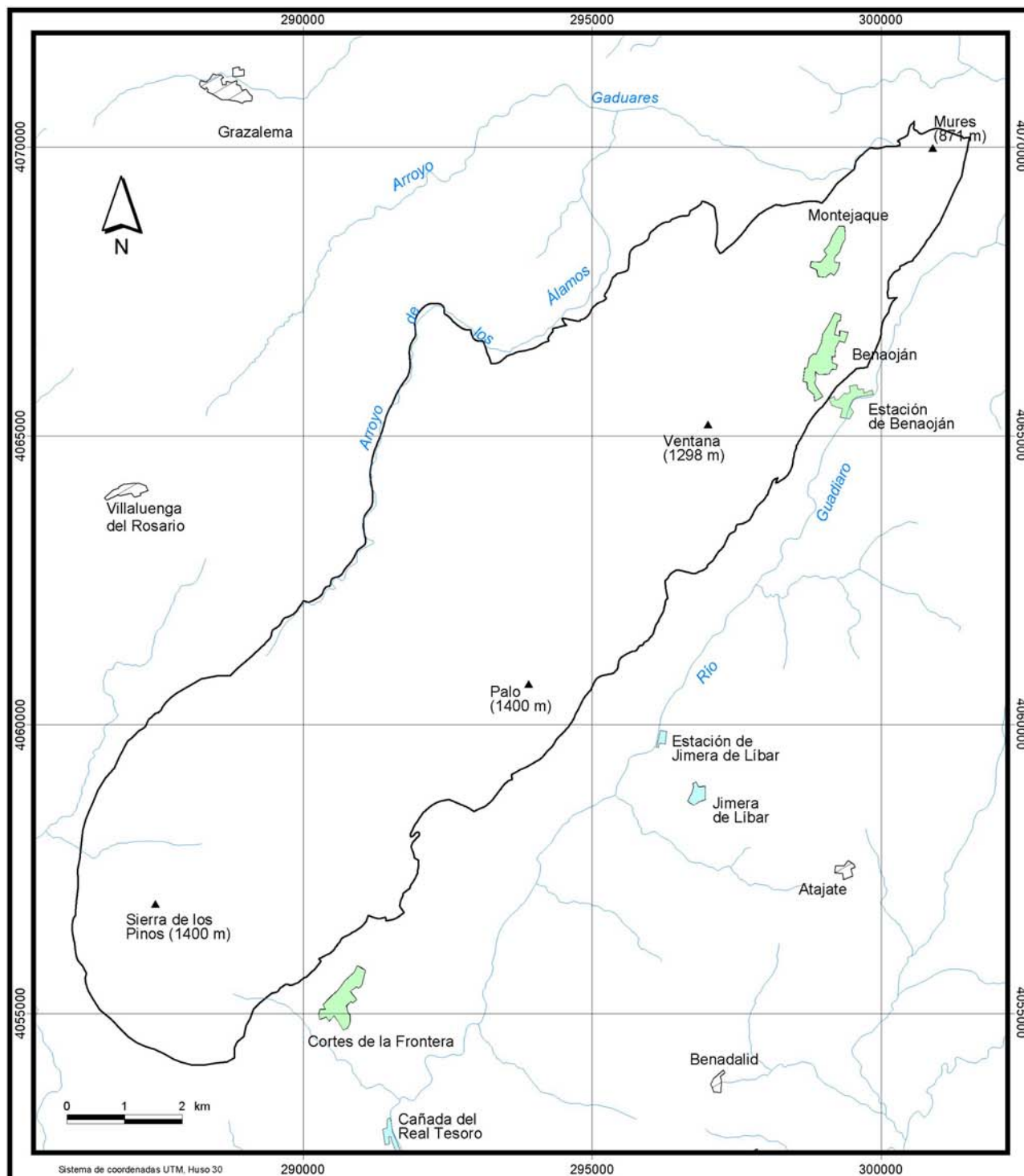
El volumen de población expuesta a la contaminación en el acuífero de la sierra de Líbar, en general, es bajo. La localidad con mayor número de habitantes es Cortes de la Frontera y la que menos la Estación de Jimera de Líbar (mapa 7L del anexo).

El uso de los recursos del acuífero varía entre las localidades de la mitad septentrional de la sierra y los núcleos de la mitad meridional. Montejaque, Benaoján y la Estación de Benaoján realizan un uso del acuífero complementario a otras fuentes de abastecimiento. Estas localidades se abastecen durante el invierno de un pozo que drena parte de la sierra Las Viñas en la margen izquierda del Guadiaro, mientras que en verano se abastecen del manantial del Molino del Santo (manantial de la Estación de Benaoján). Estas localidades han sido evaluadas por el factor R_{1P} con un valor 0,6, mientras que el resto (Cortes de la Frontera, Cañada del Real Tesoro, Jimera de Líbar y Estación de Jimera de Líbar) utilizan únicamente los recursos de un único punto de agua correspondiente al manantial Mayor de Jimera de Líbar y se puntúan con un valor 1.

En general, el grado de resistencia de la población de la sierra de Líbar, en función de la edad, es Moderado (mapa 7L del anexo). La localidad de Jimera de Líbar tiene una capacidad de resistencia Alta, es decir, la edad de la población está comprendida principalmente dentro de los grupos considerados como menos vulnerables (entre 15 y 65 años). En cambio, la población de la Estación de Jimera de Líbar tiene una resistencia Baja, en la medida que la mayor parte de los habitantes de esta localidad son niños y ancianos, considerados como de mayor vulnerabilidad frente a un episodio de contaminación del agua.

Las siete localidades dependientes de los recursos del acuífero tienen una vulnerabilidad de clase Baja a excepción de los núcleos del municipio de Jimera de Líbar y la pedanía de Cañada del Real Tesoro que tienen una vulnerabilidad de clase Muy Baja (mapa 21L y 7L del anexo).

En el municipio de Jimera de Líbar habitan menos de 500 personas, por lo que independientemente de la capacidad de resistencia, la vulnerabilidad final de la población es mínima, al igual que en Cañada del Real Tesoro (mapa 21L y 7L del anexo). En el resto de localidades la vulnerabilidad es Baja como consecuencia, fundamentalmente, del bajo número de habitantes expuestos a un evento de contaminación.



Sistema de coordenadas UTM, Huso 30

- Muy Alta
- Alta
- Moderada
- Baja
- Muy Baja

MAPA
Nº 21L

Acuífero de la sierra de Libar

VULNERABILIDAD DE LA POBLACIÓN

TESIS DOCTORAL
Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España

8.4.2. VULNERABILIDAD DE LA ACTIVIDAD AGROPECUARIA V_{AG} : GANADERÍA

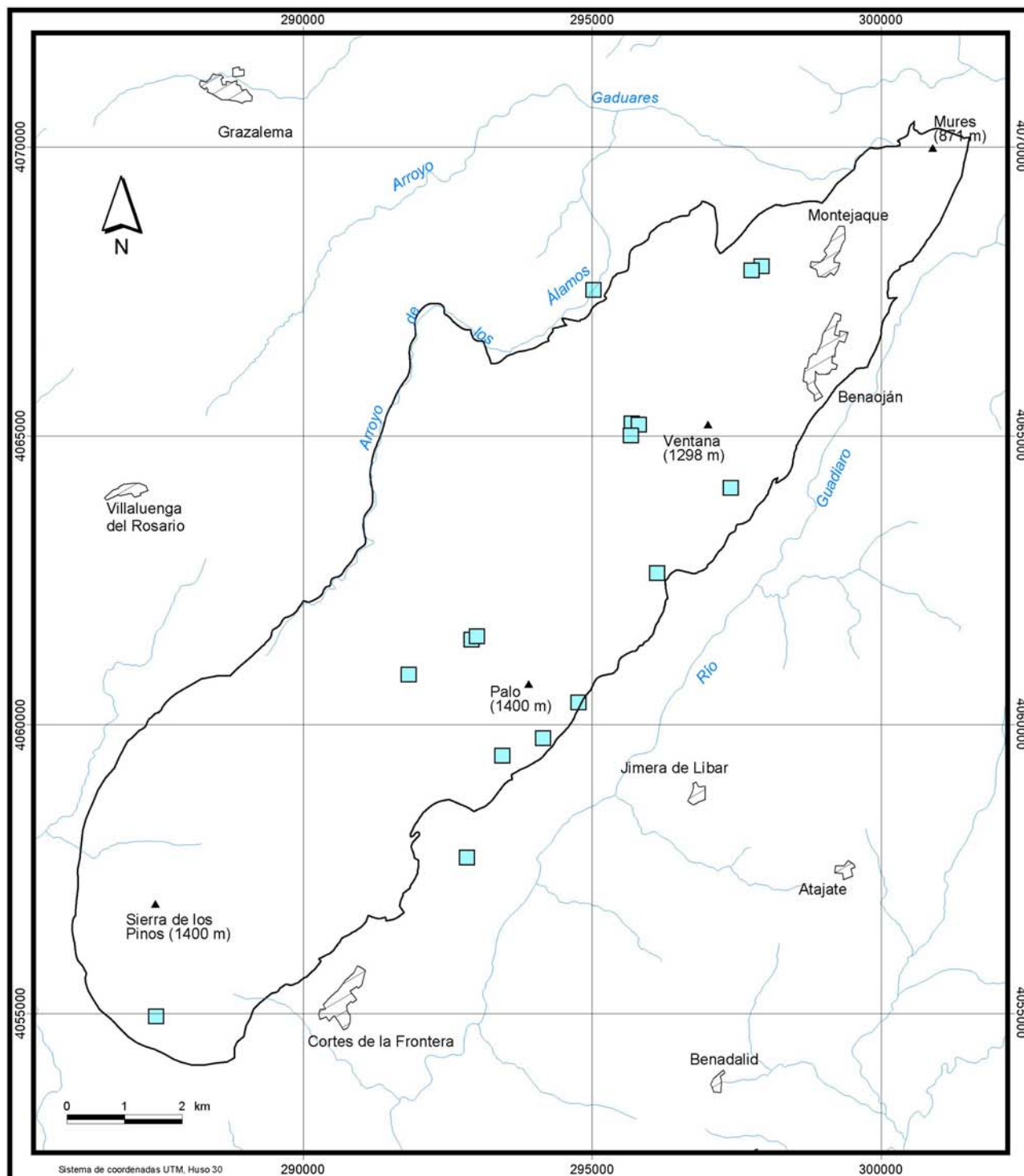
El análisis de la actividad ganadera en la sierra de Líbar no se ha podido realizar de forma detallada para cada explotación ganadera, por la falta de datos. Sólo se ha podido estimar la vulnerabilidad de esta actividad productiva para el conjunto de la sierra, dato éste que, por otra parte, es el que se utiliza posteriormente para la estimación del riesgo. Los datos sobre las explotaciones ganaderas de la Oficina Comarcal Agraria de Ronda (OCA de Ronda) se refieren al conjunto de la sierra de Líbar durante el año 2004. Para obtener los datos de cada explotación se han realizado diversas entrevistas a los ganaderos de la sierra, pero solo se han podido completar los datos en 4 de las 18 explotaciones (en Llanos de Líbar, Llanos de Pozuelo y dos en El Almendral). La falta de datos de campo en el resto de explotaciones y la discordancia de los datos entre las fuentes utilizadas ha motivado que sólo se utilicen los datos de la OCA de Ronda referidos al conjunto de la sierra.

El grado de exposición de la cabaña ganadera ante un posible evento de contaminación en la sierra de Líbar es alto. En total se han contabilizado 772 unidades ganaderas entre porcino, bovino, ovino y caprino (cuadro 8.23).

Respecto al factor de resistencia R_{1AG} se ha considerado un uso de las aguas del acuífero complementario a otros recursos, es decir, se utiliza agua de la sierra de Líbar y agua de otras fuentes ajenas al acuífero. En este punto conviene precisar un dato importante sobre la procedencia de los recursos del acuífero. Las fincas que utilizan aguas subterráneas procedentes de manantiales, fuentes o pozos se localizan en sectores del acuífero donde el agua subterránea está relacionada con niveles colgados en las calizas y en los materiales del Cretácico. El agua subterránea del acuífero de la sierra de Líbar analizada en el resto de factores de estimación del riesgo está referida a los materiales carbonáticos del Jurásico. Por tanto, se ha interpretado que parte de la cabaña ganadera utiliza los recursos de la sierra de Líbar aunque no este relacionado exactamente con el mismo nivel de aguas. De lo contrario, se podría interpretar que la ganadería en la sierra de Líbar no utiliza los recursos del acuífero.

En el cuadro 8.23 se muestra la rentabilidad socioeconómica (factor R_{2AG}) de la actividad ganadera de la sierra de Líbar. Se observa que la unidad ganadera que mayor beneficio económico genera anualmente es el ganado porcino, pero no es el más rentable o el de mayor productividad, puesto que una unidad ganadera de ovino para leche proporciona, al año, más ingresos (2400 €) que una unidad ganadera de porcino (2000 €).

En función de estos factores, el grado de vulnerabilidad de la actividad ganadera en la sierra de Líbar es Muy Bajo (mapa 22L y 8L del anexo). La reducida vulnerabilidad de la actividad ganadera es consecuencia, en general, de que no se dispone de datos suficientemente detallados, de la poca rentabilidad que genera y del uso del acuífero complementario a otros recursos, con lo cual la dependencia del mismo es menor y el riesgo para la actividad productiva también menor.



Sistema de coordenadas UTM, Huso 30

Explotaciones ganaderas

- Muy Alta
■ Alta
- Moderada
- Baja
■ Muy Baja

MAPA
Nº 22L

Acuífero de la sierra de Libar

VULNERABILIDAD DE LA ACTIVIDAD PRODUCTIVA: GANADERÍA

TESIS DOCTORAL
 Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España

Tipo de ganado	Nº de unidades ganaderas	Beneficio ¹ €	Beneficio ² €	Empleados
Terneros	196	140000	714	
Ovino para leche	20	48000	2400	
Ovino	153	64453	421	
Caprino para leche	113	175000	1549	
Caprino	113	42071	372	
Porcino	290	580000	2000	
Total	772	1049524	1359	36

Cuadro 8.23. Rentabilidad de la actividad ganadera. ¹ beneficio anual; ² beneficio medio por unidad ganadera. Según datos aportados por la Oficina Comarcal Agraria de Ronda.

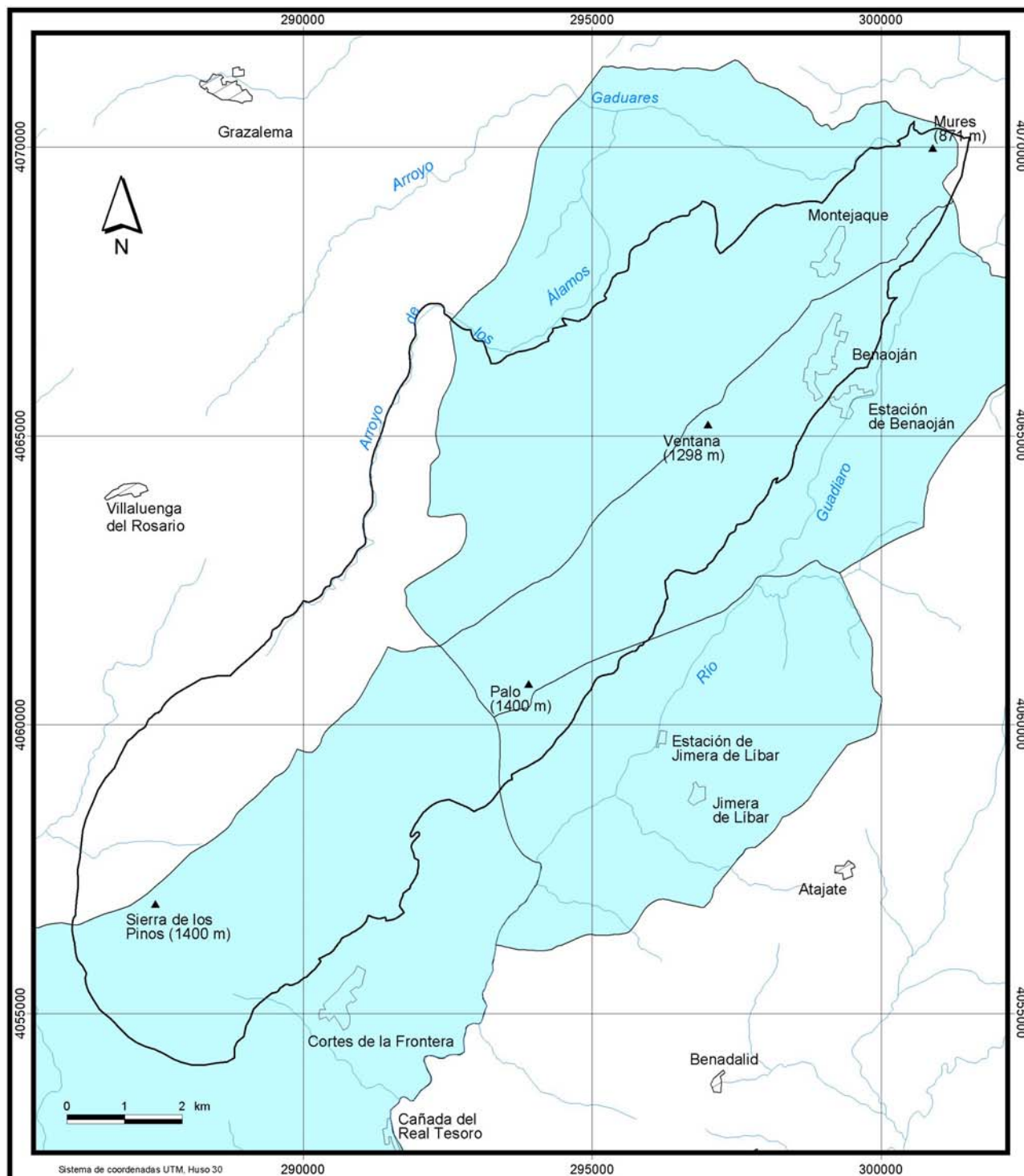
8.4.3. VULNERABILIDAD DE LAS ACTIVIDADES PRODUCTIVAS V_{ST}: HOSTELERÍA Y OTROS

En este epígrafe se han analizado los establecimientos relacionados con la hostelería y con las industrias cárnicas. En total se han considerado 63 establecimientos entre restaurantes, campamentos, pensiones, casas rurales, apartamentos, hoteles y mataderos. Los datos utilizados son a escala municipal, dado que los datos del INE (censo de 2001) a escala inframunicipal, muestran importantes variaciones con otras fuentes consultadas, Sistema de Información Municipal de Andalucía (SIMA).

La exposición de los distintos establecimientos dependientes del agua subterránea es baja (mapa 9L del anexo). El uso que se realiza del acuífero en algunos municipios, como Montejaque y Benaoján, es complementario a otros recursos, por lo que el grado de vulnerabilidad disminuye en función del factor R_{1ST}.

En cuanto a la rentabilidad socioeconómica, factor R_{2ST}, de las actividades productivas dependientes de los recursos del acuífero (mapa 9L del anexo), ésta se ha analizado a partir del número de empleos afectados por un caso hipotético de contaminación. En este sentido, para las industrias cárnicas sólo se ha tenido en cuenta el número de empleados en la sección de matadero (14 en total), pues el resto de la cadena de producción no depende del uso del agua en su funcionamiento, al menos con la misma importancia. En cambio, en la hostelería se ha considerado que todos los empleos se verían afectados, pues el uso que se realiza del agua no es exclusivo del trabajador, sino principalmente del cliente, por lo que un descenso en el número de clientes afectaría por igual a toda la plantilla. El número de empleos procede de los datos del censo de locales del año 1990, el cual se ha corregido mediante la aplicación de un factor de ponderación obtenido del incremento de establecimientos hosteleros según los datos del censo de 2001. Los beneficios económicos se han medido a partir de los salarios de los trabajadores según los datos de los distintos convenios colectivos que están en vigor.

En función de estas características, la vulnerabilidad de estas actividades productivas es Muy Baja mapa 23L (y 9L del anexo), principalmente, porque la cantidad de elementos expuestos no es superior a 100 y la rentabilidad socioeconómica no es lo suficientemente elevada, como para repercutir de forma importante en la economía de la comarca.



Sistema de coordenadas UTM, Huso 30

- Muy Alta
 - Alta
 - Moderada
 - Baja
 - Muy Baja
 - Núcleo de población dependiente de los recursos del acuífero
- Los datos de vulnerabilidad están referidos al municipio

MAPA
Nº 23L

Acuífero de la sierra de Libar

VULNERABILIDAD DE LA ACTIVIDAD PRODUCTIVA: HOSTELERÍA Y OTROS

TESIS DOCTORAL
Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España

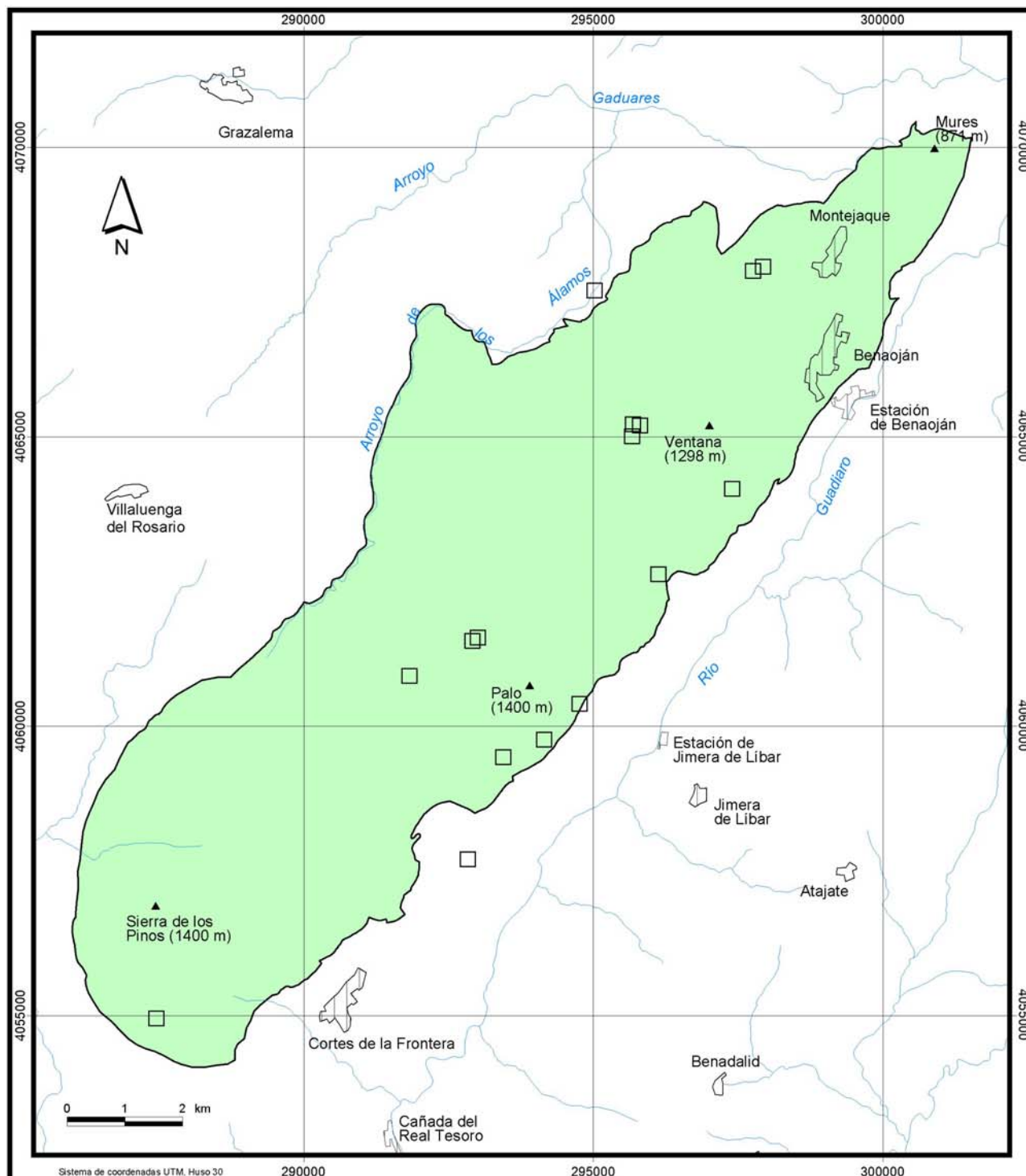
La rentabilidad socioeconómica de la actividad productiva hostelera y manufacturera dependiente de los recursos hídricos de la sierra es Muy Baja. Donde mayor repercusión alcanzaría un evento de contaminación es en Benaoján, por la importancia que adquieren las industrias cárnicas que elevan la repercusión socioeconómica respecto a los otros municipios, aunque no de manera significativa como para mostrar un cambio en el factor R_{2ST} .

8.4.4. VULNERABILIDAD DEL MEDIO HUMANO EN LA SIERRA DE LÍBAR

La baja vulnerabilidad que tienen los distintos elementos del medio humano de la sierra de Líbar dependientes de los recursos hídricos del acuífero tiene como resultado que la vulnerabilidad del medio humano, en conjunto, sea de clase Muy Baja (mapa 24L y 9L del anexo).

La sierra de Líbar es un espacio cuyo desarrollo y progreso económico se encuentra estancado, por la cual la población y toda la actividad productiva derivada de su funcionamiento tiene poca importancia, relativamente. Así, las consecuencias de no poder utilizar el agua del acuífero por parte la población y sus bienes son menores y, por tanto, la vulnerabilidad del medio humano dependiente del recurso es Baja.

Los resultados obtenidos para la sierra de Líbar deben de ser interpretados en el contexto de la gestión del riesgo. Lógicamente, el simple hecho de que haya personas expuestas a un evento extremo ya es un valor de riesgo, pero la valoración realizada tiene su razonamiento en el hecho de crear una cartografía que permita establecer gradaciones y prioridades en la gestión del mismo. En este sentido, se comprende que los resultados obtenidos indiquen una vulnerabilidad Baja, porque la producción de un evento extremo no tendría consecuencias negativas de elevada magnitud, dado el bajo grado de dependencia del recurso.



Sistema de coordenadas UTM, Huso 30

Elementos del medio humano dependientes del acuífero

Núcleos de población
 Explotación ganadera

Clases de vulnerabilidad

Muy Alta
 Moderada
 Baja
 Muy Baja

MAPA
Nº 24L

Acuífero de la sierra de Libar

VULNERABILIDAD DEL MEDIO HUMANO

TESIS DOCTORAL
 Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo
 de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG.
 Aplicación en acuíferos del Sur de España

8.5. CARTOGRAFÍA DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL ACUÍFERO DE LA SIERRA DE LÍBAR

En el acuífero de la sierra de Líbar, el riesgo de contaminación del agua subterránea está presente en menos de una décima parte de la superficie del acuífero. Las zonas con mayor riesgo se alcanzan en el sector septentrional del acuífero, alrededor de las localidades de Benaoján y Montejaque, y en los poljes de la sierra donde se desarrolla principalmente la actividad ganadera (mapa 25L y 10L del anexo).

El grado de riesgo en el acuífero de la sierra de Líbar, en función del porcentaje de superficie de cada clase de riesgo, es de clase Moderado y, principalmente, Bajo, dado que más del 90 % de su superficie tiene un riesgo de esta clase (figura 8.20).

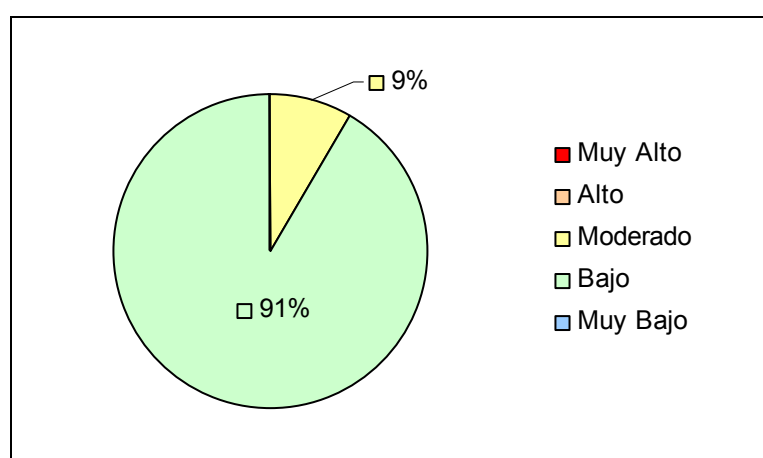
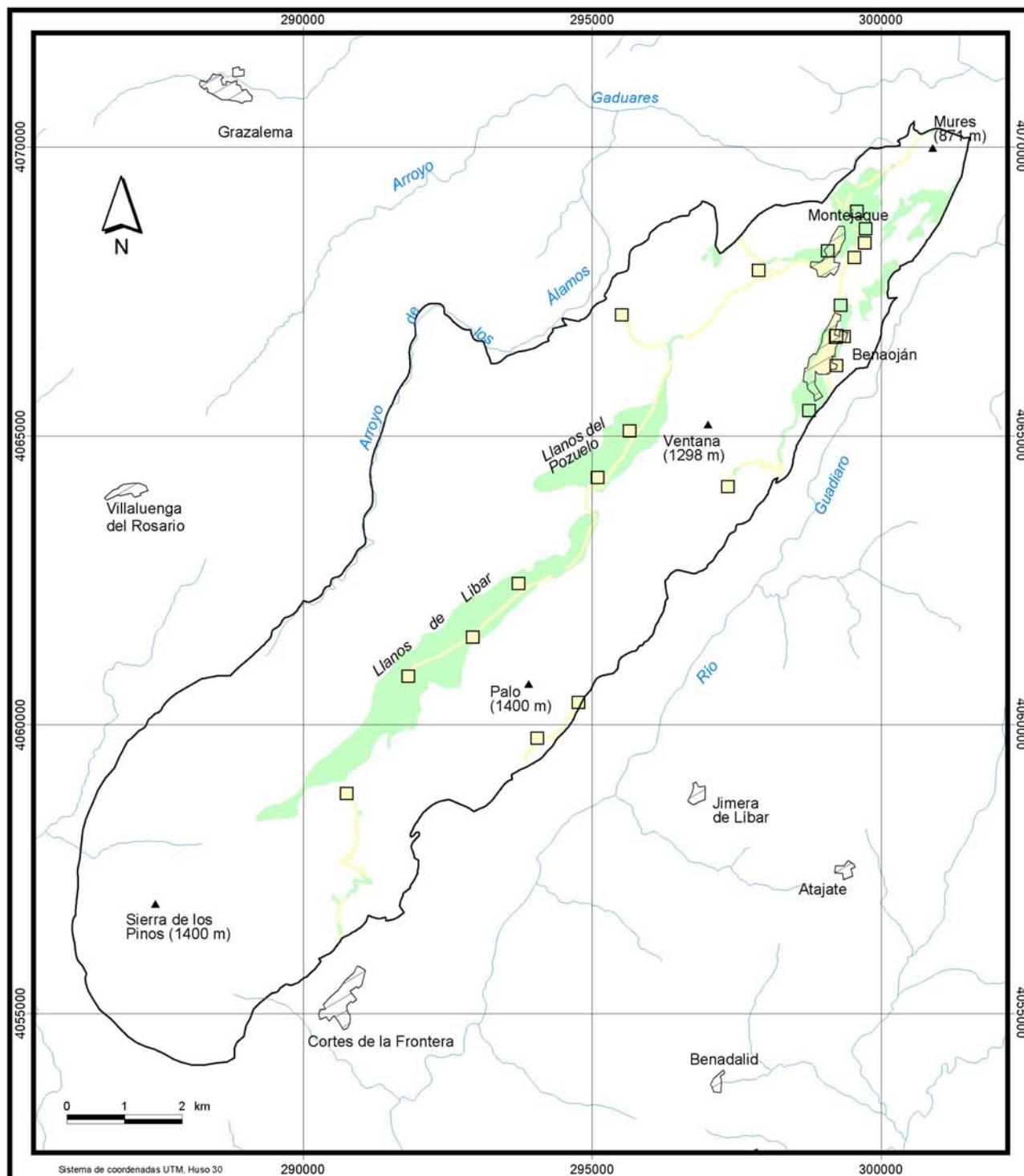


Figura 8.20. Superficie del acuífero de la sierra de Líbar según clase de riesgo.

En el acuífero de Líbar, los cortijos ganaderos del interior de la sierra, las carreteras y los núcleos urbanos presentan un riesgo de contaminación de las aguas subterráneas de clase Moderado. Dichas actividades no son muy peligrosas, pero la elevada vulnerabilidad del acuífero, aunque no haya un uso muy elevado del recurso hídrico, supone que el riesgo asociado a estas actividades adquiera cierta importancia. Las carreteras son las infraestructuras urbanas que en mejor medida permiten observar las variaciones del riesgo en función de la vulnerabilidad del acuífero, dado que se extienden lo suficiente como para atravesar puntos del acuífero con distinta vulnerabilidad. De este modo, en el mapa 25L (y 10L (del anexo cartográfico) se observa como un camino que se adentra en la sierra desde el Norte de Cortes de la Frontera, varía de riesgo según atravesase un sector más o menos vulnerable.



Sistema de coordenadas UTM, Huso 30

- | | | |
|---|--|--|
| ■ Muy Alto | ■ Moderado | ■ Bajo |
| ■ Alto | | ■ Muy Bajo |

MAPA
Nº 25L

Acuífero de la sierra de Libar

**RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE
AGUAS SUBTERRÁNEAS**

TESIS DOCTORAL
Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo
de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG.
Aplicación en acuíferos del Sur de España

Las zonas con riesgo Bajo están relacionadas con la actividad agropecuaria. La ganadería, que está bastante desarrollada en el sector central del acuífero, concretamente en los Llanos de Líbar y del Pozuelo, genera un riesgo poco importante en este sector debido al tipo de sistema de producción utilizado (ganadería extensiva). Este sistema minimiza la concentración del ganado, lo que reduce la probabilidad de contaminación microbiológica, pero el hecho de localizarse en un área del acuífero muy vulnerable, por la presencia de sumideros, provoca que el riesgo no sea inferior, es decir, de clase Muy Baja.

La actividad agropecuaria localizada al norte de Montejaque también genera un grado de riesgo de clase Bajo, al igual que los cementerios de Montejaque y Benaoján.

El riesgo ha sido evaluado como Bajo o Moderado, en Benaoján y Montejaque, pero se han detectado eventos de contaminación sobre la población en los años 2000 y 2001. Según datos del Servicio de Vigilancia de Epidemiológica de Andalucía (Consejería de Salud, 2001 y 2002), se han detectado dos eventos de contaminación, que han ocasionado pequeños brotes epidémicos de gastroenteritis por *Campylobacter jejuni* durante el 2001 y por un agente desconocido durante el año 2000. La mala desinfección de la red de abastecimiento (tuberías, depósitos) se apunta como causa de la infección, la cual se convierte en epidemia por la falta de cloración del agua. Si se tiene en cuenta que la mayor concentración de zonas de riesgo tiene lugar en el entorno de las localidades de Benaoján y Montejaque, donde se localizan los puntos de abastecimiento de aguas de estas localidades, parece lógico pensar que la cercanía de estas fuentes potencialmente peligrosas debería conllevar una mayor protección, máxime si se tiene en cuenta que la bacteria *Campylobacter jejuni* tiene su origen en las granjas de animales.

**9. EVALUACIÓN Y CARTOGRAFÍA DEL RIESGO DE
CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS
DEL ACUÍFERO DE LA SIERRA DE MIJAS**

9.1. CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO FÍSICO Y HUMANO DEL ACUÍFERO DE LA SIERRA DE MIJAS

9.1.1. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La Sierra de Mijas se localiza en el centro-sur de la provincia de Málaga a unos 8 km al Oeste de Málaga capital, en su punto más cercano. Limita al Norte con el valle del Guadalhorce, al Este y al Sur con el Mar Mediterráneo y al Oeste con la Sierra Blanca (figura 9.1). La zona de estudio queda encuadrada por las coordenadas UTM: X mínima 347000, Y mínima 4050000, X máxima 365500 e Y máxima 4059000, representadas en las hojas topográficas 1066 (Coín) y 1067 (Torremolinos), a escala 1/50.000 del Instituto Geográfico Nacional. A escala 1/10.000 se localiza en las hojas del Mapa Topográfico de Andalucía 1066 (2-1), 1066 (2-2), 1066 (3-1), 1066 (3-2), 1066 (4-1), 1066 (4-2), 1067 (1-1) y 1067 (1-2).

La sierra de Mijas ocupa una superficie de 100 km², aproximadamente, repartidos entre los municipios de Alhaurín el Grande, Alhaurín de la Torre, Málaga, Torremolinos, Benalmádena y Mijas. Los núcleos urbanos de estos municipios se localizan en los bordes de la sierra y están muy vinculados a los recursos hídricos de la misma, excepto en el caso de Málaga que depende mayoritariamente de otros recursos. Los principales accesos por carretera que comunican las localidades de la sierra son (mapa 1M): la autovía A7 (también E15) en el Sureste, la carretera Autonómica 366 al Norte y las carreteras Autonómicas 387, 368 al Oeste y Sur.

La importancia de la sierra como recurso natural queda patente por la protección que se realiza de la misma en el Plan Especial para la Protección del Medio Físico de la Provincia de Málaga. En este documento, la sierra de Mijas se considera como un Complejo Serrano (CS3) por su gran extensión, riqueza biológica y geológica y por el aprovechamiento de sus recursos naturales.

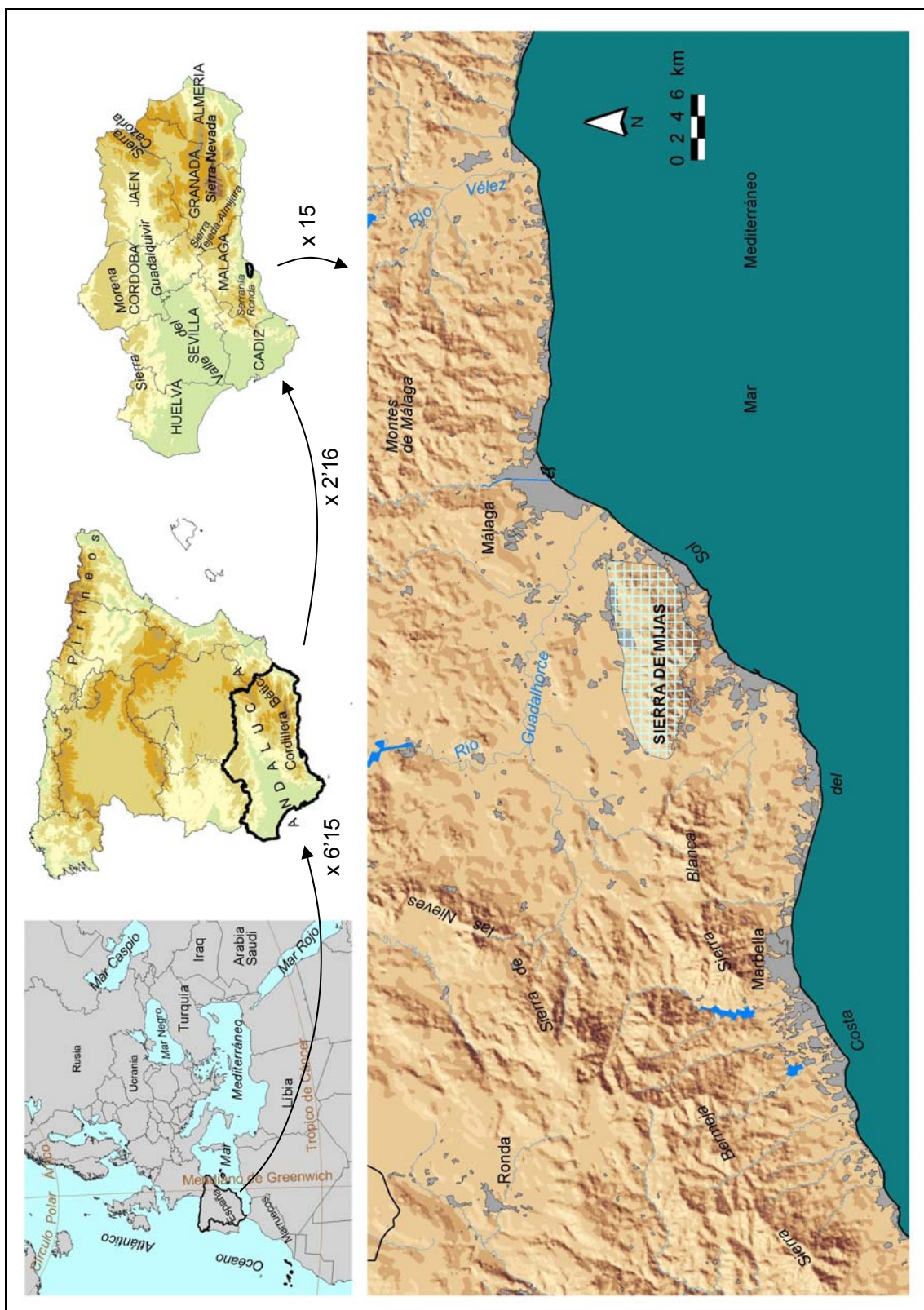
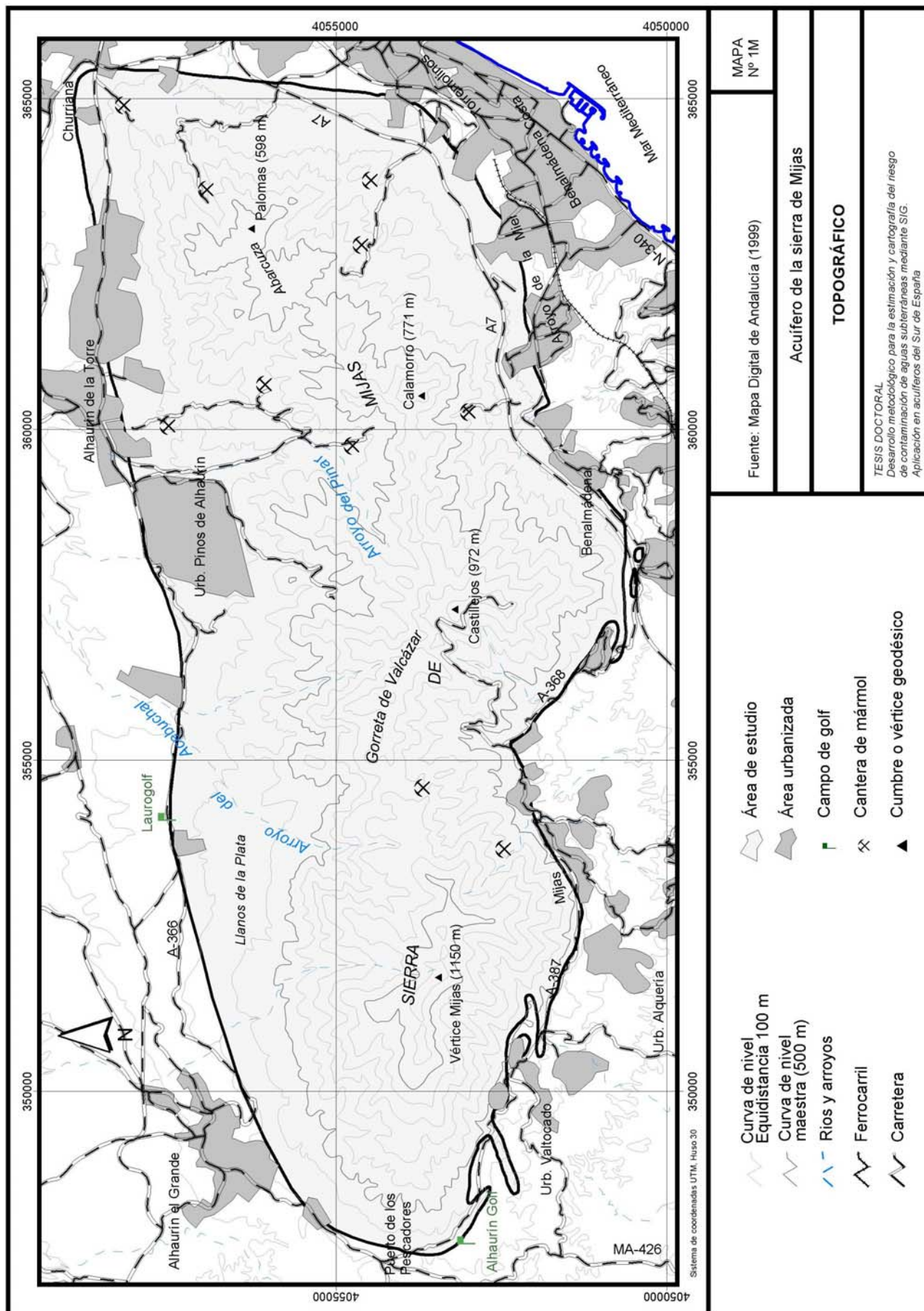


Figura 9.1. Localización de la sierra de Mijas.



9.1.2. RELIEVE: ALTITUD Y PENDIENTE

La Sierra de Mijas constituye un relieve abrupto, de grandes laderas que conectan los puntos más elevados con el piedemonte de la sierra (mapa 2M). En el sector oriental se pierde, en cierta medida, este rasgo y se observa un relieve más disectado con laderas de menor extensión.

La Sierra de Mijas tiene su mayor altitud en el vértice Mijas a 1150 m s.n.m., en el sector occidental de la sierra. Desde este punto, hacia el Oeste, la altitud desciende bruscamente hasta los 300 m en las cercanías de Alhaurín el Grande, mientras que hacia el Este, la línea de cumbres disminuye, progresivamente, hasta los 598 m en el vértice Las Palomas. A partir de esta cumbre, nuevamente, desciende de forma brusca hasta los 60 m en el tramo más bajo de la zona de estudio cerca de la localidad de Churriana (mapa 3M). El desnivel absoluto es de 1090 m y el máximo desnivel relativo es de 750 m, aproximadamente, desde el vértice de Mijas hasta el borde sur de la sierra.

La línea de cumbres tiene una disposición, aproximadamente, W-E y desde la cima de Calamorro hasta el vértice de las Palomas toma una dirección NE-SW (mapa 3M). En función de la altitud se puede dividir la zona de estudio en tres sectores: un sector occidental con los puntos de mayor altitud y mayor desnivel relativo, un sector central donde las cotas más elevadas no superan los 1000 m y un tercer sector en la parte oriental de la sierra con alturas por debajo de los 700 m.

La Sierra de Mijas presenta un relieve joven como se deduce de la figura 9.2. La fuerte pendiente de la curva es indicativa de un relieve condicionado por el levantamiento de la sierra.

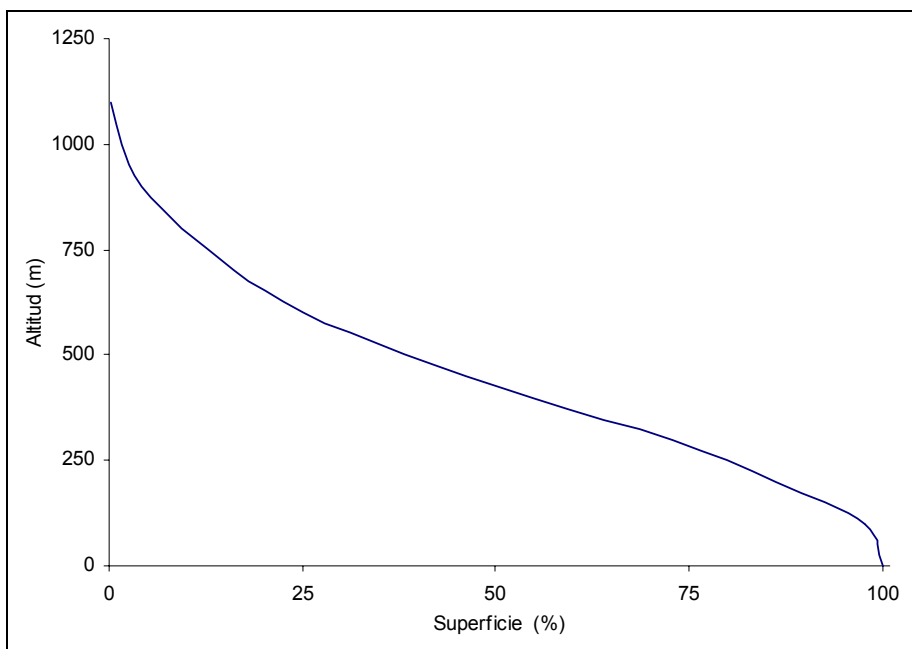
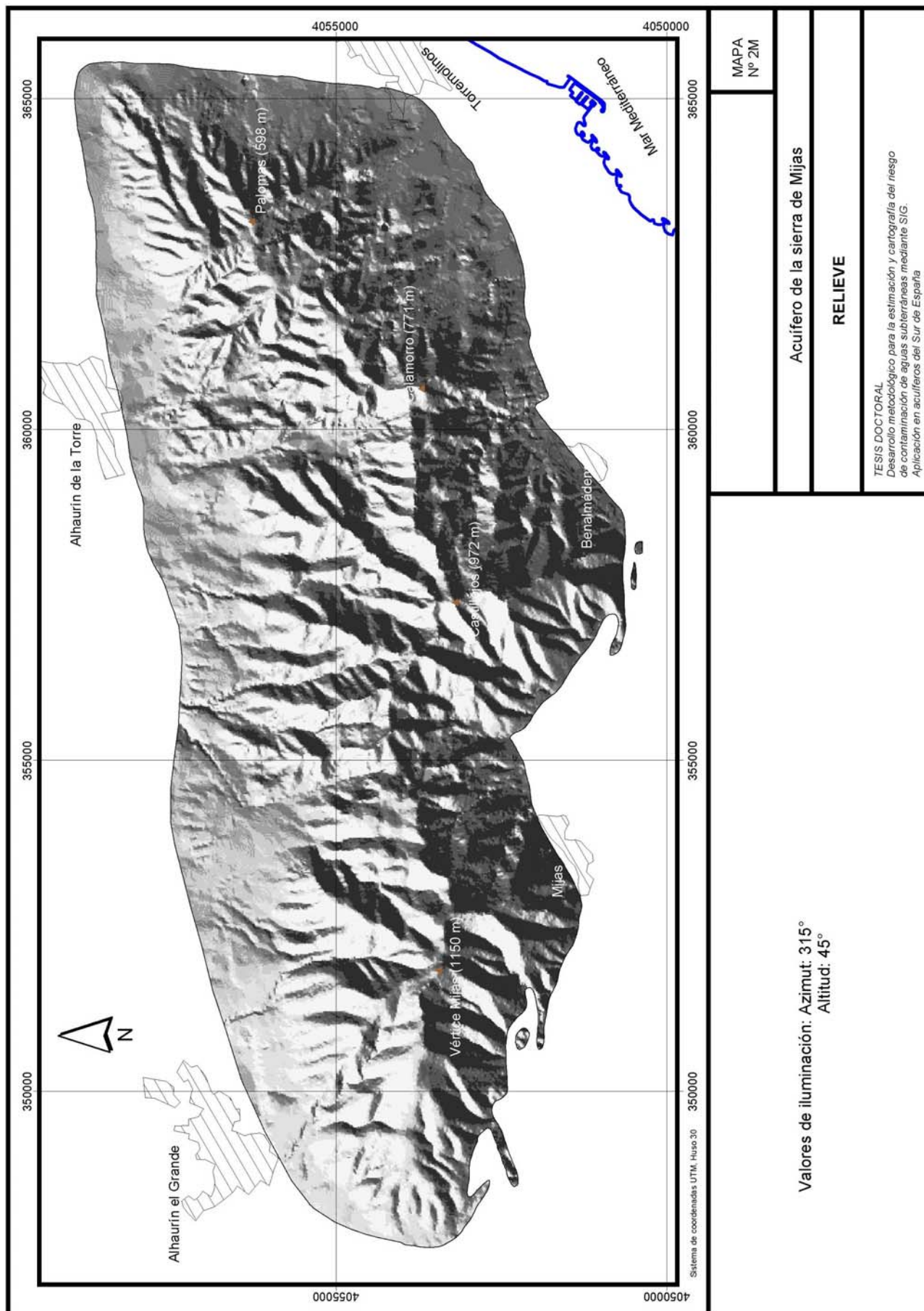
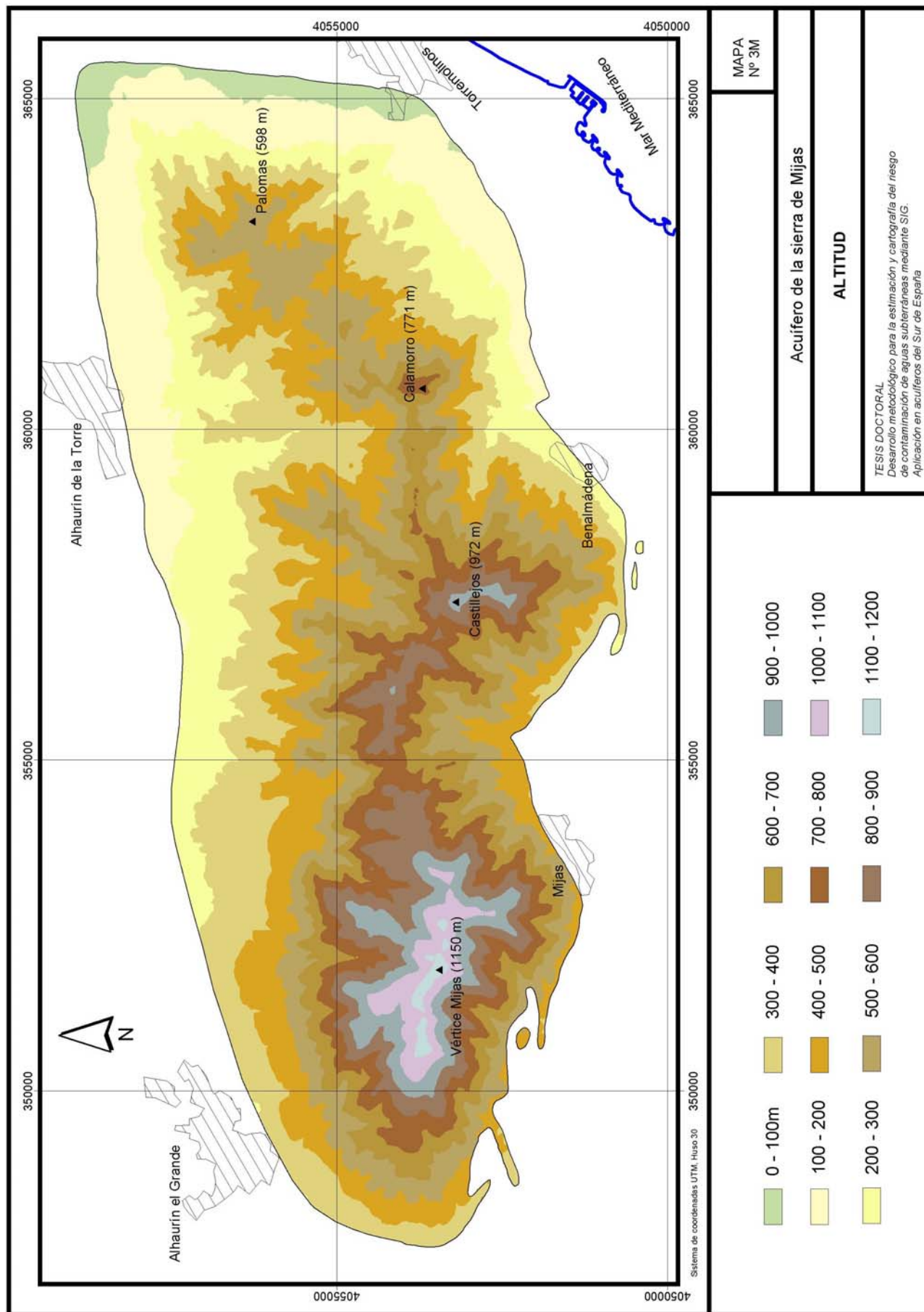


Figura 9.2. Curva hipsométrica de la zona de estudio.



MAPA N° 21M	
Acuífero de la sierra de Mijas	
RELIEVE	
<p>TESIS DOCTORAL Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España</p>	
<p>Valores de iluminación: Azimut: 315° Altitud: 45°</p>	



MAPA Nº 3M	
Acuífero de la sierra de Mijas	
ALTITUD	
<p>TESIS DOCTORAL Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España</p>	
<p>0 - 100m</p> <p>100 - 200</p> <p>200 - 300</p>	<p>300 - 400</p> <p>400 - 500</p> <p>500 - 600</p>
<p>600 - 700</p> <p>700 - 800</p> <p>800 - 900</p>	<p>900 - 1000</p> <p>1000 - 1100</p> <p>1100 - 1200</p>

La altitud media es 457 m. Casi tres cuartas partes de la sierra de Mijas tienen una altitud entre 100 y 600 m (figura 9.3 izquierda).

Otra característica del relieve de la sierra es la pronunciada pendiente del terreno que se observa en gran parte del mismo (mapa 4M). El valor medio de pendiente es 40% y los valores extremos varían entre pendientes superiores al 75% en las zonas más abruptas del sector occidental y las zonas planas del piedemonte de la sierra en su sector nororiental. Puntualmente existen pendientes de 90°, como en la zona de la Abarcuza donde los planos de falla dan lugar a escarpes verticales. La línea de cumbres tiene un valor de pendiente bajo, pero en ningún momento llega a ser horizontal, lo que refuerza el carácter de relieve joven asignado a la sierra de Mijas. Menos de una quinta parte de la sierra tiene una pendiente inferior al 15%, lo cual es un dato significativo del carácter abrupto de su relieve (figura 9.3 derecha).

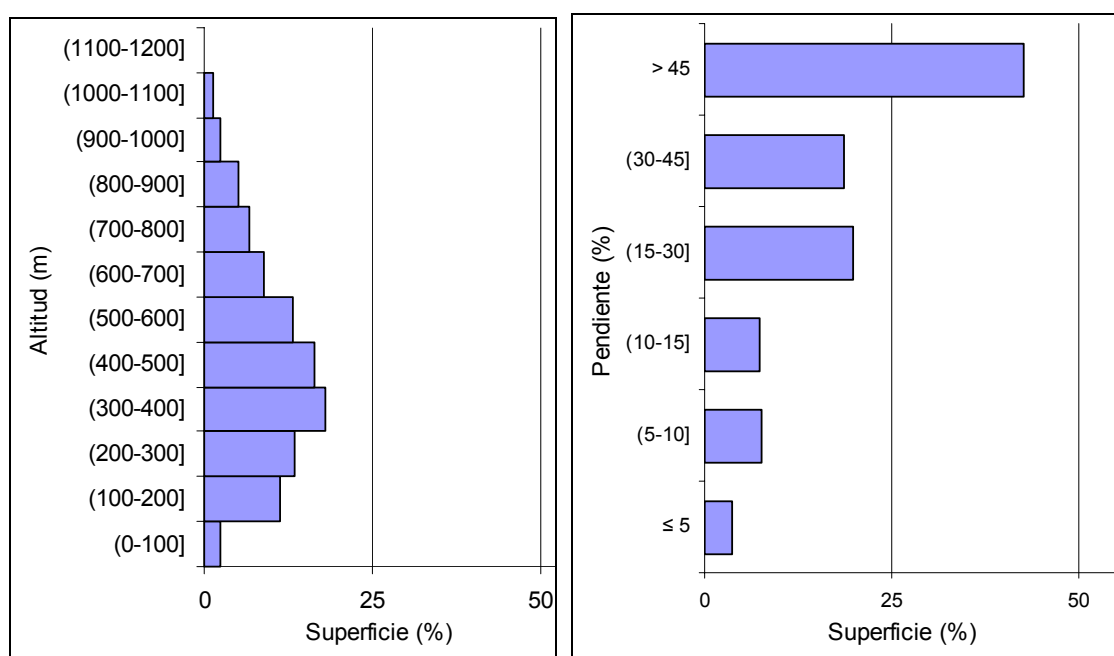
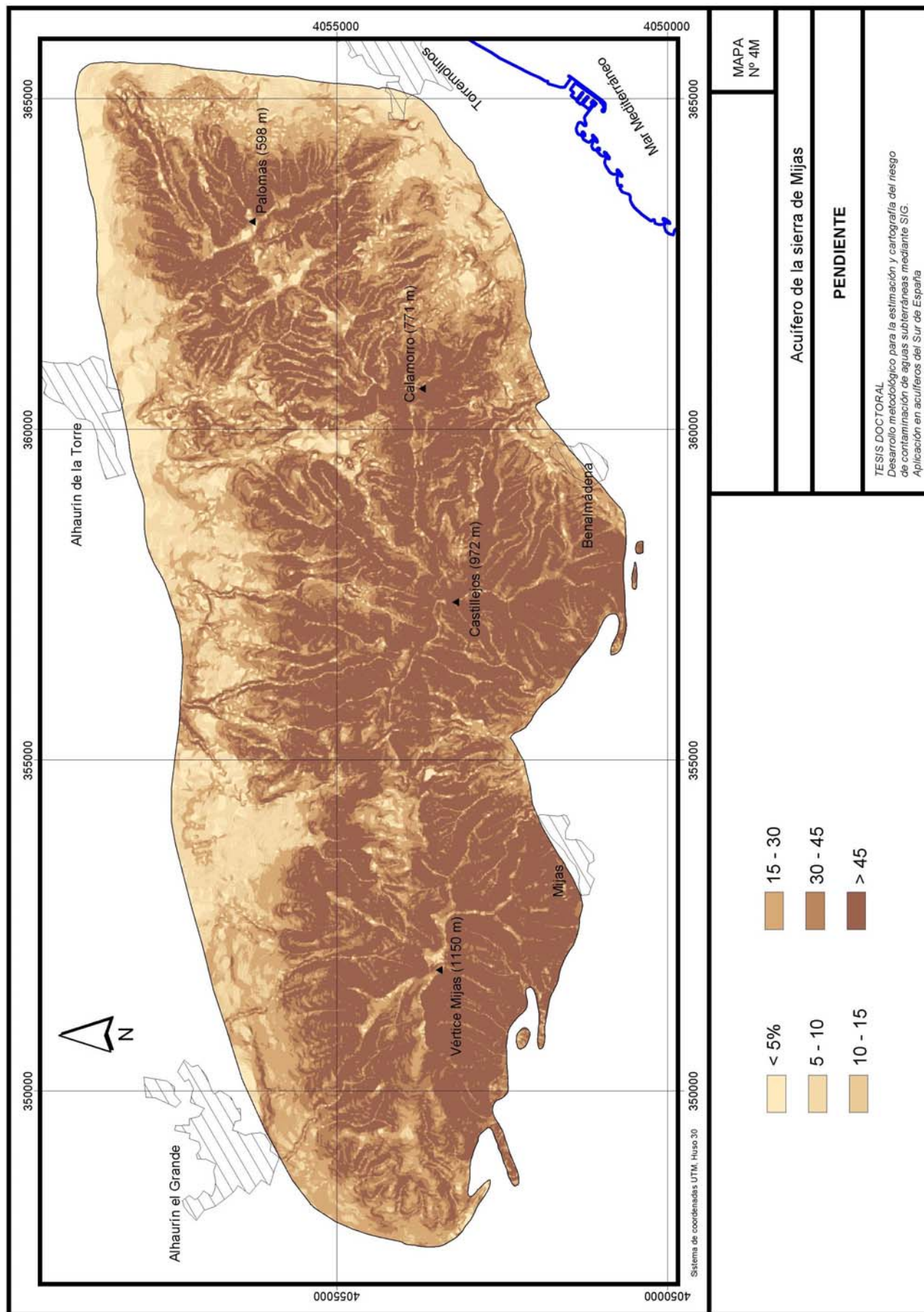


Figura 9.3. Porcentaje de superficie en función de la altitud (izquierda) y de la pendiente del terreno (derecha) en la sierra de Mijas.



9.1.3. CLIMA: PRECIPITACIÓN

A escala regional, la sierra de Mijas se encuentra dentro del ámbito climático del mediterráneo occidental. Como tal, presenta unas características particulares en lo referente al régimen de precipitaciones. La irregularidad espacial y temporal de las mismas (tanto estacional como anual) son factores que determinan el comportamiento hidrológico del área de estudio y, por tanto, el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas.

9.1.3.1. INVENTARIO DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS

Se han utilizado los datos de ocho estaciones que tienen una serie histórica de 30 años, desde el año 1970 hasta el 2000 (cuadro 9.1) y su localización se muestra en la figura 9.4. Los datos se han obtenido de la página web de la Confederación Hidrográfica del Sur de España (CHSE), actualmente Agencia Andaluza del Agua.

Estación meteorológica	Altitud (m)	UTM	
		X	Y
Málaga-Aeropuerto	7	367012	4058992
Urbanización Los Manantiales	120	361400	4058200
Alhaurín de la Torre	80	359991	4059381
Alhaurín el Grande	400	348490	4054984
Mijas	500	353618	4051196
Benalmádena	240	359418	4051715
Torremolinos	60	364988	4055017

Cuadro 9.1. Estaciones meteorológicas de la zona de estudio.

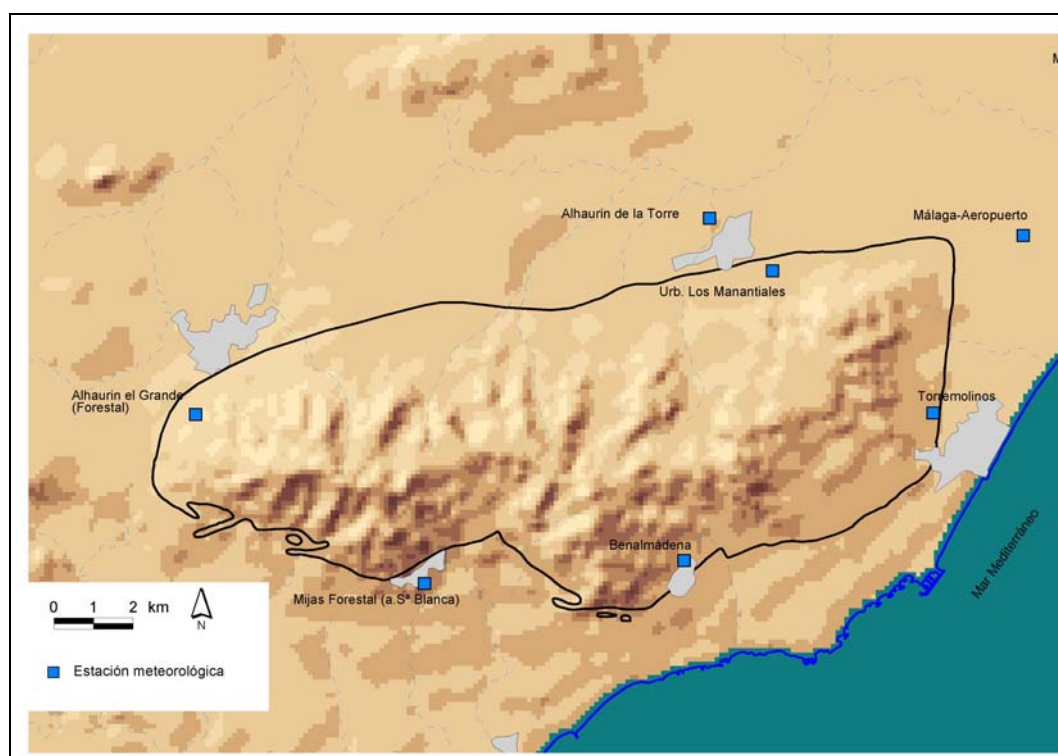


Figura 9.4. Distribución de las estaciones meteorológicas utilizadas en la sierra de Mijas.

9.1.3.2. ANÁLISIS DE LAS PRECIPITACIONES

Previamente al análisis de la precipitación se ha completado la serie histórica de registros mediante la expresión recogida Claver (coord.) (1991) y se han clasificado los años en húmedos o secos en función de si la precipitación anual es un 15% mayor o menor que la media anual (cuadro 9.2).

Año hidrológico	Alhaurín el Grande	Mijas	Benalmádena	Alhaurín de la Torre	Torremolinos	Los Manantiales	Málaga-Aeropuerto	Sierra de Mijas
1970/71	648	666	471	779	771	807	958	728
1971/72	550	510	497	586	499	620	678	563
1972/73	391	611	646	524	606	645	707	590
1974/75	282	434	398	458	354	425	370	389
1973/74	368	509	499	262	468	475	484	438
1975/76	517	599	467	482	436	541	444	498
1976/77	588	728	572	558	649	676	578	621
1977/78	515	493	430	406	474	512	455	469
1978/79	671	870	708	911	653	845	750	772
1979/80	503	660	531	395	513	564	488	522
1980/81	405	493	290	282	415	412	361	380
1981/82	488	570	339	246	458	460	423	426
1982/83	314	426	319	315	300	323	291	327
1983/84	716	1033	339	1004	676	1094	685	792
1984/85	412	516	505	412	390	427	360	432
1985/86	128	449	416	269	281	317	300	309
1986/87	635	807	725	562	688	558	584	651
1987/88	625	838	589	497	410	338	505	543
1988/89	655	1040	671	732	481	765	505	692
1989/90	1539	1722	1563	1307	951	1548	1012	1377
1990/91	661	699	539	576	404	608	386	553
1991/92	609	630	574	549	510	613	398	555
1992/93	568	641	550	474	420	523	376	507
1993/94	510	620	533	324	130	563	425	444
1994/95	224	267	226	220	160	214	140	207
1995/96	1228	1295	1119	993	1050	1273	975	1133
1996/97	1214	1438	1306	1035	1190	1038	1039	1180
1997/98	703	711	875	259	836	640	679	671
1998/99	382	419	425	326	328	454	287	374
1999/00	537	522	558	398	447	393	326	454

Promedio ¹	591	714	633	524	550	649	532	585
Promedio ²	586	707	589	538	532	622	532	587
Año húmedo	674	813	678	619	611	716	612	675
Año seco	498	601	501	457	452	529	452	499

Cuadro 9.2. Datos de lluvia de las estaciones seleccionadas para el análisis de la precipitación. En negrita se han marcado los valores estimados. En azul se han resaltado los años húmedos y en amarillo los años secos. En la parte baja del cuadro se muestran los valores medios de las series de datos, sin los valores estimados (1) y con los valores estimados (2), y los valores límite de precipitación para considerar los años húmedos y secos.

El valor medio de precipitación de las estaciones de la zona de estudio es 587 mm/año (cuadro 9.2). Este valor medio varía entre más de 700 mm/año en la estación de Mijas y los más 530 mm/año de Alhaurín de la Torre y Aeropuerto.

La figura 9.5 muestra, gráficamente, la distribución de la precipitación media anual de las estaciones de la zona de estudio. En general, se puede observar una pronunciada irregularidad interanual en las precipitaciones de la sierra de Mijas. La evolución de las precipitaciones tiene un marcado carácter irregular propio del ámbito mediterráneo. La alternancia de años húmedos y años secos es continua y no se aprecia una tendencia lineal.

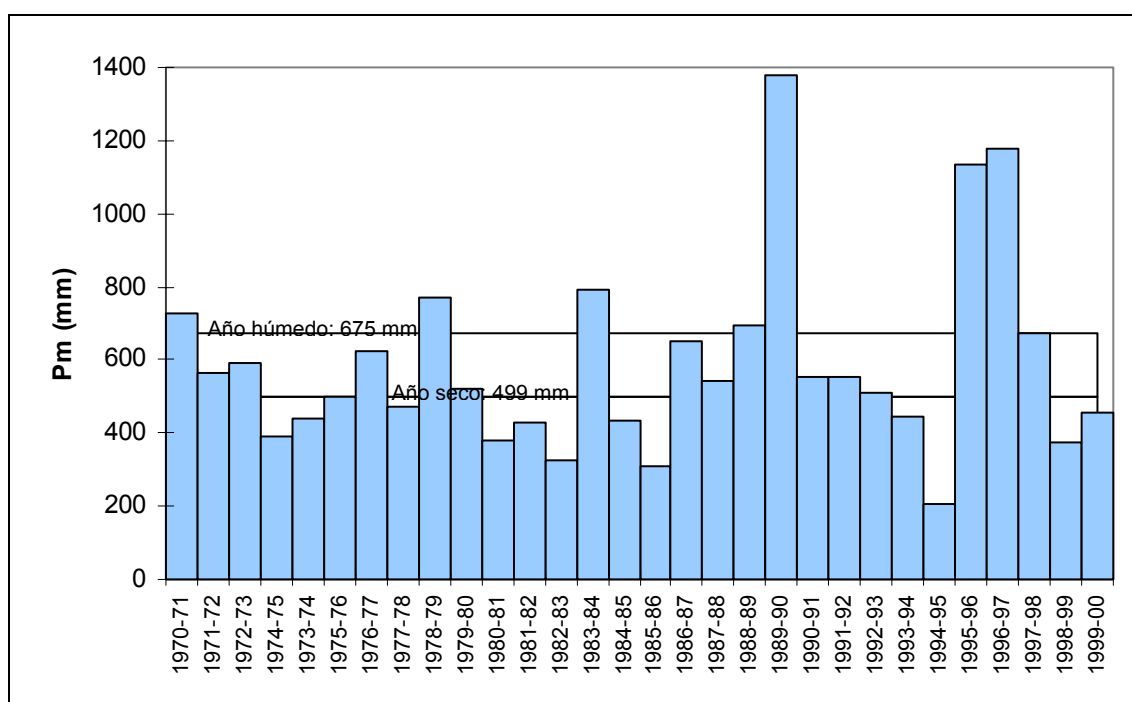
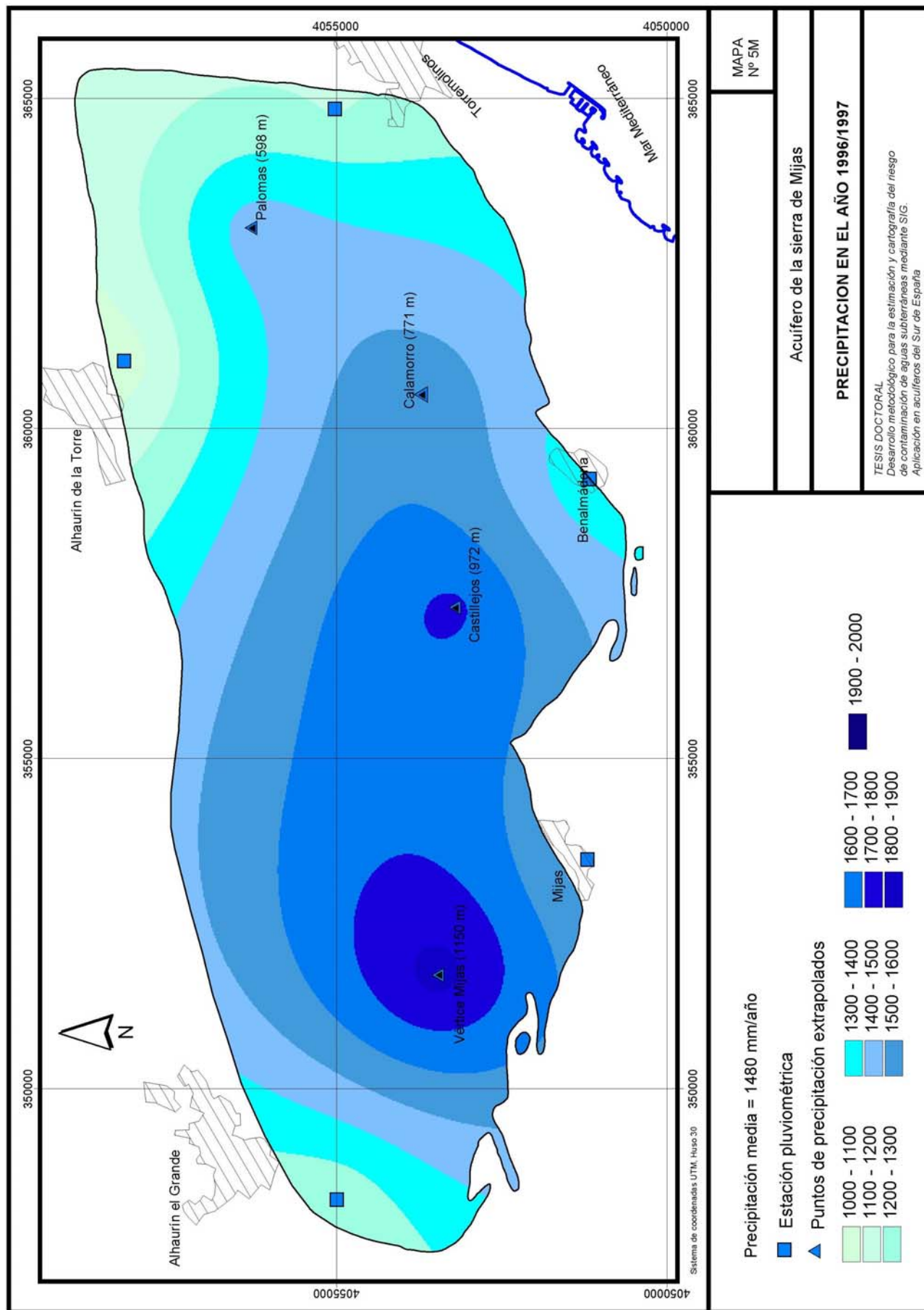


Figura 9.5. Evolución temporal de las precipitaciones medias anuales en la zona de estudio.

El año 1994/1995 fue el más seco del periodo histórico analizado. Los años más lluviosos en la sierra de Mijas han sido 1998/1999, 1995/1996 y 1996/1997. Hay otros cuatro años húmedos en la serie histórica, pero más cercanos a una situación normal.

Se ha considerado como año representativo de una situación húmeda el año hidrológico 1996/1997. Los datos asociados a este año son los que se han utilizado en un análisis más detallado de la precipitación, dado que suponen una mayor recarga, que el nivel piezométrico se sitúe a cota más alta y, consecuentemente, que la vulnerabilidad del agua subterránea sea mayor.

En la sierra de Mijas hay una marcada influencia de la altitud en la precipitación (Andreo 1997). Por ello, se ha realizado un análisis de regresión entre el valor de precipitación y la altitud mediante un ajuste de mínimos cuadrados lineal. Esto ha permitido estimar la precipitación en una serie de puntos del interior de la sierra (mapa 5M).



A partir del modelo digital elaborado para la precipitación en el año 1996/1997 (mapa 5M), se ha obtenido que la precipitación media es 1480 mm/año. Los valores de precipitación decrecen, en general, de Oeste a Este, desde el vértice de Mijas, donde se alcanzan los mayores valores de precipitación (1850 mm), hasta la localidad de Churriana al norte de Torremolinos, donde la precipitación es del orden de 1100 mm. Hay una variación de 800 mm/año entre las zonas con menor y mayor precipitación. Desde el vértice de Mijas hasta el límite occidental de la sierra, la precipitación decrece bruscamente por efecto de la influencia orográfica.

El mayor número de días de lluvia se registró en la estación de Mijas, al igual que ocurrió con la cantidad de precipitación, y la estación de Torremolinos es la que menor número de días con lluvia tuvo durante el año 1996/1997 (cuadro 9.3). Hay una diferencia de 18 días entre el máximo de días con lluvia, en la estación de Mijas, y el mínimo en la de Torremolinos, lo cual es un reflejo de la influencia de la altitud como también ocurre con la precipitación media anual.

Estación meteorológica	Altitud (m)	Coordenadas UTM		Nº de días con lluvia
		X	Y	Año 1996/1997
Torremolinos	60	364988	4055017	51
Los Manantiales	120	361400	4058200	58
Benalmádena	240	359418	4051715	62
Alhaurín el Grande	400	348490	4054984	52
Mijas	500	353618	4051196	69

Cuadro 9.3. Número de días de lluvia durante el año hidrológico 1996/1997.

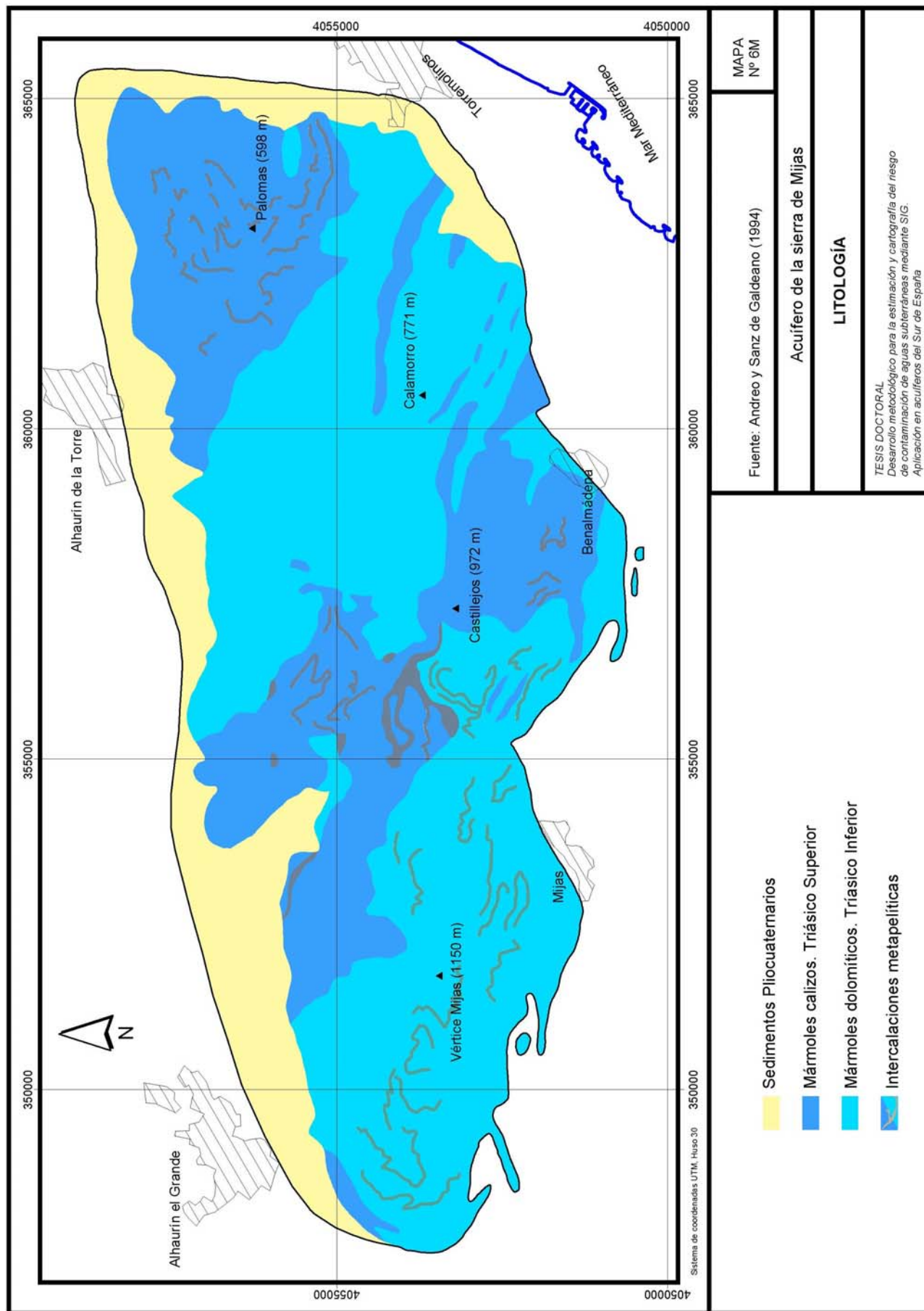
9.1.4. GEOLOGÍA

En el área de estudio afloran dos unidades estructurales de relieve pertenecientes al dominio de la Cordillera Bética: la Zona Interna y la cuenca del Bajo Guadalhorce. Dentro de la Zona Interna, en la sierra de Mijas afloran materiales pertenecientes al Complejo Alpujárride del Paleozoico y Triásico. Por otra parte, el sector de la cuenca del Bajo Guadalhorce que aflora en la zona de estudio es de edad Neógeno-Cuaternario y se localiza en el borde septentrional y oriental de la sierra

9.1.4.1. LITOLOGÍA

Los materiales del Complejo Alpujárride afloran en una superficie aproximada equivalente al 85% del total del área de estudio, mientras que el resto se corresponde con materiales neógeno-cuaternarios localizados en el borde septentrional y oriental de la sierra de Mijas (mapa 6M).

La serie estratigráfica del alpujárride está formada por dos conjuntos litológicos: uno inferior compuesto por metapelitas del Paleozoico y otro superior por mármoles triásicos (Andreo y Sanz de Galdeano, 1994).



La formación metapelítica tiene una potencia de 400 m y en ella se diferencian tres tramos: uno inferior de migmatitas, uno intermedio de gneises oscuros y otro superior de esquistos claros. Hacia techo de la formación metapelítica, hay 100 m de gneises, esquistos y mármoles azules, grises y bandeados, en transición hacia los mármoles.

El conjunto superior está formado por mármoles triásicos con una potencia aproximada de 600 m y se puede dividir en dos tramos (Andreo y Sanz de Galdeano, 1994). El tramo inferior está constituido por mármoles del Trías medio, con una potencia de 300 m. Son masivos, de composición dolomítica y color blanco, muy recrystalizados y diaclasados, e incluso llegan a presentar aspecto sacaroideo por la fuerte disgregación intergranular que sufren. En el tramo superior existen mármoles del Trías superior, con un espesor aproximado de 300 m. Son mármoles de color azul y de composición caliza, dispuestos en bancos bien estratificados con espesores de centímetros a metros. Hacia muro presentan aspecto sacaroideo, mientras que a techo son abundantes las intercalaciones metapelíticas discontinuas con espesores centimétricos hasta métricos.

En los sedimentos pliocuaternarios se pueden distinguir dos conjuntos: uno inferior de edad Terciaria y otro superior del Cuaternario. El conjunto de materiales del terciario está formado, en la base, por calcarenitas del Tortoniense discordantes sobre los mármoles Alpujárrides. Encima, hay una potente serie de margas del Plioceno inferior, cuya base está constituida por un tramo de conglomerados de varias decenas de metros de espesor y, hacia techo y, hacia los bordes de la cuenca, por arenas de composición carbonática procedentes de los mármoles de la sierra. El conjunto superior de materiales pliocuaternarios lo forman depósitos aluviales discordantes sobre el resto de materiales. Dan lugar a geofomas de piedemonte, glacis, en el límite septentrional del sistema y rañas en el sector oriental. Estos depósitos están constituidos por brechas y travertinos de edad Pleistoceno y por gravas y arenas del Holoceno.

9.1.4.2. ESTRUCTURA GEOLÓGICA Y TECTÓNICA

Los materiales alpujárrides presentan una estructura plegada y los materiales pliocuaternarios tienen una disposición tabular.

La estructura los materiales alpujárrides está configurada por pliegues isoclinales (Andreo y Sanz de Galdeano, 1994) con una dirección ESE-WNW (figura 9.6a), con vergencias variables según distintos sectores: vergentes hacia el Norte en la zona meridional y al Sur en la parte septentrional, es decir, vergen hacia el interior de la sierra dando lugar a geometrías en “fondos de saco” (figura 9.6b). Todos los pliegues han sido afectados por fracturas más modernas, cuyas direcciones predominantes son NNW-SSE.

La vertiente meridional de la sierra está afectada por una estructura sinclinal con el flanco Sur invertido (figura 9.6b). Hacia el Norte, un anticlinal de dirección ESE-WNW, recupera la estructura y los materiales se sitúan en serie normal. En la parte central de la sierra hay un sinclinal con dirección ESE-WNW al Norte del cual se produce un cambio en la vergencia de los pliegues (figura 9.6b, corte 4).

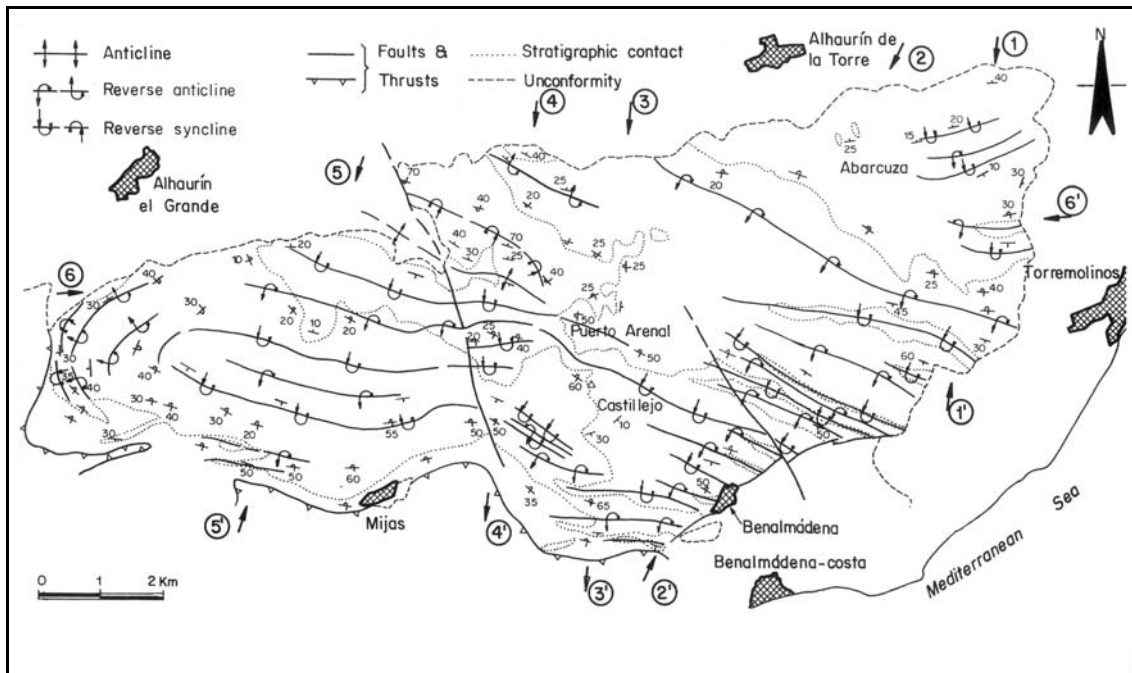


Figura 9.6a. Mapa estructural de la Sierra de Mijas. Tomado de Andreo y Sanz de Galdeano (1994).

Las principales fallas de la Sierra de Mijas, fallas megascópicas, constituyen los límites de los materiales acuíferos y originan escarpes y fuertes pendientes. La sierra queda limitada al Norte por una falla de desgarre con orientación N50-70E. En el borde Sur de la sierra hay fallas con la misma dirección antes citada que fracturan las estructuras plegadas. En el borde oriental, hay una falla normal con dirección N10E fosilizada por materiales pliocuaternarios en el área de Torremolinos. Dentro de la sierra se localizan fallas normales de dirección N30W al Este de la localidad de Mijas y al Este de Benalmádena (Andreo *et al.*, 1997)

Por otro lado, cabe destacar la abundancia de diaclasas subverticales, principalmente, en los mármoles dolomíticos. Predomina la dirección NNE-SSW en el borde oriental de la sierra y NNW-SSE en la parte suroccidental y central. En el sector septentrional y occidental las diaclasas tienen una orientación, principalmente, N100E y N120E. (Andreo *et al.*, 1997).

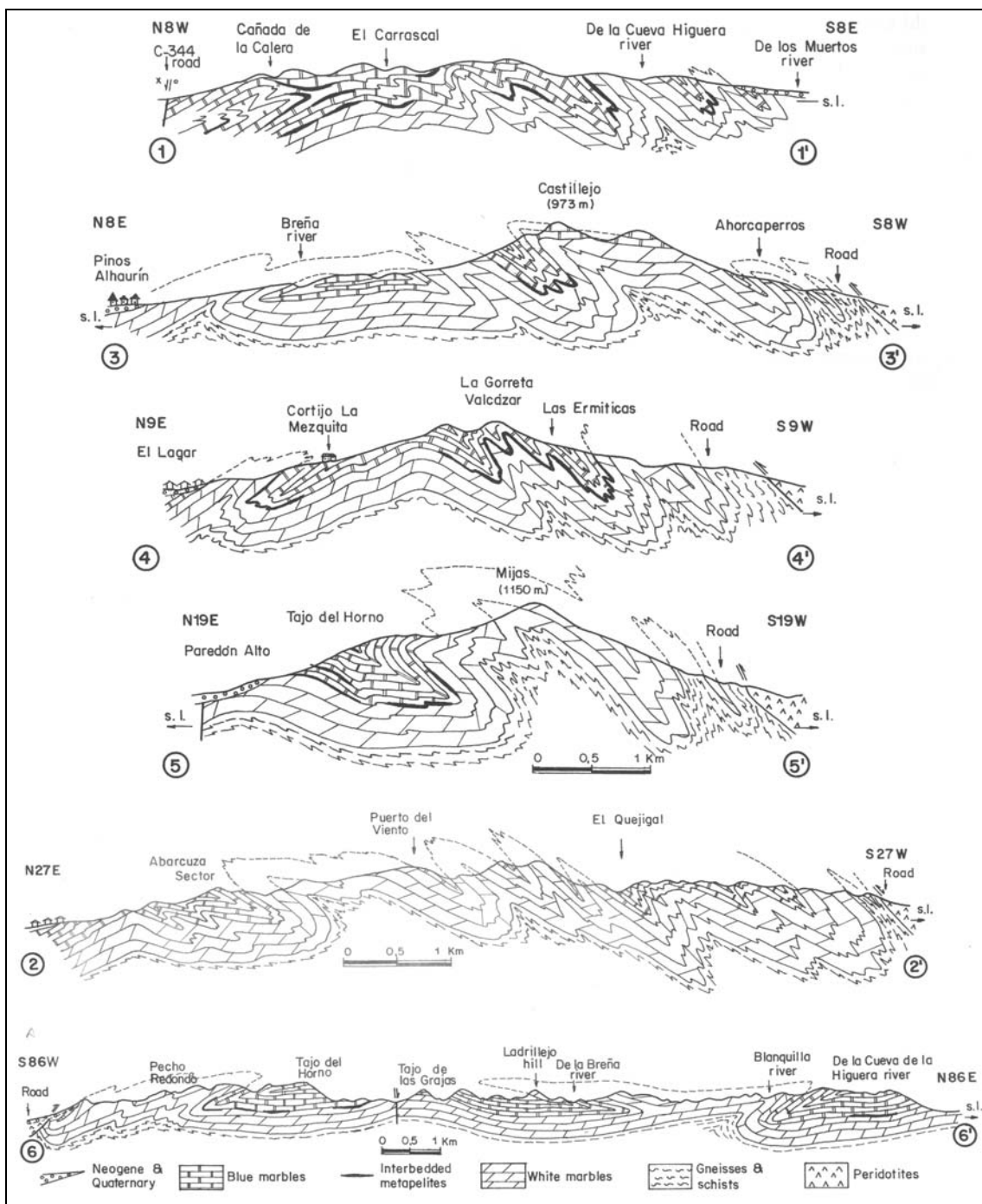


Figura 9.6b. Cortes geológicos de la Sierra de Mijas. Tomado de Andreo y Sanz de Galdeano (1994).

9.1.4.3. GEOMORFOLOGÍA: MODELADO KÁRSTICO

La sierra Mijas está, básicamente, formada por materiales carbonáticos en los que pueden observarse algunas formas de modelado kárstico, pero que está poco desarrollado tanto superficie como en el medio subterráneo.

En los mármoles calizos es donde hay algo más de desarrollo de las formas exokársticas, en concreto del lapiaz. Éste se encuentra sobre todo en el área de Abarcuza, caracterizado por tener crestas agudas y afiladas y surcos estrechos. En los mármoles dolomíticos, el lapiaz presenta formas redondeadas con amplios surcos ortogonales y poco profundos en comparación con el anterior. Este tipo de lapiaz se desarrolla, principalmente, en la vertiente meridional de la sierra, en las cercanías de las localidades de Arroyo de la Miel y Torremolinos. La diferencia morfológica entre uno y otro lapiaz es fruto de la diferente solubilidad de los mármoles calizos y dolomíticos. Los mármoles azules están formados fundamentalmente por calcita y en ellos la disolución se desarrolla con mayor facilidad, que en los mármoles blancos constituidos por dolomita.

En cuanto a las formas endokársticas, son pocas las cavidades conocidas y se encuentran, principalmente, en los mármoles azules calizos, debido a la composición mineralógica de los dos tipos de mármoles. Las simas son pequeñas, con entradas de apenas un metro de profundidad. Todas ellas se han localizado en mármoles calizos del centro de la sierra: cimas de los Castillejos, cerro de la Medialuna y, principalmente, en el sector oriental de la sierra, en las planicies de la zona de la Abarcuza. Cavidades horizontales se han contabilizado 11 en total, todas localizadas en mármoles calizos, como la cueva del Toro en las proximidades de los manantiales de Torremolinos, con presencia de espeleotemas (coladas, banderas, estalactitas y estalagmitas). Por último, hay una clara relación entre la dirección de las fracturas y la orientación de las cuevas; es decir, hay una notable influencia de la fracturación en el desarrollo de la karstificación (Andreo, 1997).

9.1.5. HIDROGRAFÍA

En la sierra de Mijas, la escorrentía superficial es prácticamente nula, debido al elevado grado de fracturación de los materiales carbonáticos y, en menor medida, karstificación (Andreo, 1997).

9.1.6. HIDROGEOLOGÍA

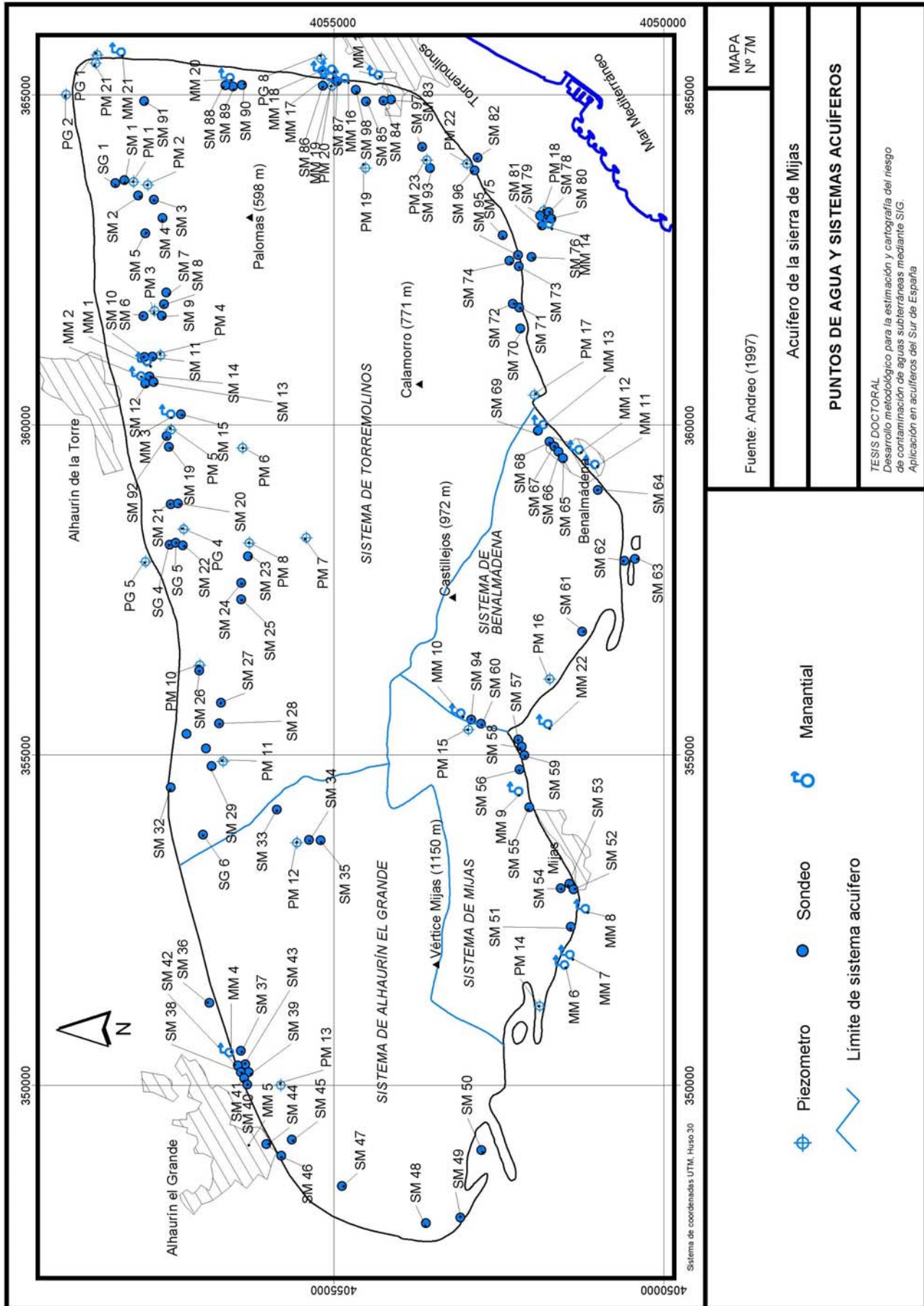
En función de la estructura geológica, el nivel piezométrico y la cota de surgencia de los manantiales, Andreo (1997) diferenció cuatro sistemas: Alhaurín el Grande (16,3 km²), Mijas (8,6 km²), Benalmádena (8,9 km²) y Torremolinos (47 km²), aunque en general todos presentan el mismo comportamiento hidrogeológico. Esta compartimentación del acuífero de la sierra de Mijas en cuatro sistemas tiene una importante repercusión en la evaluación de la vulnerabilidad de la población expuesta, dado que hace necesario poder diferenciar que cantidad de población se abastece de cada sistema.

9.1.6.1. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

En la sierra de Mijas hay más de un centenar de puntos de agua (mapa 7M) pero en esta investigación se han considerado solo aquellos en los que se pudo medir el nivel piezométrico en el año 1996/1997 (cuadro 9.4).

Nombre del sondeo	Referencia	Cota topográfica (m s.n.m.)	Coordenada UTM		Cota piezométrica (m s.n.m.). Año 1996/1997
			X	Y	
Manantiales III	SM 87	65	365101	4054946	7
San José I	SM 83	70	364827	4054129	9
Manantiales II	SM 86	65	365035	4055164	10
Toril	SM 97	100	364111	4053657	11
Pellejera I	SM 85	100	364797	4054510	14
Cantera	PM 19	201	363796	4054525	15
Pinillo II	SM 96	95	363755	4052868	16
San José II	SM 84	70	364807	4054246	17
Pinillo I	SM 82	95	363943	4052822	17
Churriana	PM 21	57	365385	4058609	26
Lagar 20-A	PM 2	188	363542	4057823	30
Arroyo Pinillo	PM 23	150	363917	4053594	37
Povea 40-B	PM 3	166	361638	4057716	86
Fuensanguina	SM 10	134	360928	4057866	115
Higuera 2-D	PM 10	205	356267	4057033	116
Pinos Alh. 20-C	PM 8	264	358114	4056281	116
Pinos Alh. 9-C	SM 20	171	358707	4057359	121
Portales 41-B	PM 5	165	359834	4057471	124
Pinos Alh. 8-C	SM 21	167	358696	4057465	130
Ayo. Pinar	PM 6	228	359556	4056382	136
Mezquita 1-E	SM 27	205	355691	4056707	143
Castillejos IV	SM 68	250	359646	4051730	180
Paso	SM 64	250	358915	4051000	193
Bucarejo	SM 69	213	359808	4051909	202
Faber	SM 38	301	350096	4056405	285
U. Alh. Sierra	SM 36	328	351147	4056885	286
A. Don Pedro	PM 16	338	356055	4051730	295
Cortijo Cuevas	SM 50	422	348916	4052763	300
El Puerto	SM 55	422	354109	4052040	410
Ayo. Presas	PM 15	491	355292	4052961	481

Cuadro 9.4. Inventario de puntos de agua y datos piezométricos medios en el año 1996/1997. Elaborado a partir de datos de Andreo, 1997 y del Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga.



Las variaciones temporales en el nivel de agua subterránea, debido a la recarga procedente de la precipitación, inciden en la variación del grado de vulnerabilidad del acuífero y, por tanto, del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas.

Según datos del Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga, la evolución piezométrica en la década de los noventa presenta un descenso progresivo desde diciembre del año 1989 hasta diciembre de 1995, coincidiendo con el final de la sequía del año 1994/1995 (figura 9.7). A partir de 1996 se inició un periodo de fuertes precipitaciones que tuvo su manifestación en un aumento de los niveles de agua subterránea por encima de la media. Por todo ello, y de acuerdo con el análisis de la precipitación, epígrafe 9.1.3, se ha establecido el año 1996/1997 como año un húmedo. Se trata de un año representativo de una situación de mayor riesgo, puesto que el nivel de agua subterránea está más cerca de la superficie topográfica y el tiempo de tránsito de un contaminante potencial a través de la zona no saturada sería menor.

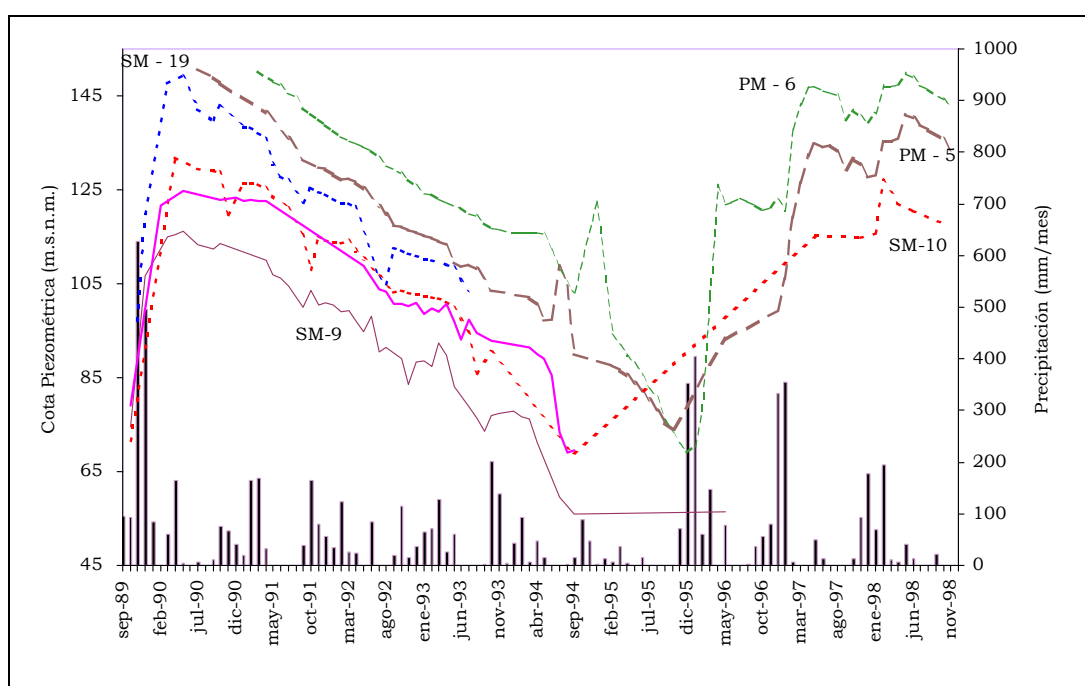
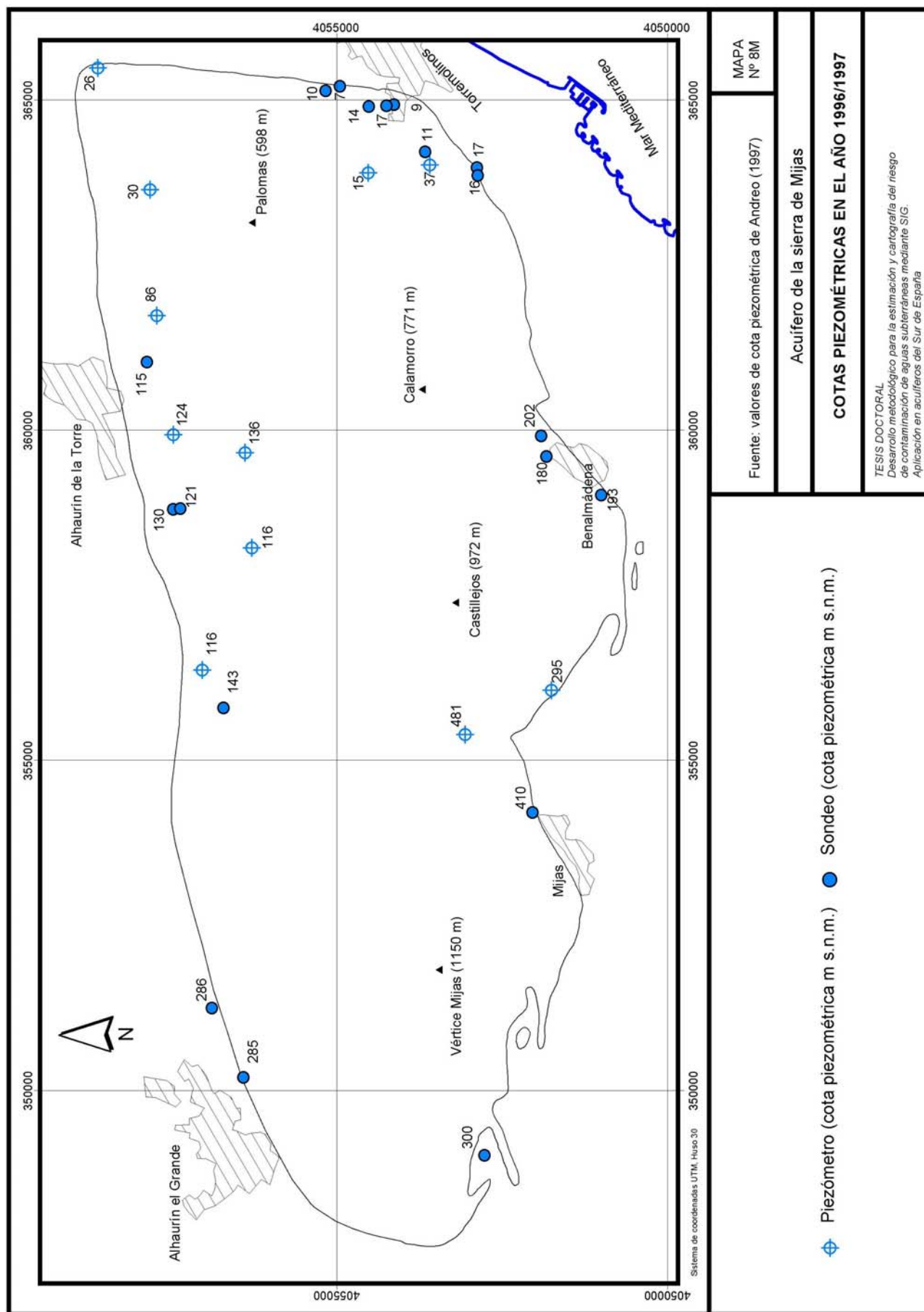


Figura 9.7. Evolución de la cota piezométrica en sondeos representativos de la Sierra de Mijas entre los años 1989 y 1998.

9.1.6.2. PIEZOMETRÍA

El mapa 8M muestra los valores más elevados de cota piezométrica en el sector de Mijas y los valores más bajos próximos a los manantiales de Torremolinos. Los valores de la cota piezométrica descienden progresivamente de Oeste a Este. Así, se deduce un flujo general del agua subterránea desde el Suroeste hacia el Este.

El valor medio de las cotas piezométricas del periodo 1996/1997 es de 115 m s.n.m. En las zonas próximas a la localidad de Mijas la cota piezométrica está 395 m, en Alhaurín el Grande 285 m, en las cercanías de Benalmádena 217 m, 120 m en Alhaurín de la Torre, 28 m en Churriana y 15 m en Torremolinos.



Los sondeos próximos a los manantiales de Torremolinos presentaban en el año 1996/1997 una cota piezométrica inferior a la de los manantiales, 40 m aproximadamente. Esta situación da una idea del elevado volumen de agua que se extrae en este sector, máxime si se tiene en cuenta que el análisis se ha realizado para un periodo de aguas altas.

9.1.6.3. PARÁMETROS HIDRÁULICOS

Los valores de transmisividad en la sierra de Mijas son variables en función del tipo de litología. Así, los sondeos que captan agua de mármoles dolomíticos tienen valores de transmisividad superiores a 1000 m²/día, mientras que los mármoles calizos es inferior. La diferencia de transmisividad entre un tipo de litología y otra está motivada por el intenso grado de fracturación que presentan los mármoles dolomíticos frente a los calizos que, en conjunto, presentan un comportamiento hidrogeológico propio de acuíferos fisurados o de flujo difuso.

A partir de los datos de transmisividad y del espesor de la zona saturada, del orden de 10² m, se ha estimado un valor medio de permeabilidad variable entre 30 m/día, sobre todo en los mármoles blancos y 10 m/día principalmente en los mármoles calizos. La permeabilidad de las margas del Plioceno, fue calculada por Andreo (1997) mediante las pruebas de permeabilidad realizadas en el sondeo PM 21, en el cual se obtuvieron valores comprendidos entre 10⁻² y 10⁻⁴ m/día.

9.1.6.4. FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO Y BALANCE HÍDRICO

Los manantiales de la sierra de Mijas (cuadro 9.5) se sitúan en los bordes de la sierra en el contacto con los materiales de baja permeabilidad: metapelitas en el borde Sur y margas en el borde Norte y Este.

Sector	Nombre y referencia	Cota (m s.n.m.)
Torremolinos	Inca (MM-19) y Albercón del Rey (MM-18)	55
	Fuente del Rey (MM-21)	60
	San José (MM-15) y la Cueva (MM-17)	65
	San Fernando (MM-14)	70
	Rojas (MM-20)	70
	Pellejera (MM-16)	74
Alhaurín de la Torre	Fuente Grande (MM-2)	125
	Fuensanguina (MM-1)	130
	Fuenseca (MM-3)	145
Benalmádena	Bucarejo (MM-13)	210
	Chorrillo (MM-11), Cazalla (MM-12)	220
Alhaurín el Grande	San Antón (MM-5)	287
	Montánchez (MM-4)	290
Mijas	Rubia (MM-6), Morena (MM-7) y Barrio (MM-8)	400
	Pavitas (MM-9)	410
	Osunilla (MM-22)	423
	Arroyo Presas (MM-10)	485

Cuadro 9.5. Manantiales de la Sierra de Mijas. Tomado de Andreo (1997).

Los manantiales están en régimen influenciado por los bombeos que se producen de forma continuada desde los años 70. Por ello, los manantiales están secos excepto después de prolongados periodos de lluvia, como los ocurridos en el año 1989/90, cuando volvieron a drenar agua.

En régimen natural, las variaciones de caudal de los manantiales ante las precipitaciones se producen de forma lenta y amortiguada, lo que pone de manifiesto el gran poder regulador del acuífero y, en definitiva, un bajo grado de karstificación funcional del mismo (Andreo, 1997). En conjunto, la sierra de Mijas se comporta como un acuífero de flujo difuso.

En cuanto al balance hídrico (cuadro 9.6), las entradas en la sierra de Mijas proceden en un 100 % del agua de lluvia Andreo *et al.* (1997). La escorrentía se puede considerar nula a efectos de balance, por tanto, la lluvia que no se evapora constituye los recursos. La infiltración en la sierra de Mijas equivale al 45,5 % de la precipitación. Este valor se obtuvo mediante el método de balance de cloruros, por ser el que mejores resultados ofreció frente a otros métodos como los de Turc, Coutagne, Thornwhite y Kessler. La precipitación media es 45 hm³/año, aproximadamente, por lo que los recursos son 20,5 hm³/año.

Las salidas del acuífero se producen mediante bombeos en los sondeos y se cifraron en 31 hm³/año. Los manantiales sólo drenan agua en años húmedos, después de episodios de recarga importantes y durante poco tiempo.

Con estos datos se deduce que la explotación de las reservas de la sierra de Mijas es de 10,5 hm³/año, aproximadamente.

Elementos del balance		Volumen en hm ³
Entradas	Entradas (precipitación)	45
	% Infiltración	45'5 %
	Evapotranspiración	24,5
	Escorrentía	0,0
	Recursos	20'5
Salidas	Bombeos en sondeos	31
	Déficit	10'5

Cuadro 9.6. Datos del balance hídrico en la Sierra de Mijas. Modificado de Andreo (1997).

9.1.7. SUELOS

9.1.7.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES

Los factores que determinan el tipo de suelo son, principalmente: la litología, la precipitación y la topografía. El predominio de mármoles triásicos, precipitaciones moderadas y un relieve abrupto originan suelos con características similares en el conjunto de la sierra. Son suelos que tienen como denominador común un escaso desarrollo edáfico. Por lo general, están poco evolucionados, no presentan horizonte B (salvo en el caso de Calcisoles y Cambisoles de muy escasa representación) y tienen un elevado contenido en CaCO₃, mayor conforme aumenta la profundidad.

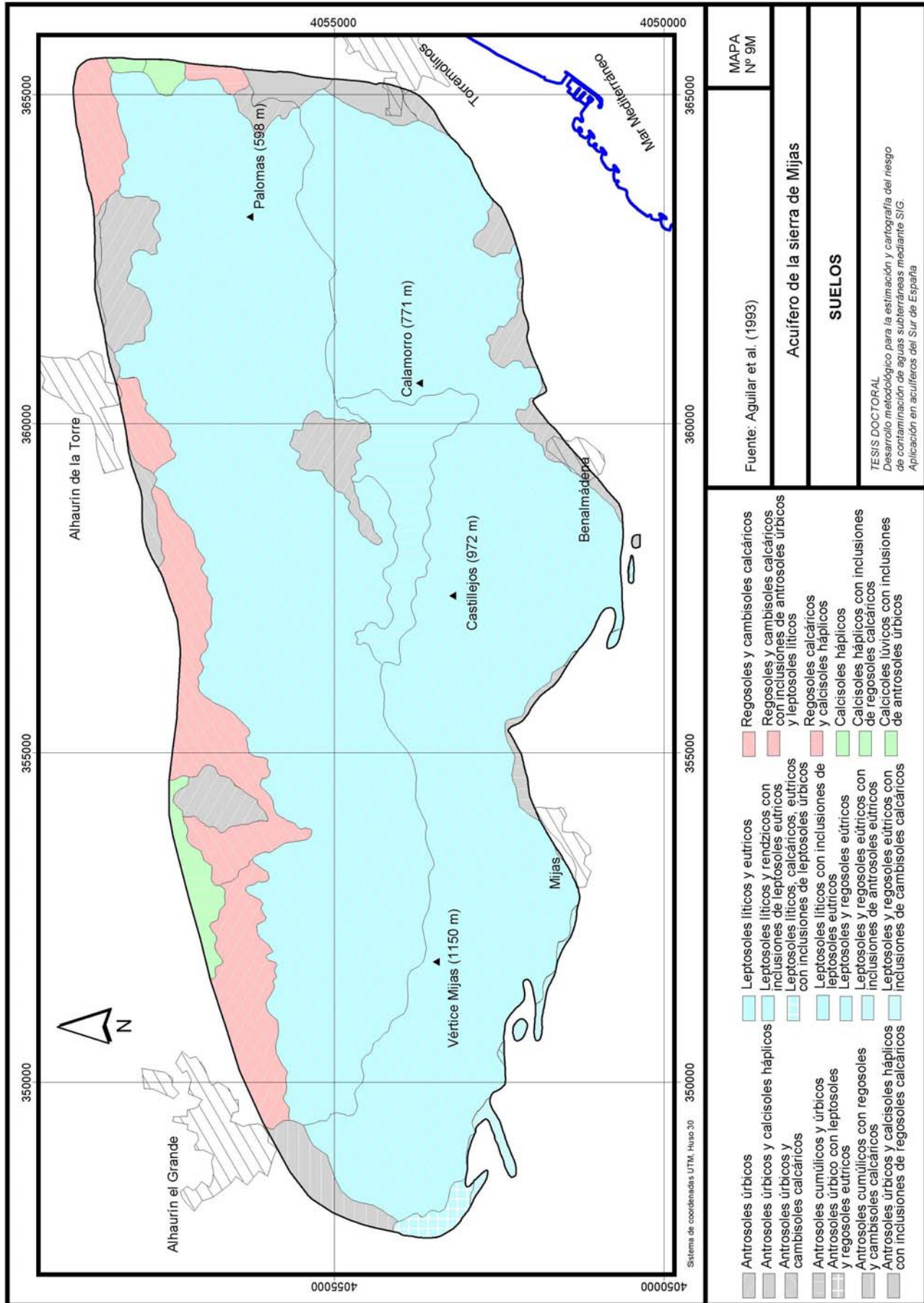
En la zona de estudio se han diferenciado un total de 20 tipos de suelos (cuadro 9.7). En un 80% de los casos son suelos líticos y asociaciones de Leptosoles.

Grupos y ordenes de suelos	Espesor medio (m)	Superficie	
		km ²	%
Antrosoles úrbicos	0,6	0,3	0,3
Asociación de antrosoles cumúlicos y antrosoles úrbicos	0,6	5	5,3
Asociación de antrosoles cumúlicos con regosoles calcáricos y cambisoles calcáricos	0,7	1,0	1,0
Asociación de antrosoles úrbicos y calcisoles háplicos	0,7	0,5	0,6
Asociación de antrosoles úrbicos y cambisoles calcáricos	0,9	0,5	0,5
Asociación de antrosoles úrbicos con leptosoles eutricos y regosoles eutricos	0,5	0,03	0,03
Asociación de antrosoles úrbicos y calcisoles háplicos con inclusiones de regosoles calcáricos	0,7	0,5	0,5
Asociación de leptosoles líticos y leptosoles eutricos	0,2	37,6	38,4
Asociación de leptosoles líticos y leptosoles réndzicos con inclusiones de leptosoles eutricos	0,2	38,0	38,8
Asociación de leptosoles líticos con leptosoles calcáricos y leptosoles eutricos con inclusiones de antrosoles úrbicos	0,4	0,5	0,5
Leptosoles eutricos con inclusiones de leptosoles líticos	0,3	3,2	3,3
Asociación de leptosoles eutricos y regosoles eutricos	0,4	0,1	0,1
Asociación de leptosoles eutricos y regosoles eutricos con inclusiones de antrosoles úrbicos	0,4	0,2	0,2
Asociación de leptosoles eutricos y regosoles eutricos con inclusiones de cambisoles calcáricos	0,4	0,3	0,3
Asociación de regosoles calcáricos y cambisoles calcáricos con inclusiones antrosoles úrbicos y leptosoles líticos	0,8	5,8	5,9
Asociación de regosoles calcáricos y cambisoles calcáricos	0,8	2,6	2,7
Asociación de regosoles calcáricos y calcisoles háplicos	0,6	0,3	0,3
Calcisoles háplicos	0,7	0,9	0,9
Calcisoles háplicos con inclusiones de regosoles calcáricos	0,7	0,1	0,1
Calcisoles lúvicos con inclusiones de antrosoles úrbicos	0,7	0,3	0,3

Cuadro 9.7. Grupos y órdenes de suelos en la zona de estudio (Aguilar *et al.*, 1993).

En el mapa 9M se muestra la distribución de los tipos de suelos de la zona de estudio según la cartografía de Aguilar *et al.* (1993). Los Leptosoles abarcan la mayor parte de la sierra, mientras que en los bordes de la misma se desarrollan suelos del tipo Antrosoles, Cambisoles, Calcisoles y Regosoles. Estos últimos se localizan sobre materiales no carbonáticos o en sectores caracterizados por procesos de antropización como urbanizaciones, cultivos, infraestructuras de comunicaciones y canteras.

Los Antrosoles son los suelos resultantes de la pérdida de las características de los horizontes originales por el impacto del hombre sobre el medio. En la zona de estudio se distinguen entre Antrosoles úrbicos dada la presencia de residuos urbanos como consecuencia de la cercanía de núcleos de población (Alhaurín de la Torre, Mijas, Arroyo de la Miel, Torremolinos), y Antrosoles cumúlicos que denotan una acumulación de sedimentos, en este caso debido a los cultivos y los aportes que reciben de materia orgánica y arena. El horizonte C se desarrolla a partir de 60 cm de profundidad.



Fuente: Aguilar et al. (1993)

MAPA Nº 9M

Acuífero de la sierra de Mijas

SUELOS

TESIS DOCTORAL
Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG.
Aplicación en acuíferos del Sur de España

Los Regosoles son suelos poco evolucionados desarrollados sobre materiales no consolidados, pobres en materia orgánica y poco espesor. En la zona de estudio hay Regosoles calcáricos por la presencia de un sustrato carbonático. Estos suelos tienen un horizonte de transición A/C, que a partir de 50 cm, aproximadamente, de profundidad da origen a un horizonte C.

Los Leptosoles son suelos poco evolucionados de muy escaso espesor, 25-30 cm, y sobre material consolidado. Se distinguen Leptosoles líticos, con apenas unos centímetros de desarrollo edáfico y sólo un horizonte A, y Leptosoles eutrícos o eutróficos con un horizonte A y otro de transición A/C desarrollados en áreas de repoblación forestal.

Los Calcisoles tienen un horizonte cálcico o petrocálcico y otro argílico de acumulación de arcilla por iluviación (más de un 50 %), aproximadamente hasta los 70 cm de profundidad, a partir del cual se desarrolla un horizonte C.

Los Cambisoles son suelos con una potencia de hasta 75 cm y sin horizonte C. Al igual que los Regosoles, están fuertemente influenciados por el sustrato carbonático, por lo que aparecen Cambisoles calcáricos.

9.1.7.2. CARACTERÍSTICAS TEXTURALES

Para el análisis textural, que posteriormente servirá de base en la puntuación de los suelos en la evaluación y cartografía de vulnerabilidad del medio físico del acuífero, se ha utilizado el porcentaje de arenas, limos y arcillas presente en cada horizonte según los datos de Aguilar *et al.* (1993). Los porcentajes de arena vienen diferenciados en cinco categorías (arena muy gruesa, gruesa, mediana, fina y muy fina) y los de limo en dos (grueso y fino). En los cuadros (9.8 a 9.12) se muestran los porcentajes, tanto de arenas como de limos, agrupados por horizontes y en las figuras (9.8 a 9.14) se presentan las variaciones granulométricas del suelo en profundidad. Por último, se han calculado las medias aritméticas de los porcentajes de cada tamaño de grano (arena, limo, arcilla) en el conjunto del perfil, para poder catalogar el suelo a partir de su textura.

Los Antrosoles (cuadro 9.8 y figura 9.8) y los Regosoles (cuadro 9.9 y figura 9.9) tienen los porcentajes más elevados de arena de todos los suelos analizados. En los primeros, el porcentaje de arenas es constante a lo largo del perfil, mientras que en los Regosoles se observan grandes diferencias entre los distintos horizontes. Las arenas llegan a ser prácticamente la única fracción granulométrica en los horizontes profundos, mientras que en las capas próximas a la superficie predominan las arcillas y los limos.

Antrosol cumúlico			
Perfil nº 1066-26			
Horizonte	Arenas	Limos	Arcillas
Ap	56,4	28,3	15,3
C ₁	58,6	24,6	16,9
C ₂	59,3	18,9	21,8
Promedio perfil	58,1	23,9	18,0

Cuadro 9.8. Porcentaje de tamaño de grano de los horizontes de un Antrosol. Elaborado a partir de los datos del proyecto LUCDEME (Aguilar *et al.*, 1993).

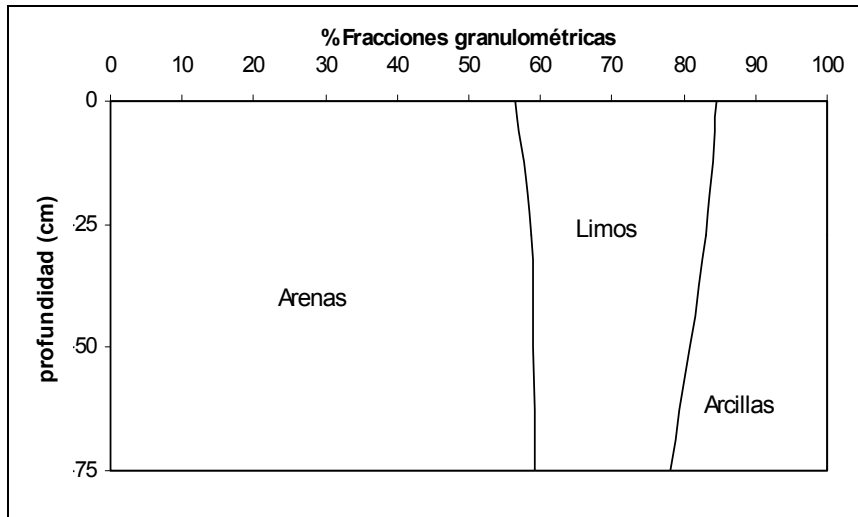


Figura 9.8. Textura del perfil n° 1066-26 correspondiente a un Antrosol. Elaborado a partir de los datos del proyecto LUCDEME (Aguilar *et al.*, 1993).

Regosol calcárico			
Perfil n° 1066-10			
Horizonte	Arenas	Limos	Arcillas
Ah	26,3	43,0	30,7
AC	83,5	5,2	11,3
C ₁	93,4	3,0	3,5
C ₂	96,7	1,1	2,2
Promedio perfil	75,0	13,1	11,9

Cuadro 9.9. Porcentaje de tamaño de grano de los horizontes de un Regosol. Elaborado a partir de los datos del proyecto LUCDEME (Aguilar *et al.*, 1993).

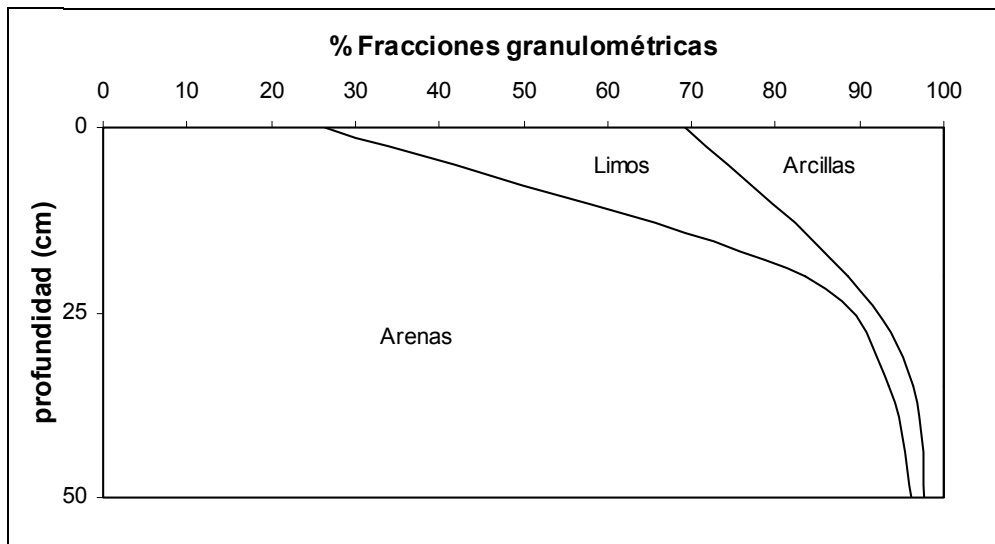


Figura 9.9. Textura del perfil n° 1066-10 correspondiente a un Regosol. Elaborado a partir de los datos del proyecto LUCDEME (Aguilar *et al.*, 1993).

Los Leptosoles (cuadro 9.10) y los Calcisoles (cuadro 9.11) se caracterizan por tener un elevado porcentaje de arcillas, mayor en los Calcisoles. Los Leptosoles, en cambio, tienen

un porcentaje constante de arcillas en todo el perfil (figura 9.10 y figura 9.11). Los Calcisoles presentan un elevado porcentaje de arcillas en los horizontes intermedios B1 y B2 (figura 9.12).

Lítico Perfil nº 1066-27				Eutríco Perfil nº 1066-16			
Horizonte	Arenas	Limos	Arcillas	Horizonte	Arenas	Limos	Arcillas
Ah	32,1	36,6	31,2	Ah	51,4	13,2	37,5
				AC	45,2	19,5	37,4
				Promedio perfil	48,3	16,3	37,4

Cuadro 9.10. Porcentaje de tamaño de grano de los horizontes de un Leptosol. Elaborado a partir de los datos del proyecto LUCDEME (Aguilar *et al.*, 1993).

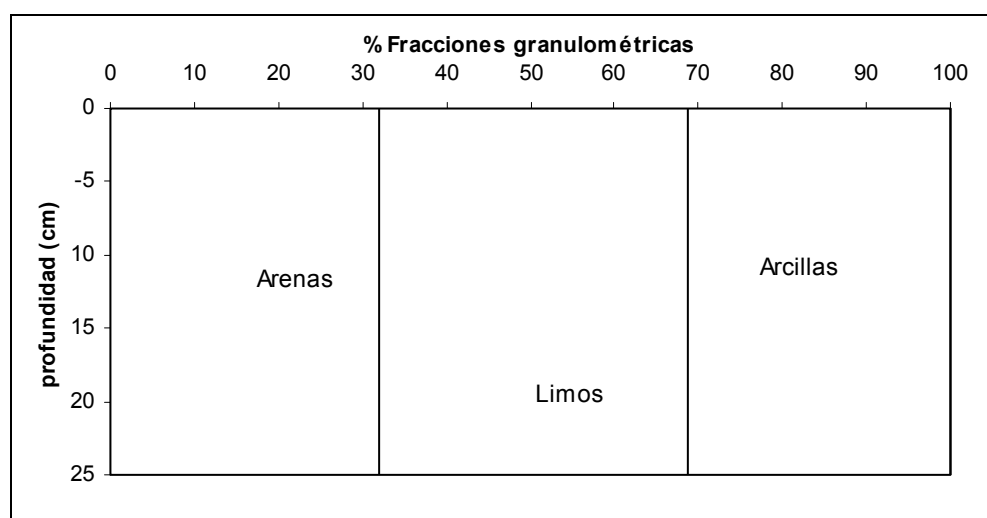


Figura 9.10. Textura del perfil nº 1066-27 perfil nº 1066-16 correspondiente a un Leptosol. Elaborado a partir de los datos del proyecto LUCDEME (Aguilar *et al.*, 1993).

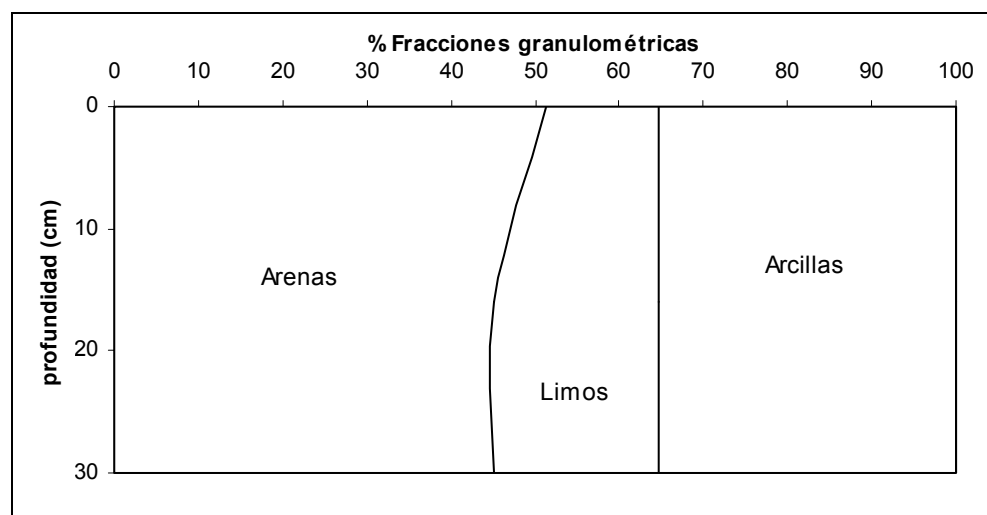


Figura 9.11. Textura del perfil nº 1066-16 correspondiente a un Leptosol. Elaborado a partir de los datos del proyecto LUCDEME (Aguilar *et al.*, 1993).

Calcisol			
Perfil n° 1066-24			
Horizonte	Arenas	Limos	Arcillas
Ap	44,6	31,9	23,4
Bt1	24,4	17,1	58,5
Bt2	27,8	22,6	49,6
Cmk	40,2	38,4	21,4
Promedio perfil	34,3	27,5	38,2

Cuadro 9.11. Porcentaje de tamaño de grano de los horizontes de un Calcisol. Elaborado a partir de los datos del proyecto LUCDEME (Aguilar *et al.*, 1993).

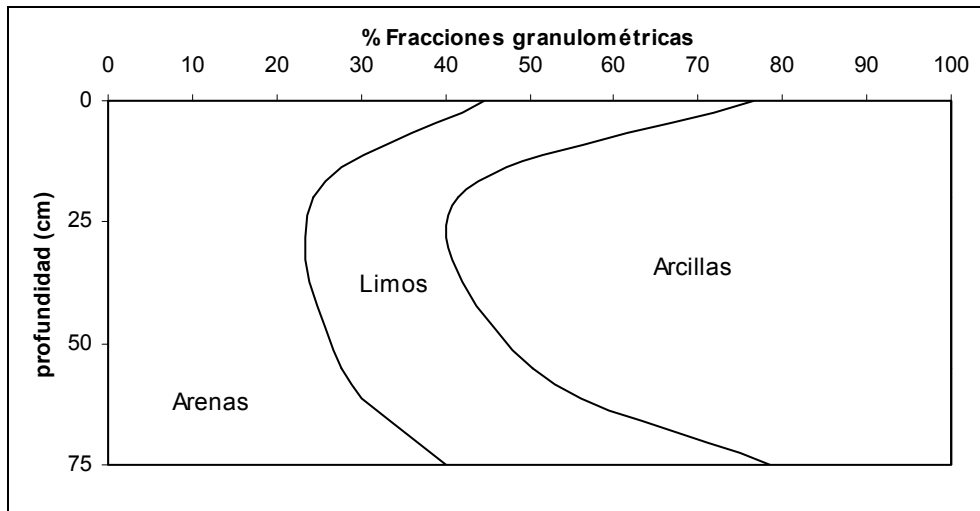


Figura 9.12. Textura del perfil n° 1066-24 correspondiente a un Calcisol. Elaborado a partir de los datos del proyecto LUCDEME, Aguilar *et al.* (1993).

Los Cambisoles calcáricos son los que presentan la textura más equilibrada entre los distintos horizontes analizados y en el conjunto de perfiles edáficos (cuadro 9.12). Esta característica se rompe ligeramente en profundidad y en superficie, en función de la posición fisiográfica que ocupan los suelos. Así, en el fondo de los valles predominan las arenas y disminuye el porcentaje de limos y arcillas (figura 9.13) en el horizonte Bc, mientras que en laderas disminuye el porcentaje de arcillas y aumenta el de arenas en el horizonte Ap (figura 9.14).

Calcárico				Calcárico			
Perfil n° 1066-18				Perfil n° 1066-21			
Horizonte	Arenas	Limos	Arcillas	Horizonte	Arenas	Limos	Arcillas
Ap	48,3	29,0	22,7	Ap	55,7	26,8	19,4
Bw1	47,0	29,0	24	Bw1	48,5	27,5	24,1
Bw2	48,3	26,7	25,1	Bw2	47,1	29,2	23,8
BC	76,4	14,1	9,5	BC	44,9	30,5	25,5
Promedio perfil	55,0	24,7	20,3	Promedio perfil	49,1	28,5	23,2

Cuadro 9.12. Porcentaje de tamaño de grano de los horizontes de un Cambisol. Elaborado a partir de los datos del proyecto LUCDEME (Aguilar *et al.*, 1993).

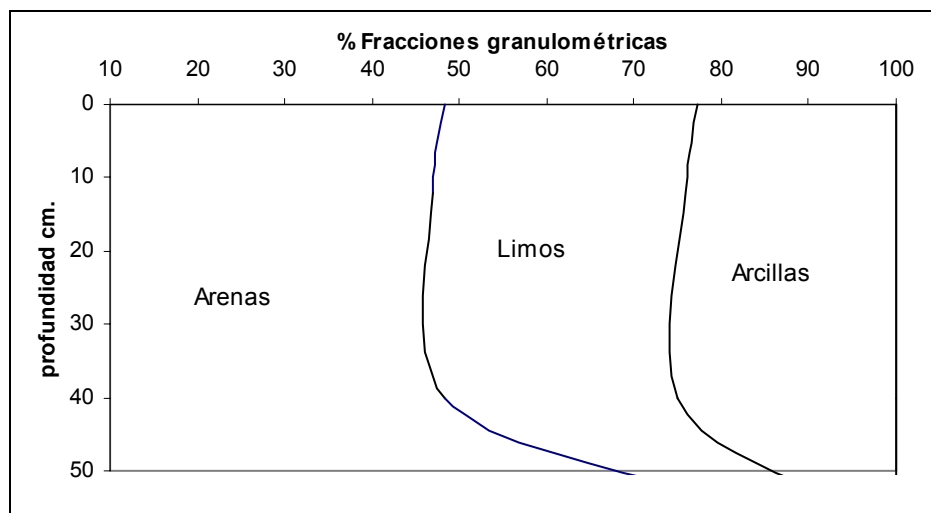


Figura 9.13. Textura del perfil n° 1066-18 correspondiente a un Cambisol. Elaborado a partir de los datos del proyecto LUCDEME (Aguilar *et al.*, 1993).

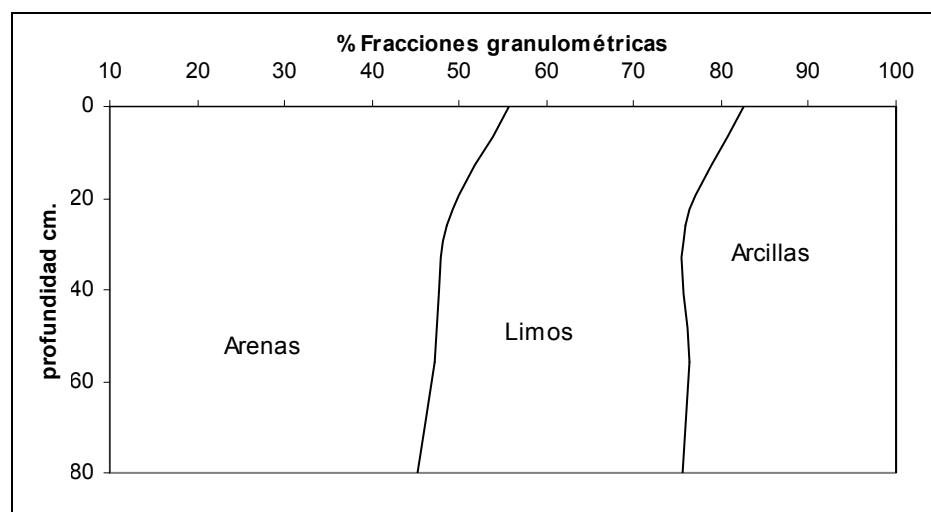


Figura 9.14. Textura del perfil n° 1066-21 correspondiente a un Cambisol. Elaborado a partir de los datos del proyecto LUCDEME (Aguilar *et al.*, 1993).

9.1.8. VEGETACIÓN NATURAL Y OTROS USOS DEL SUELO

La sierra de Mijas es un espacio eminentemente forestal, lo cual contribuye, en cierta medida, a la conservación de la calidad ambiental del acuífero.

La vegetación natural actual de la sierra de Mijas está constituida por etapas de sustitución de la vegetación climática (encinar): matorrales mediterráneos del tipo tomillares, aulagares o romerales con una distribución discontinua y fragmentada entre espacios humanizados y sectores de pinar de repoblación. La repoblación se ha efectuado con pino carrasco (*Pinus halepensis*) el cual se distribuye, principalmente, en el tercio occidental de la sierra. En el sector central, el pinar aparece mezclado con el matorral, de manera que el bosque pierde densidad. Este sector constituye un tramo de transición al tercio oriental de la sierra, donde predomina el matorral tipo mediterráneo (mapa 11M) compuesto, principalmente, por una asociación tipo coscojar con lentisco, palmito y enebro. En zonas donde los suelos están poco

evolucionados aparece el romeral compuesto por romero, jara, tojo y matagallo. En zonas donde la degradación es extrema aparecen formaciones de tomillares y espartales. En el mapa 10M, el matorral constituye básicamente dos grupos: uno formado con pastizal en el tercio oriental de la sierra y otro de matorral con pinar en el tercio central de la misma.

Casi un 80% de la superficie de la zona de estudio está dominada por la vegetación natural, principalmente monte bajo, matorral tipo mediterráneo y coníferas de repoblación (figura 9.15).

La actividad humana tiene lugar en un 19% de la superficie, y se trata de urbanizaciones, agricultura y minería (figura 9.15).

Las zonas cultivadas sólo representan el 7% del acuífero, la mayor parte de las cuales están en el sector noroccidental, en el municipio de Alhaurín el Grande. La actividad agrícola se encuentra en una etapa de retroceso con respecto a otras actividades humanas, principalmente la urbanística. El entorno de las localidades de Alhaurín de la Torre, Alhaurín el Grande, Torremolinos son espacios que, tradicionalmente, han estado cultivados por olivar y cítricos, pero la fuerte presión urbanística ha acelerado el cambio de su uso agrícola al residencial, como consecuencia de la influencia del área metropolitana de Málaga y el turismo de la Costa del Sol.

Los procesos urbanísticos están en pleno apogeo y ello motiva que cada vez se estén urbanizando más parcelas en la sierra, como ocurre en las localidades de Arroyo de la Miel y Alhaurín de la Torre. En la actualidad, la urbanización que se está produciendo en el sector septentrional de Arroyo de la Miel (al sur del monte Calamorro) aumentará considerablemente la superficie edificada en el conjunto de la sierra. Las urbanizaciones, al igual que los cultivos, se localizan preferentemente en las zonas de baja pendiente próximas a los límites de la sierra (mapa 10M) pero dada la actual saturación que padece la costa, la oferta inmobiliaria se adentra cada vez más en el interior de la sierra.

Las zonas mineras (canteras de extracción de áridos para la construcción) equivalen al 3'5% y se localizan, principalmente, en los mármoles dolomíticos de la sierra. La explotación minera más importante es la del arroyo del Pinar, al sur de la localidad de Alhaurín de la Torre.

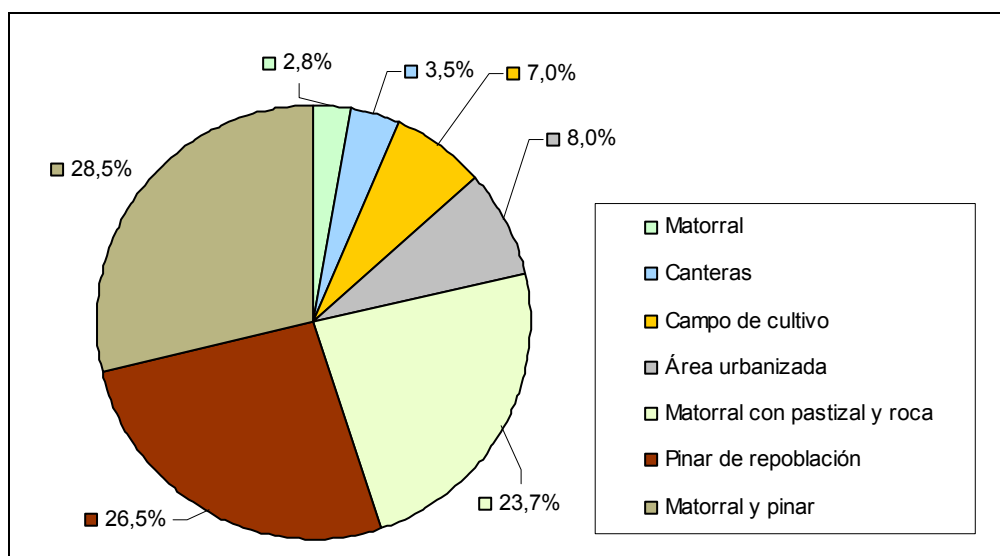
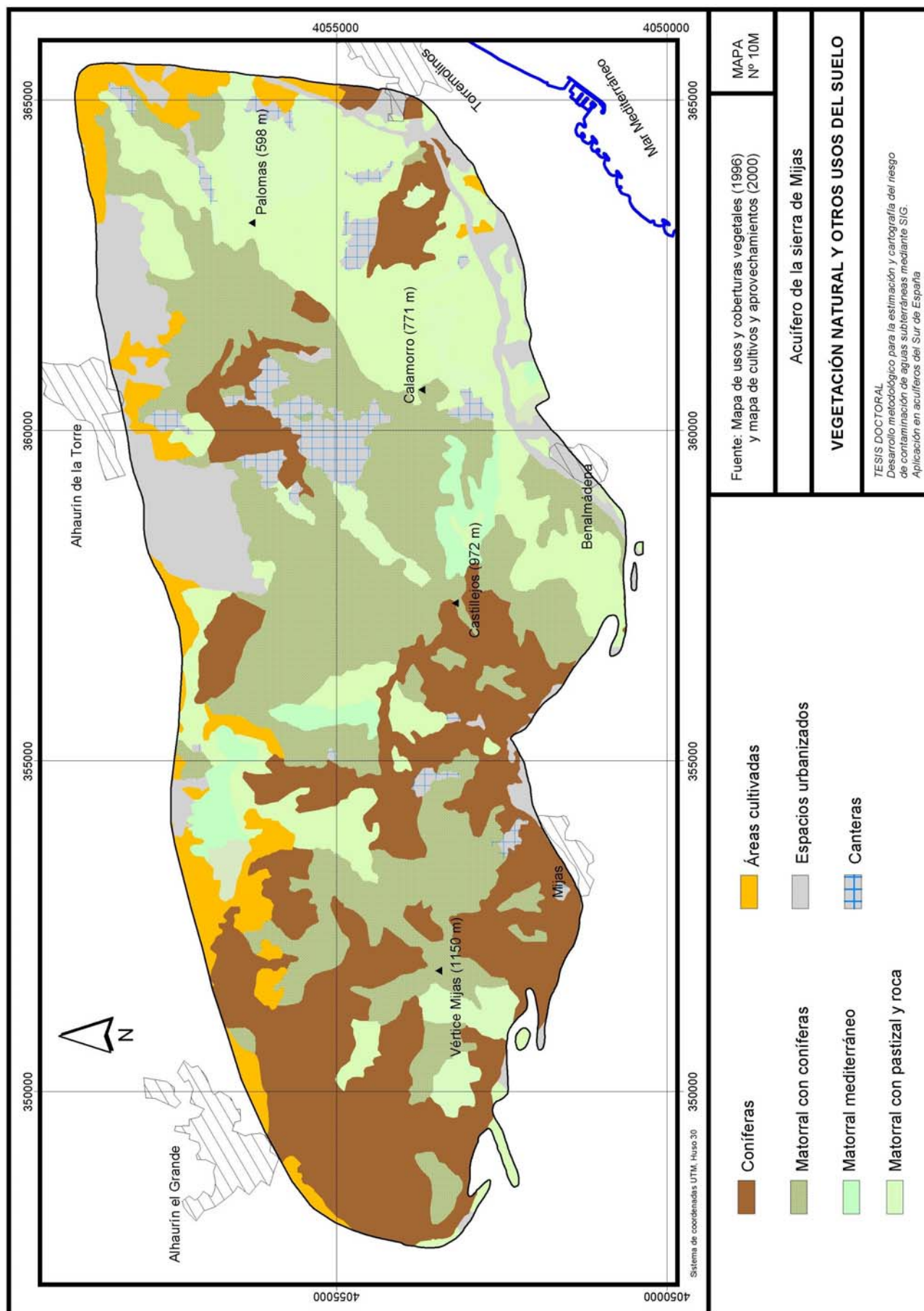


Figura 9.15. Porcentaje de superficie de la sierra de Mijas en función del uso y cobertura vegetal del suelo.



9.1.9. POBLACIÓN

9.1.9.1. POBLACIÓN DE DERECHO

La sierra de Mijas abastece a 130493 habitantes de seis municipios (cuadro 9.13).

Municipio y Núcleo de Población		Habitantes			
		Municipio (INE, 2004)	Núcleo (INE, 2004)	% del total	% del municipio
Alhaurín de la Torre	Alhaurín de la torre	23369	9493	7,3	40,6
	La Alquería y Torre alquería		395	0,3	1,7
	El Alamillo		869	0,7	3,7
	Pinos de Alhaurín		1521	1,2	6,5
	Peñon-Molina		560	0,4	2,4
	Zapata		125	0,1	0,5
	Lagar de las Pitás		188	0,1	0,8
	Mestanza, Piamonte y Las Lomas		109	0,1	0,5
	El Romeral		531	0,4	2,3
	Santa Amalia		298	0,2	1,3
	Los Tomillares norte (sección 7 y 13)		3546	2,7	15,2
Los Tomillares sur (sección 6 y 12)	4180	3,2	17,9		
Alhaurín el Grande	Alhaurín el Grande	17764	14053	10,8	79,1
	Buenavista		57	0,0	0,3
	La Chicara		170	0,1	1,0
	El Cigarral		63	0,0	0,4
	El Zángano		186	0,1	1,0
Benalmádena	Arroyo de la Miel (distrito 2)	34565	20584	15,8	59,6
	Benalmádena Costa (distrito 3)		9252	7,1	26,8
	Benalmádena		2873	2,2	8,3
	La Capellanía		676	0,5	2,0
	Santana		92	0,1	0,3
	Rancho Domingo		51	0,0	0,1
	Serrezuela		212	0,2	0,6
Málaga	Urbanizaciones del camino de la sierra o Cañada de Ceuta ¹	14853 ²	328	0,3	2,2
Mijas	Campo Mijas	46232	4238	3,2	9,2
	Doña Pilar		446	0,3	1,0
	Mijas		3765	2,9	8,1
	Haza del Algarrobo; Lomas de Mijas; Media Legua; Capellanía		849	0,7	1,8
	Peñablanca		270	0,2	0,6
	Las Terrazas		625	0,5	1,4
	Alquería		555	0,4	1,2
	Valtocado		208	0,2	0,4
	El Coto (sección 10)		3897	3,0	8,4
	Osunillas-Espartales (diseminado)		456	0,3	1,0
Torremolinos	Los Álamos (sección 1)	44772	1443	1,1	3,2
	Cerro del Toril (sección 9)		1808	1,4	4,0
	La Colina (sección 23)		1362	1,0	3,0
	El Pinar (sección 24)		853	0,7	1,9
	Torremolinos		39306	30,1	87,8
Total		181555	130493	100,0	71,9

Cuadro 9.13. Población dependiente de los recursos de la sierra de Mijas en el año 2001.

¹urbanizaciones del diseminado de Churriana; ²población del distrito de Churriana.

Los municipios de Alhaurín el Grande y Torremolinos concentran la población dependiente de los recursos de la sierra de Mijas en las cabeceras municipales, mientras que en el resto de municipios tiene mayor peso la población de las distintas urbanizaciones, como el caso de Benalmádena, donde se ha generado un espacio completamente urbanizado en el litoral, al margen de la cabecera municipal.

Los núcleos con mayor demanda de agua son Torremolinos, Arroyo de la Miel, Alhaurín el Grande, Alhaurín de la Torre, Benalmádena Costa y los Tomillares, los cuales equivalen a más del 75% de la demanda total de la sierra. El resto son núcleos de población de menor entidad, que en algunos casos concentran un elevado número de habitantes, como ocurre en la urbanización de Campo Mijas, El Coto (ambas en Mijas), Mijas y Benalmádena, núcleos que aglutinan a más del 10% del total de la población abastecida con aguas subterráneas de la sierra de Mijas. En resumen, una cuarta parte de los núcleos de población dependientes de los recursos de la sierra representan casi el 90% de la demanda de recursos del acuífero.

La estructura por edad del conjunto de la población dependiente de la sierra de Mijas se encuentra en un proceso de envejecimiento (figura 9.16). La pirámide de población tiene forma de bulbo representativa de una población creciente hasta un determinado momento, en este caso la década de los setenta, y una tendencia decreciente a partir de ese punto. Desde la década de los años setenta hay un descenso en el crecimiento de la población frenado a finales de la década de los noventa. El mayor porcentaje de población de menos de cuatro años respecto al grupo de 5-9 induce a pensar en un cambio en la dinámica demográfica de los habitantes de la sierra de Mijas si se mantiene en los siguientes años.

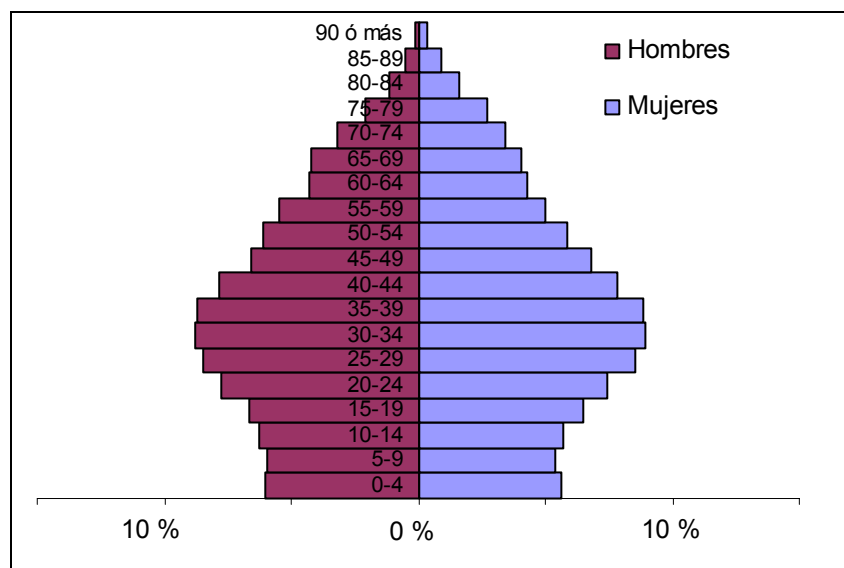


Figura 9.16. Pirámide de la población dependiente de los recursos del acuífero de la sierra de Mijas para el año 2001.

Otros rasgos identificativos son: la regularidad en el crecimiento o decrecimiento de los grupos de edad, de forma que no se aprecian cambios bruscos en la dinámica demográfica, y la juventud asociada al conjunto de la población, como se deduce de la mayor concentración de efectivos entre los grupos de edad de 25 a 40 años (figura 9.16).

Un análisis detallado de la estructura por edad de los núcleos con mayor población en la sierra de Mijas (por encima de 2500 hab, cuadro 9.13) muestra variaciones respecto de la tendencia general apuntada anteriormente, pero que en ningún caso representan un modelo demográfico diferente (figura 9.17).

La población de Torremolinos es la que tiene una estructura por edad más coincidente con la estructura general de la sierra en todos los aspectos señalados, al igual que la población de Arroyo de la Miel y Benalmádena Costa (figura 9.17), aunque en este último caso se observa un cambio en la tendencia demográfica con anterioridad al resto de poblaciones.

Benalmádena es una localidad donde la población está en proceso de envejecimiento desde los años setenta, una pauta solo interrumpida en la segunda mitad de los ochenta.

La población de Alhaurín de la Torre mantiene la pauta demográfica comentada para el conjunto de la sierra, pero se diferencia en el mayor grado de juventud de su población. La pirámide de población del sector norte de los Tomillares (urbanizaciones de la Capellanía y aledañas) muestra un fuerte incremento de población entre el grupo de edad de 35 y 55 años, como consecuencia de la urbanización de todo este sector entre los años setenta y ochenta. En cambio, el sector sur de los Tomillares (correspondiente a las urbanizaciones de El Lagar, Cortijos del Sol, Los Manantiales) tiene su población más envejecida, lo cual se manifiesta en el elevado peso que tienen los grupos de edad entre 40 y 55 años. Un dato significativo en la tendencia demográfica del sector norte de los Tomillares es el incremento de población en los últimos años como consecuencia, en cierta medida, del cambio de residencia de la población de Málaga hacia ciudades de la periferia, donde los precios de la vivienda son inferiores y la calidad de vida mejor en cuanto a menor densidad urbana y mayor superficie de zonas verdes.

Alhaurín el Grande es una localidad donde hay un fuerte peso de la población mayor de 55 años y con un ritmo de crecimiento estancado desde los años setenta. Alhaurín el Grande es una ciudad donde la población a migrado hacia la ciudad de Málaga, debido al receso de la producción agrícola como principal motor de la economía del municipio y el relativo crecimiento económico de Málaga respecto de ésta localidad.

La localidad de Mijas muestra una pirámide de población que tiende al envejecimiento y que muestra una cierta entalladura en los grupos de edad entre 45 y 55 años, posiblemente como consecuencia de la dura situación vivida en este municipio durante la posguerra civil, motivo por el cual muchas personas se vieron obligadas a emigrar. Las pirámides de población de Campo Mijas y El Coto (urbanizaciones al sur de Mijas) muestran tendencias muy similares, debido en cierta medida, a la proximidad geográfica de ambos núcleos de población. En ambos casos se observa una tendencia opuesta al resto de entidades de población, es decir, hay un incremento de población desde la década de los años ochenta quebrado a finales de los noventa, momento en el cual se produce un decremento. Este hecho podría asociarse, al igual que en el caso del sector norte de los Tomillares, a procesos de urbanización de nuevos espacios que atraen a población joven con una mayor tasa de fecundidad. También destaca el fuerte peso de la población adulta entre 30 y 45 años que sobresale del resto de grupos de edad.

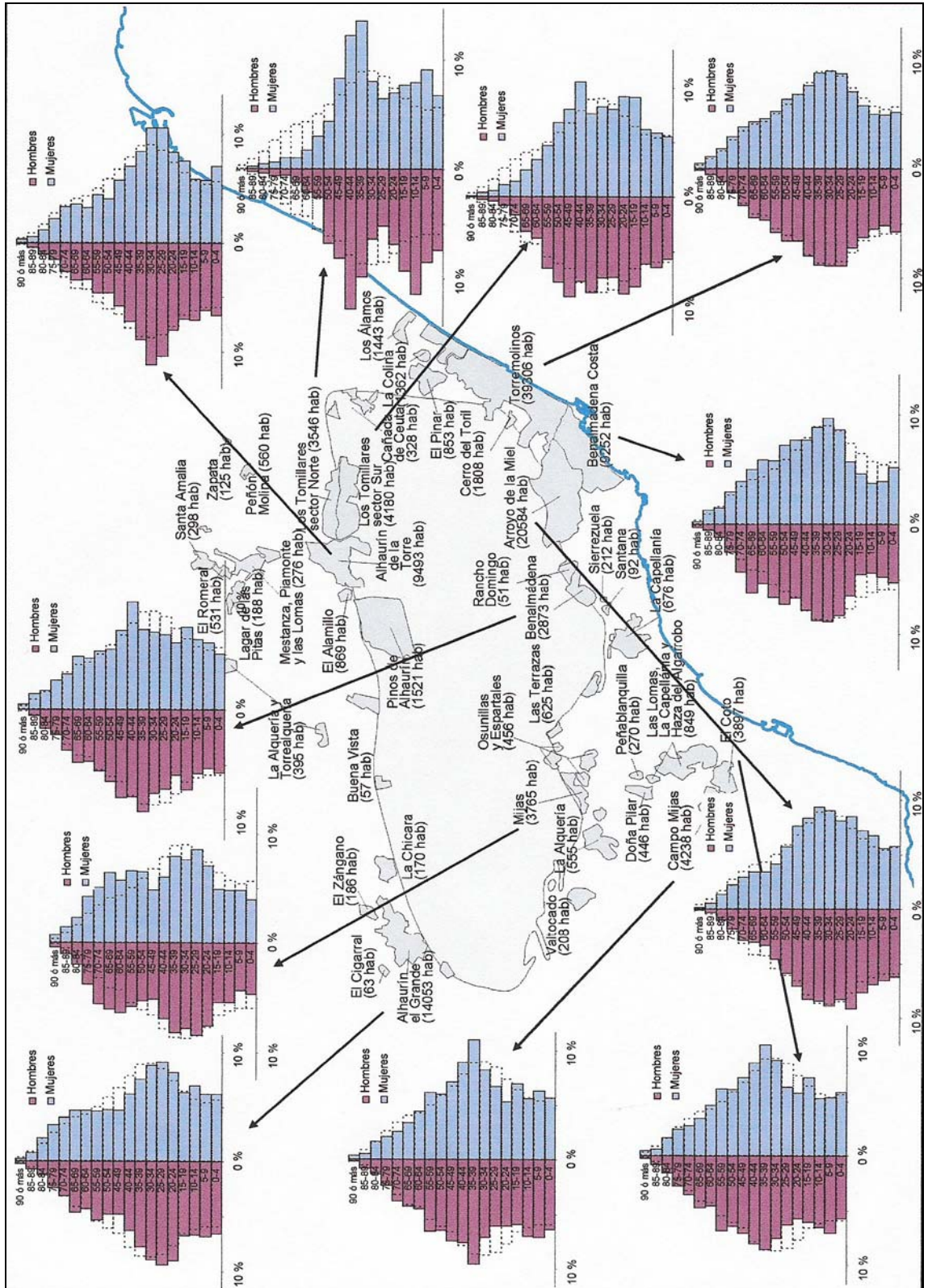


Figura 9.17. Pirámides de población de los núcleos más importantes de la sierra de Mijas.

9.1.9.2. POBLACIÓN OCUPADA

La población activa de la sierra de Mijas está ocupada, principalmente, en el sector servicios y, en menor medida, en el sector secundario (77 y 21% respectivamente), mientras que la agricultura representa a una pequeña parte de la población ocupada. El sector secundario tiene un importante peso debido a la construcción y constituye el tercer subsector más importante de la economía de la zona por detrás de la hostelería y el comercio. Estos tres subsectores económicos dan empleo a la mitad de la población ocupada (figura 9.18).

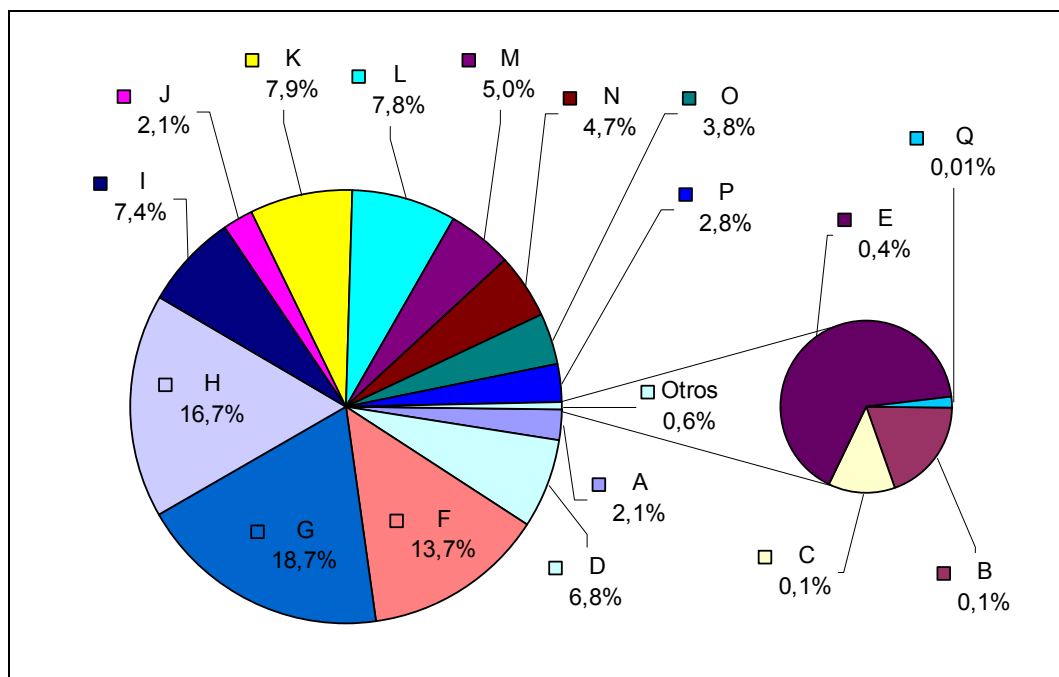


Figura 9.18. Porcentaje de población ocupada en los sectores productivos de los núcleos relacionados con la sierra de Mijas en el año 2001. Leyenda: A - Agricultura, ganadería, caza y silvicultura; B - Pesca; C - Industrias extractivas; D - Industria manufacturera; E - Producción y distribución de energía eléctrica, gas y agua; F - Construcción; G - Comercio; reparación de vehículos y aparatos de uso doméstico; H - Hostelería; I - Transporte, almacenamiento y comunicaciones; J - Intermediación financiera; K - Actividades inmobiliarias y de alquiler; servicios empresariales; L - Administración pública, defensa y seguridad social obligatoria; M - Educación; N - Actividades sanitarias y veterinarias; asistencia social; O - Otras actividades sociales y servicios personales, P - Actividades de los hogares y Q - Organismos extraterritoriales.

Hay otros cinco subsectores (actividad inmobiliaria, la administración pública, el transporte, la industria manufacturera y la educación) que tienen un importante peso en la actividad productiva de la sierra de Mijas y que en conjunto suman el 35% de la población ocupada.

El resto de actividades económicas según la Clasificación Nacional de Actividades Económicas (CNAE) tienen poca importancia en el computo global, aunque se podría destacar las actividades relacionadas con la sanidad, los servicios sociales y domésticos por emplear entre las tres a una décima parte de la población ocupada. La agricultura y las finanzas son, prácticamente, los sectores que emplean al resto de la población puesto que la pesca, industria extractiva, producción de energía y personas ocupadas en organismos extraterritoriales suman un total de 296 personas, es decir, un 0,6%.

El elevado peso de los tres subsectores más importantes es consecuencia del principal recurso económico de la comarca: el turismo. El turismo repercute directamente en los sectores del comercio y la hostelería, mientras que sobre la construcción redonda indirectamente en la medida que las pautas económicas que rigen en la comarca están basadas en la expansión y el crecimiento como estrategia de desarrollo económico. La expansión urbanística ha provocado que el subsector relacionado con la actividad inmobiliaria adquiera un importante protagonismo en la economía de la zona, de manera que se sitúa como la cuarta fuerza productiva por encima de otras, como la administración pública.

A mayor escala, se aprecian diferencias en el comportamiento observado para toda la población de la sierra de Mijas (figura 9.19). De forma genérica, se puede observar que las localidades del interior, es decir, las pertenecientes a los municipios de Alhaurín el Grande y Alhaurín de la Torre, tienen una menor importancia del subsector hostelería en comparación con los núcleos de la costa donde el turismo es el principal recurso económico.

En los siete núcleos del sur de la sierra de Mijas se observa un patrón similar en cuanto a los principales sectores económicos descritos al inicio de este epígrafe (construcción, comercio y hostelería), que emplean a la mitad de la población ocupada, aproximadamente. El comercio y la construcción son actividades que no están relacionadas en un 100% con el turismo, pero el subsector de la hostelería sí que responde a esa casuística y tiene su repercusión en los núcleos de Arroyo de la Miel, Benalmádena Costa y Torremolinos, donde se emplea entre 20 y un 25% de la población ocupada.

La actividad inmobiliaria tiene mayor repercusión en los núcleos de Mijas, concretamente la zona de Campo Mijas y El Coto donde se obtienen porcentajes por encima del 10% de la población ocupada, los más elevados de toda la sierra de Mijas.

En el caso de Alhaurín el Grande destaca el elevado porcentaje dedicado a la construcción y a la industria manufacturera, subsectores que absorben a casi la mitad de la población ocupada. En Alhaurín de la Torre estos dos subsectores económicos y la administración pública aglutinan a casi la mitad de la población ocupada.

Los núcleos urbanos situados al norte de la sierra de Mijas son los que presentan un mayor porcentaje de población empleada en el subsector de la industria manufacturera. En el caso de los Tomillares (sectores norte y sur) destaca el elevado número de personas ocupadas en la educación, de forma que es el núcleo urbano donde residen más habitantes de toda la sierra de Mijas empleados en esta actividad económica.

El sector de la administración pública presenta un mayor número de ocupados, en esta actividad, en todas las cabeceras municipales: Mijas, Benalmádena, Alhaurín de la Torre y, en menor medida, Torremolinos. Alhaurín el Grande es la única cabecera municipal que tiene menos población ocupada en la administración pública con respecto a otras zonas urbanizadas, como por ejemplo los Tomillares.

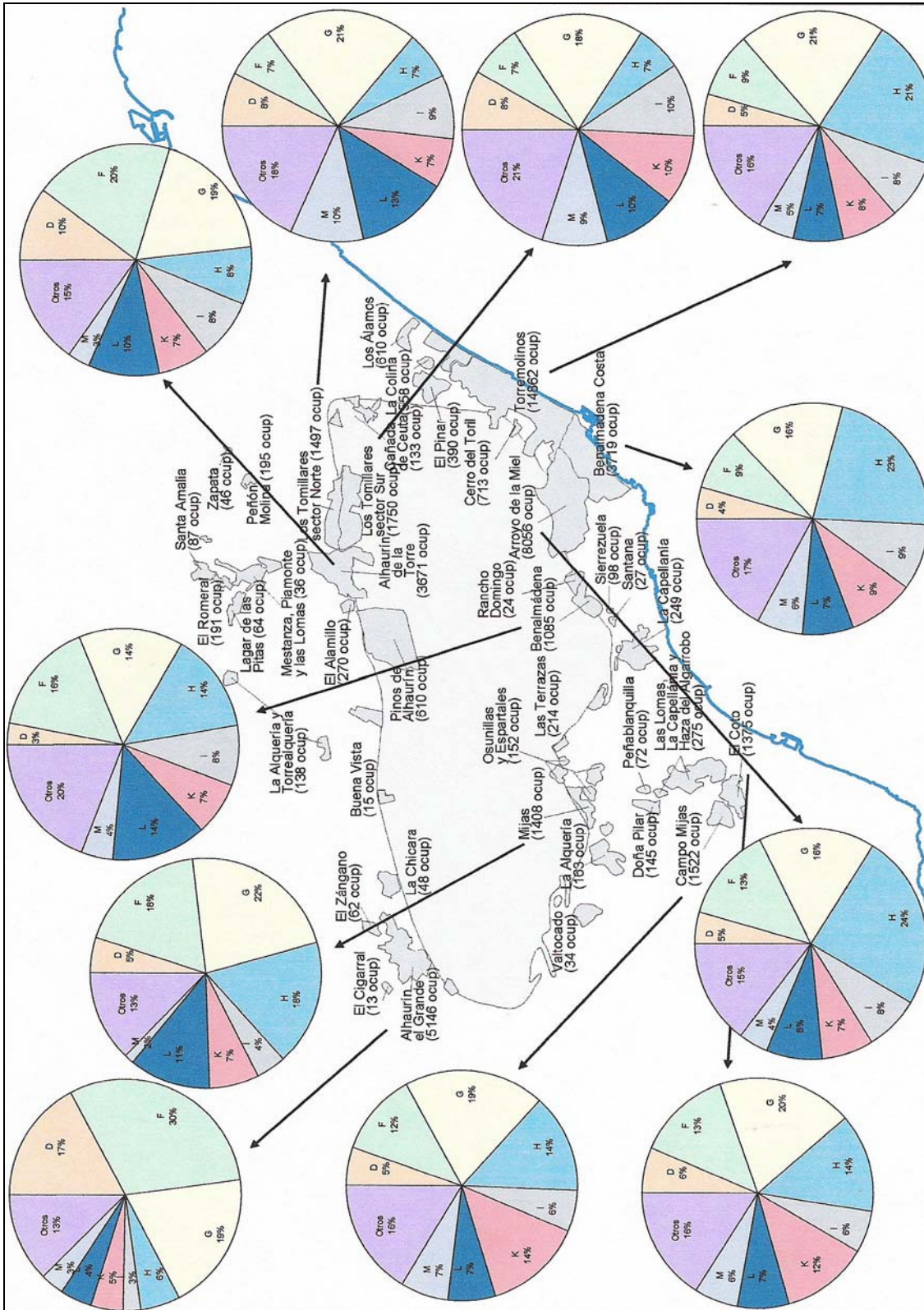


Figura 9.19. Distribución porcentual de la población ocupada en los principales sectores económicos de los núcleos más importantes de la sierra de Mijas en el año 2001. Manufactura (D), Construcción (F), Comercio (G), Hostelería (H), Transporte (I), Actividad Inmobiliaria (K), Administración Pública (L) y Educación (M).

9.1.10. ACTIVIDAD AGRÍCOLA

9.1.10.1. CARACTERÍSTICA GENERALES

En la sierra de Mijas, la agricultura de regadío ha sido y es poco importante en el conjunto de la comarca y de la provincia. Los cultivos han sido tradicionalmente de secanos, porque se adaptan mejor a las características del terreno, mientras que los cultivos de regadío han ocupado las tierras más fértiles de la vega del río Guadalhorce, terrenos con mayor aptitud agronómica.

El regadío en la zona de estudio está directamente asociado a los manantiales de la vertiente Norte de la sierra de Mijas, en los municipios de Alhaurín el Grande y Alhaurín de la Torre. El aprovechamiento del agua de los manantiales se organiza a partir de las comunidades de regantes. En el municipio de Alhaurín el Grande, las comunidades de regantes más importantes son las de San Antón, Urique y Montánchez y, en Alhaurín de la Torre, las comunidades de Fuentegrande y el Montañés (PYCSA, 1994).

La comarca del Guadalhorce es una de las más productivas de la provincia de Málaga, rasgo que repercute en una menor dependencia de las subvenciones de la Unión Europea en las explotaciones agrícolas (Larrubia, 1998). Las explotaciones se caracterizan por una tener una superficie reducida, de manera que tres cuartas parte de las explotaciones de la comarca tienen menos de 5 ha y el tamaño medio es de 1,6 ha/explotación (Larrubia, 1998). El minifundismo se manifiesta, en mayor medida, en las explotaciones de regadío, no solo por el reducido tamaño de las mismas, sino por la fragmentación en parcelas, de manera que la ratio de la comarca se sitúa en dos parcelas por explotación para las menores de 5 ha.

Las explotaciones de la comarca se caracterizan por una extrema fragmentación de la tierra, en régimen de propiedad, cuya actividad agrícola se lleva a cabo mediante la actividad familiar, en detrimento de los jornales asalariados (Larrubia, 1998). La actividad agrícola es la principal actividad económica de los propietarios, circunstancia por la cual la conversión hacia sistemas y técnicas productivas de mayor rentabilidad constituye, en principio, un complemento, lo que ralentiza la transformación del espacio agrario de la comarca. Las nuevas orientaciones productivas están encaminadas hacia la puesta en cultivo de aguacates, dentro de los productos subtropicales, la variedad de naranja Clementina de Nules dentro de los cítricos y la alcachofa en el grupo de los productos hortícolas.

9.1.10.2. DISTRIBUCIÓN Y TIPOS DE CULTIVOS

En la sierra de Mijas se cultivan, mayoritariamente, cítricos, productos hortícolas y frutales (figura 9.20). Según la situación de la explotación agrícola predomina un tipo de cultivo u otro; así, en el municipio de Alhaurín de la Torre, se cultivan mayoritariamente frutales, mientras que en Alhaurín el Grande cítricos y, en menor medida, productos hortícolas. Estos cultivos son representativos no solo de la zona de estudio, sino también del conjunto de la comarca del Guadalhorce (Larrubia, 1998). La mitad de la superficie cultivada en la sierra de Mijas está dedicada a cítricos y una cuarta parte a frutal. El resto queda repartido en parcelas para productos hortícolas, viñedos e invernaderos (figura 9.20).

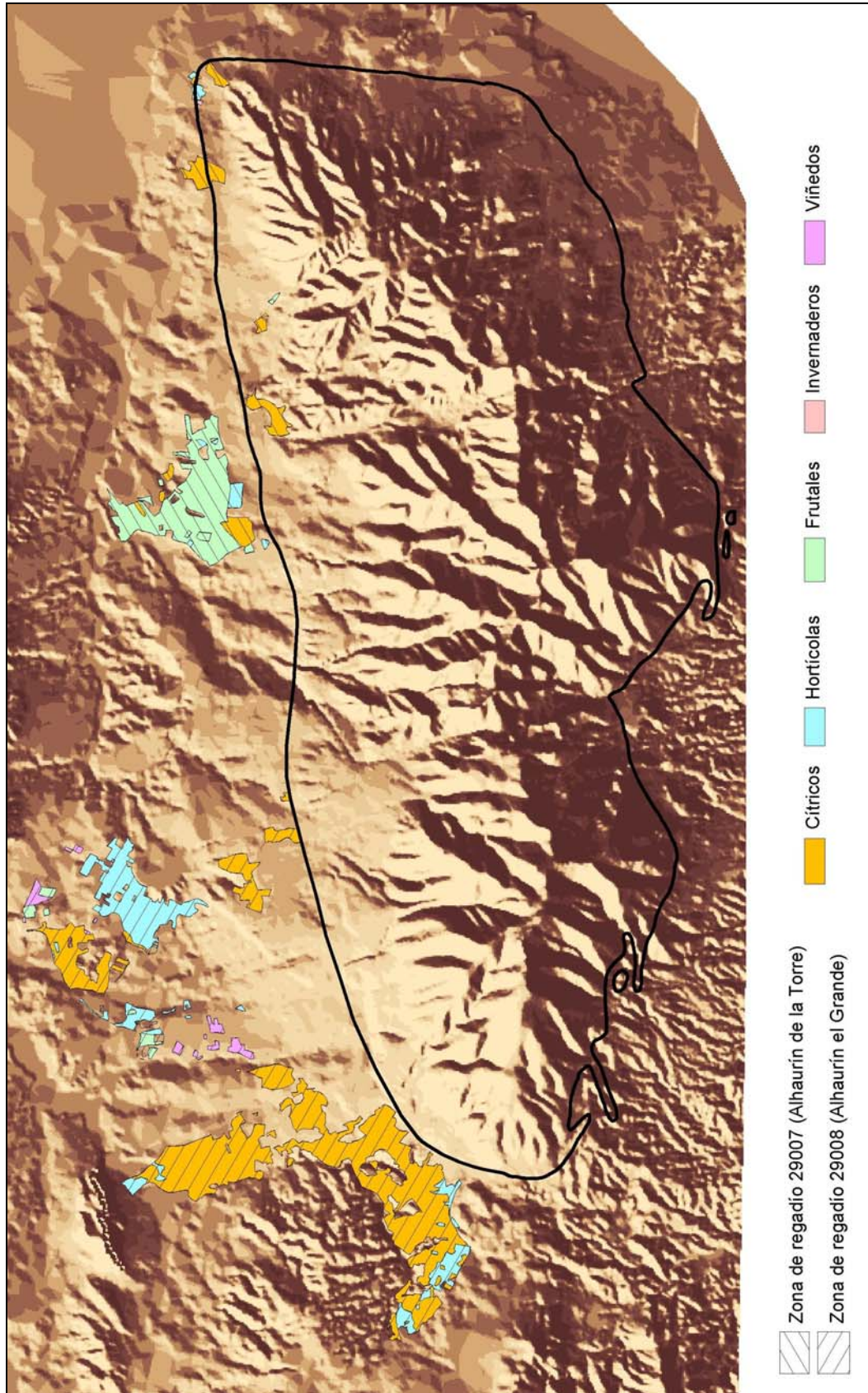


Figura 9.20. Distribución de los cultivos regados con recursos de la sierra de Mijas.

Los cítricos que en mayor medida se cultivan son naranjos y mandarinos. Los frutales son muy diversos aunque predominan perales, nísperos, ciruelos y melocotones. Entre los productos hortícolas tiene especial incidencia el cultivo de la alcachofa, que en los últimos años ha adquirido una mayor expansión en las áreas periurbanas (Larrubia, 1998).

La principal salida de los productos cultivados en la sierra de Mijas son los mercados locales. Las zonas agrícolas de mayor productividad son las de Alhaurín de la Torre, donde se cultivan frutales y cítricos (DAP, 1997). En cambio, la rentabilidad de las explotaciones de Alhaurín el Grande es menor (cuadro 9.14).

Municipio	Alhaurín el Grande		Alhaurín de la Torre	
Zona de riego	2900802	2900803	2900702	2900704
Nº explotaciones	397	505	150	88
Jornales/ha	86	86	83	90
rentabilidad (pts/ha)	491260	553737	619756	630857
Necesidades hídricas (m³/ha)	4836	4833	4745	5427
Tipo de riego	localizado y gravedad		gravedad	
Origen del agua	subterránea	superficial y subterránea	subterránea	

Cuadro 9.14. Características de las zonas de riego relacionadas con la sierra de Mijas (DAP, 1997).

9.1.11. HOSTELERÍA Y OTRAS ACTIVIDADES PRODUCTIVAS

El sector de la hostelería en los municipios de Torremolinos, Benalmádena, Mijas, Alhaurín de la Torre y Alhaurín el Grande tiene una importante repercusión en la economía de la comarca y de la provincia, lo que se manifiesta en un elevado número de establecimientos dedicados a esta actividad económica, en total 2093.

El municipio que tiene un mayor número de establecimientos respecto al conjunto de la sierra de Mijas es Torremolinos (figura 9.21), un municipio netamente turístico que basa su economía en este sector. Más de la mitad de los establecimientos dedicados a la hostelería se localizan en este municipio y, en contraposición, los dos municipios del interior, es decir, Alhaurín de la Torre y Alhaurín el Grande tienen solo el 2% de la oferta hostelera. Los municipios del litoral son los que aglutinan una mayor cantidad de establecimientos hosteleros.

Los restaurantes y, sobre todo, los apartamentos son los tipos de establecimientos más presentes en los municipios analizados, más del 90% del total se corresponde con una de estas dos categorías, que en el caso de los apartamentos varía entre un 60 y 80% del conjunto de establecimientos hosteleros (figura 9.21). El elevado número de apartamentos tiene su origen en la década de los setenta, momento en el que el turismo de masa acentúa la construcción de este tipo de alojamiento (Galacho, 1996).

El número de hoteles en los municipios analizados es muy elevado, en total 77 y se concentran, principalmente, en el municipio de Torremolinos, mientras que en Alhaurín de la Torre no hay ninguno. El elevado número de hoteles en los municipios costeros, tiene su explicación en la tradición turística de la Costa del Sol, una zona que se convierte en centro turístico a partir la segunda mitad del siglo XX, con motivo del turismo de lujo que se implantó inicialmente.

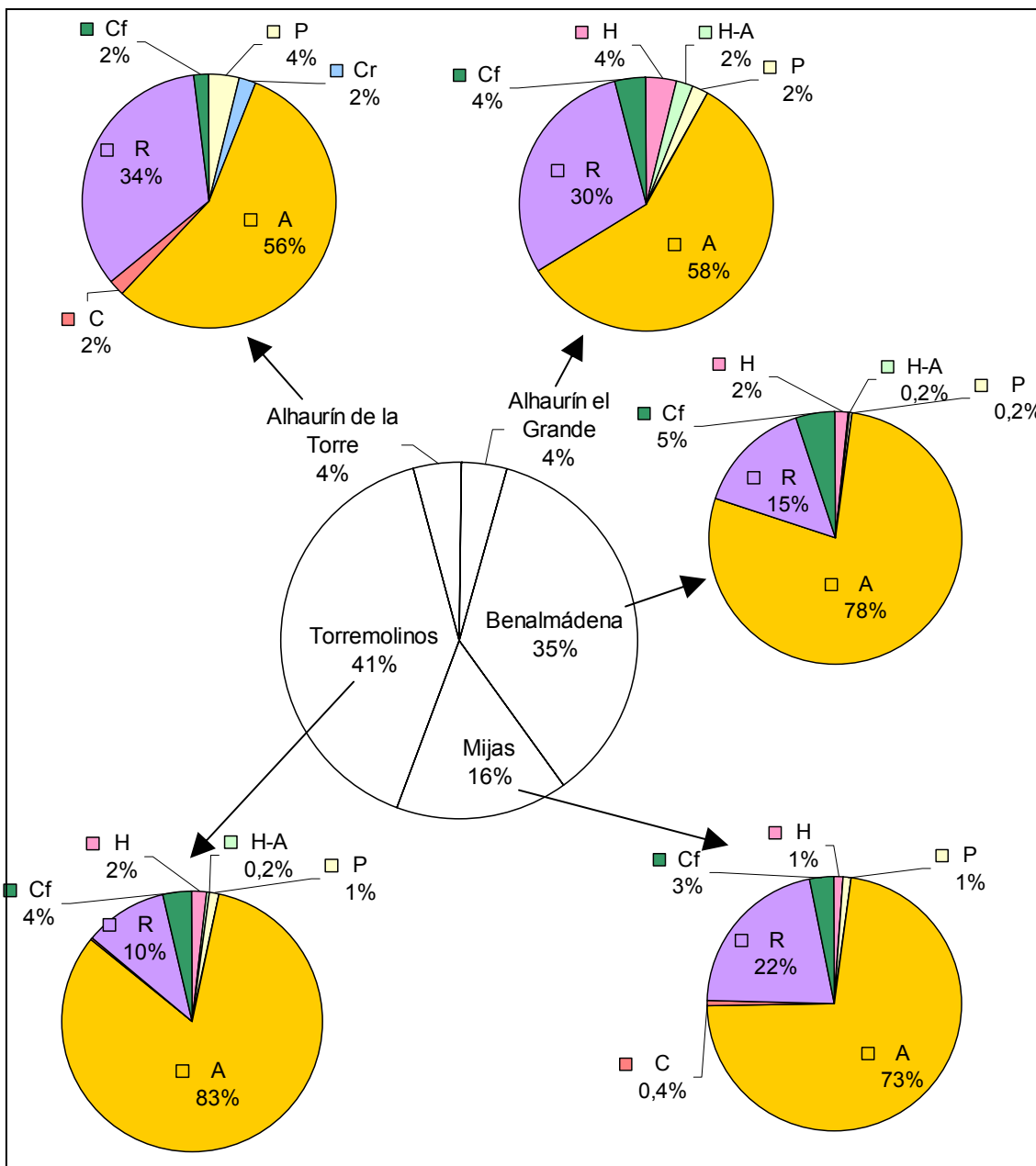


Figura 9.21. Distribución porcentual de los establecimientos hosteleros según municipios y tipo de establecimiento. Leyenda: H = hotel, H-A = Aparta-hotel, A = Apartamento, P = pensión, C = camping, Cr = casa rural, R = restaurante y Cf = cafetería.

Otras actividades productivas dependientes de las aguas subterráneas de la sierra de Mijas son: una empresa embotelladora de agua en el municipio de Mijas, dos campos de golf en los municipios de Alhaurín el Grande y Alhaurín de la Torre y un parque acuático en Torremolinos.

La empresa de Agua de Mijas S.A es una pequeña sociedad mercantil que tiene menos de 10 trabajadores. La distribución que se realiza del producto final está orientada, principalmente, a los mercados provinciales y, en menor medida, a Granada, Sevilla y Algeciras (Cádiz).

Los campos de golf Alhaurín Golf, en Alhaurín el Grande, y Laurogolf, en Alhaurín de la Torre, son dos campos generados al amparo del desarrollo turístico de golf de la Costa del Sol, área que aglutina la mayor parte de este sector en Andalucía. Laurogolf es un campo creado en 1992, pequeño en cuanto a número de empleados e ingresos generados. En él trabajan 15 empleados (mantenimiento) y genera al año unos gastos aproximados de 450000€ (Escorza, 2001), cifra que si se establece como el volumen mínimo de ingresos o beneficios está muy por debajo de otros campos de la Costa del Sol. Se trata de un campo que se amplió en el año 2003 a 27 hoyos (18 en origen) y que tiene vinculado un complejo residencial, hotel incluido. Para el campo Alhaurín Golf no se han podido recopilar datos acerca del número de empleados e ingresos o gastos económicos, pero se ha estimado un número aproximado de 15 empleados, porque es el valor medio para los campos de golf de la Costa del Sol (Escorza, 2001). Este campo tiene asociado un importante complejo residencial que incluye un hotel. Ambos campos de golf se abastecen a partir de sondeos propios que captan agua de la sierra de Mijas.

Por último, el parque acuático Aquapark es una empresa que tiene contratados un número variable de trabajadores entre 60 y 80, según la época del año: temporada baja (Junio y Septiembre) o temporada alta (Julio y Agosto). En cuanto al tipo abastecimiento, hay datos contradictorios según la entrevista realizada al personal de la empresa de aguas de Torremolinos y del parque acuático, de manera que, según la empresa de aguas, el parque de atracciones acuático se abastece de la sierra de Mijas, mientras que el personal de la empresa afirma que se utiliza el agua procedente de la presa de la Concepción en Istán y que el agua de la sierra de Mijas sólo cumpliría la función de alternativa junto con otras medidas de abastecimiento como el empleo de camiones cuba.

9.2. EVALUACIÓN Y CARTOGRAFÍA DE LOS PELIGROS DE CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA SIERRA DE MIJAS

9.2.1. INVENTARIO DE PELIGROS DE CONTAMINACIÓN

Para la detección y catalogación de los peligros de contaminación presentes en el área de estudio se ha tomado como base la relación de peligros recogida por De Keteleare *et al.* (2004). En la sierra de Mijas se han detectado 21 tipos relacionados con procesos urbanísticos, industriales y agropecuarios (cuadro 9.15). Los diferentes tipos de peligros localizados en el trabajo de campo han sido cartografiados utilizando como base cartográfica el Mapa Topográfico de Andalucía a escala 1/10.000, la ortofoto color a escala 1/10.000, el mapa de usos y coberturas vegetales de Andalucía a escala 1/50.000 y el mapa de cultivos y aprovechamientos de Andalucía a escala 1/50.000.

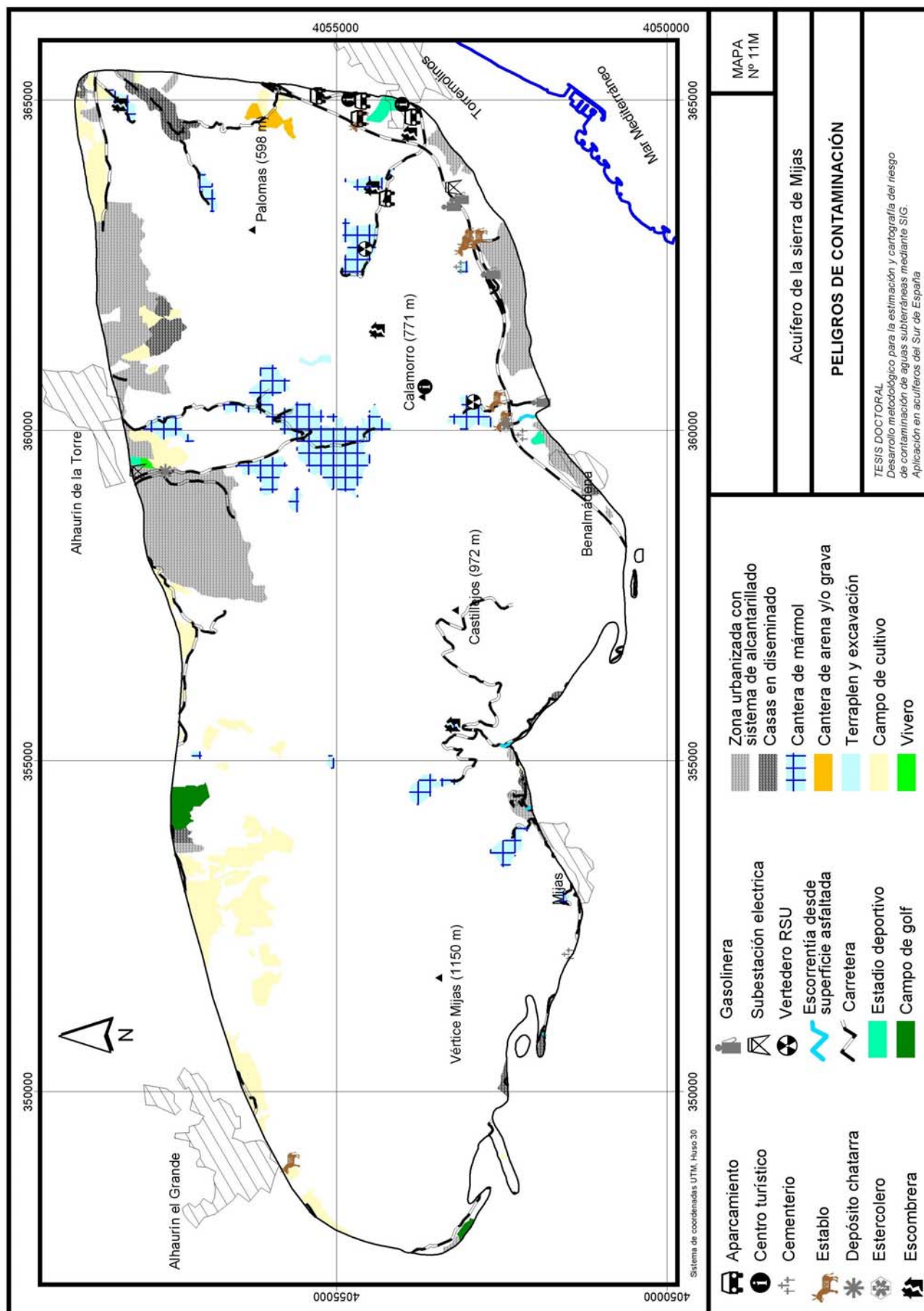
	Tipos de peligros	Entidad cartográfica
INFRAESTRUCTURAS URBANAS	Urbanizaciones con sistema de alcantarillado	Polígono
	Casas sin alcantarillado	Polígono
	Carreteras	Línea
	Gasolineras	Punto
	Vertedero de residuos sólidos urbanos	Punto
	Escorrentía desde superficie asfaltada	Línea
	Depósito de chatarra	Punto
	Depósito de escombros	Punto
	Aparcamiento-depósito de vehículos	Punto
	Centro turístico	Punto
	Campo de golf	Polígono
	Cementerio	Punto
	Estación de transformación	Punto
Estadios deportivos	Punto	
ACTIVIDADES INDUSTRIALES	Canteras de gravas y arenas	Polígono
	Canteras	Polígono
	Excavación y terraplenes	Polígono
GANADERÍA Y AGRICULTURA	Viveros	Punto
	Campos agrícolas	Polígono
	Establos	Punto
	Depósitos de excrementos	Punto

Cuadro 9.15. Peligros potenciales de contaminación localizados en la sierra de Mijas.

Del total de peligros localizados, más de dos tercios están ligados a infraestructuras urbanas o de desarrollo. El resto lo forman actividades ligadas a los sectores económicos primario y secundario.

En el mapa 11M aparecen localizados las distintas fuentes potenciales de contaminación que se corresponden con los tipos de peligros del cuadro 9.15.

La expresión cartográfica de los peligros de contaminación se ha llevado a cabo mediante distintas formas de representación para una mejor visualización: polígonos, líneas y puntos.



Las urbanizaciones, estadios deportivos, campos de golf, canteras y campos agrícolas son los principales peligros que se han representado como polígonos. El resto de actividades no tienen una entidad espacial suficiente para ser representadas según la superficie que ocupan y se muestran en el mapa como elementos puntuales o lineales, caso de las gasolineras y de las carreteras, respectivamente. Esto no significa, evidentemente, que tengan menos peligro que las entidades representadas como polígonos; las gasolineras, por ejemplo, constituyen uno de los mayores peligros de contaminación, aunque se representan con un punto. A continuación se describe, brevemente, la distribución espacial de los peligros de contaminación de la sierra de Mijas.

Las actuaciones humanas que mayor proliferación alcanzan en el acuífero son las urbanizaciones residenciales y, en menor medida, áreas agrícolas y canteras. Existen múltiples zonas urbanizadas que bordean al acuífero, tanto por el Norte como por el Este y el Sur (Foto 9.1). Las mayores concentraciones se localizan en los municipios de Alhaurín de la Torre (Pinos de Alhaurín, Los Tomillares), Benalmádena (Arroyo de la Miel, Rancho Domingo, Benalmádena pueblo) y Mijas (Las Terrazas, Buenavista, Huerta Alta). También se han localizado urbanizaciones en el municipio de Torremolinos como en el área del Cerro del Toril. Por último, en el sector nororiental del acuífero existen urbanizaciones dispersas junto con espacios dedicados a usos ganaderos y agrícolas.



Foto 9.1. Urbanizaciones residenciales en los municipios de Alhaurín de la Torre (A), Málaga (B), Benalmádena (C) y Mijas (D).

Hay varias carreteras que bordean al acuífero: al Este y Sureste la Autovía del Mediterráneo (A7); al Norte la autonómica 344; al Sur la autovía A7 y las autonómicas 387 y 368. Hacia el interior de la sierra, son de especial importancia las carreteras de acceso a las canteras,

principalmente, hacia las canteras de Alhaurín de la Torre y, también, las de acceso a las canteras de Torremolinos, Mijas y Churriana. Otra carretera en el interior de la sierra es la que accede al repetidor de Mijas en la cima de los Castillejos.

Las carreteras son consideradas como peligros siempre que no tengan canales de desagüe que drenen el agua fuera del acuífero. Todas las carreteras han sido incluidas como peligros de contaminación puesto que en el caso de carreteras con canales de desagüe estos no incluyen todos los márgenes como se puede observar abajo en las fotos 9.2.



Foto 9.2. Vista de la carretera autonómica 344 en el tramo conocido como los “caracolillos” (A), carretera autonómica 387 entre Mijas y Alhaurín el Grande (B), autovía A7 a la altura del Palacio de Congresos de Torremolinos (C) y detalle de un lateral de la A7 sin canal de desagüe (D).

Respecto a zonas con escorrentía de agua de lluvia desde superficie asfaltada, éstas han sido localizadas en puntos próximos a las localidades de Mijas y Benalmádena. En unos casos, la escorrentía fluye libremente hacia los cauces y, en otros, está condicionada por la canalización de los caminos de acceso a las urbanizaciones, los cuales recogen el agua de lluvia y son desviados hacia laderas que vierten a los cauces cercanos.

En el área de estudio hay un total de 4 gasolineras. Todas ellas están localizadas en el borde Sur de la sierra, donde las carreteras tienen más tráfico rodado y es mayor el desarrollo urbanístico (foto 9.3).



Foto 9.3. Gasolinera en la autovía A7 en Torremolinos (izquierda) y en el acceso a la autovía A7 en el Arroyo de la Miel (derecha).

En cuanto a los vertederos de residuos sólidos urbanos hay dos, ambos en el sureste de la zona de estudio, pertenecientes a los municipios de Benalmádena y Torremolinos (foto 9.4). En la actualidad, el vertedero de Benalmádena está sellado y controlado. Los residuos vertidos se trasladan a diario a una planta de tratamiento fuera de la zona de estudio, pero el riesgo de contaminación por lixiviados sigue latente.

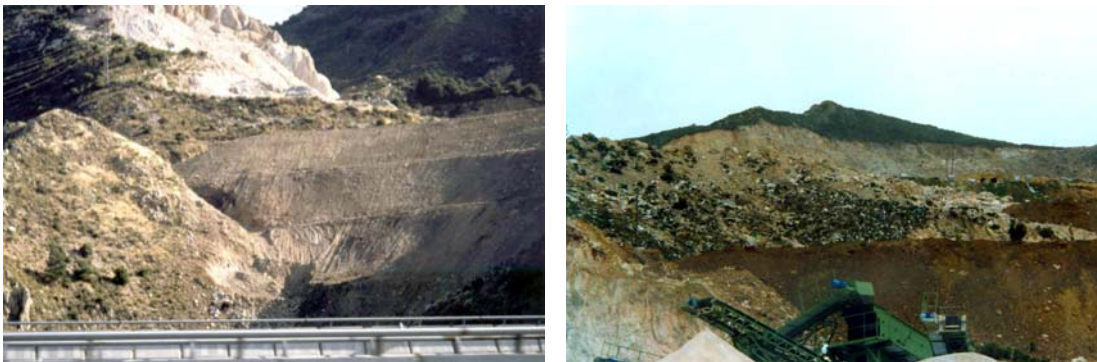


Foto 9.4. Detalle de los vertederos de residuos sólidos urbanos de Benalmádena (izquierda) y Torremolinos (abajo año 2003).

En lo que respecta a los depósitos de chatarra se ha localizado un punto de reciente creación en el acceso a la cantera de Alhaurín de la Torre donde se acumulan materiales metálicos.

Para cartografiar los depósitos de escombros se han tenido en cuenta aquellos que por su magnitud tienen cierta entidad espacial. Por esta razón no se han cartografiado aquellos depósitos aislados procedentes del vertido ilegal de algún camión. En total se han localizado cuatro escombreras, una a mitad de la pista de acceso a la cima del Calamorro y las otras tres en canteras abandonadas, dos de Torremolinos y una de Málaga (foto 9.5). El caso más llamativo es el de la imagen de la izquierda en la foto 9.5 donde la acumulación de escombros alcanza una superficie de casi cuatro hectáreas.



Foto 9.5. Escombrera en una cantera abandonada en el camino del vertedero de Torremolinos (izquierda) y en una cantera del extremo nororiental de la sierra (derecha).

Dentro del apartado de áreas de aparcamiento se han considerado los depósitos municipales de vehículos, como es el caso concreto del de Torremolinos (foto 9.6) y la zona de aparcamiento de los camiones de la empresa de recogida de basuras de Torremolinos. Como un caso particular de área de aparcamiento, se ha incluido el pinar de Torremolinos que aglutina una gran cantidad de personas en momentos puntuales y, de forma regular, los fines de semana al configurarse esta área como lugar de recreo y esparcimiento de la población.



Foto 9.6. Depósito de vehículos en el acceso al vertedero de Torremolinos (izquierda) y depósito de vehículos junto a los manantiales de Torremolinos (derecha).

Se ha catalogado como centro turístico el recinto ferial en Torremolinos, el área recreativa del pinar de Torremolinos y el centro de visitantes en la cima del monte Calamorro.

En cuanto a campos de golf existe uno en el término municipal de Alhaurín de la Torre (foto 9.7). Se trata de una ampliación del campo existente fuera de los límites del área de estudio.

En el borde sur de la sierra de Mijas se han localizado tres cementerios: dos pertenecientes al municipio de Benalmádena y uno al de Mijas. De los tres, sólo uno presenta peligro de contaminación puesto que los otros dos son enterramientos en nichos (foto 9.7).



Foto 9.7. Campo de Golf en Alhaurín de la Torre (izquierda) y cementerio con enterramientos en nicho en Benalmádena (derecha).

En los municipios de Torremolinos y Alhaurín de la Torre se han localizado tres instalaciones eléctricas que funcionan como estaciones de transformación. Una subestación eléctrica entre Alhaurín de la Torre y la urbanización Pinos de Alhaurín, otra en el Pinar de Torremolinos y una tercera, de menor entidad, en la zona del Pinillo en Torremolinos (foto 9.8).

Para finalizar con el capítulo de infraestructuras, cabe citar la presencia de una zona tipificada como recinto deportivo (foto 9.8). Se corresponde con un complejo deportivo en el que hay instalaciones de atletismo, un estadio de fútbol y un pabellón de deportes multiuso.



Foto 9.8. Subestación eléctrica en Torremolinos (izquierda) y complejo deportivo junto al estadio de fútbol de Torremolinos (derecha).

En lo relativo a las actividades industriales, cabe citar la presencia de canteras de áridos con sus respectivas zonas de excavación y terraplenes. En total suman 18 canteras, de las cuales sólo una se desarrolla sobre materiales no consolidados, en concreto, sedimentos pliocuaternarios al Norte de los manantiales de Torremolinos. Las otras canteras son de mármol: tres de ellas en mármoles calizos y el resto en mármoles dolomíticos. En total suman una superficie de 338 ha. Del total de hectáreas dedicadas a la minería cabe resaltar que más de un tercio corresponde a la cantera del arroyo del Pinar (foto 9.9).



Foto 9.9. Cantera en el arroyo del Pinar en Alhaurín de la Torre (izquierda) y en el Arroyo Pedregal en Torremolinos (derecha).

Por último, hay un tercer grupo de peligros relacionados con actividades agrícolas y ganaderas. Las actividades agrícolas tienen una escasa importancia en el área de estudio dado que se encuentra en un territorio eminentemente turístico. Puntualmente, se ha observado la presencia de algún vivero, pero los terrenos agrícolas están dedicados al cultivo del olivar y frutales que llegan a ocupar una superficie de 360 ha. Las áreas de olivar, 70% de la superficie cultivada, son en algunos casos terrenos marginales (zonas abandonadas) de escasa producción y valor agrícola que no llegan a representar peligro alguno para la calidad del agua (foto 9.10). En cambio, las áreas de frutal se asocian a pequeños terrenos de propiedad privada con poca extensión, pero que sí tienen cierto peligro potencial, en cuanto que se utilizan pesticidas y abonos (foto 9.10).



Foto 9.10. Cultivos de olivar en el entorno de los manantiales de Torremolinos (izquierda) y frutal en el centro-norte del área de estudio (derecha).

En lo que a la actividad ganadera concierne, ésta se relaciona con pequeñas fincas de ganado equino (foto 9.11) asociado con ganado avícola en el sector nororiental. En menor medida, se han localizado chabolas con ganado equino y caprino que, en algunos casos, constituyen verdaderos núcleos, como en el Noroeste y Sur de la sierra. Estos núcleos chabolísticos implican acumulaciones de excrementos de los animales que se dejan a la intemperie hasta que la lluvia los arrastra y/o infiltra en el acuífero (foto 9.11).



Foto 9.11. Establos de ganado equino en el nordeste de la sierra (arriba-izquierda), en la base del vertedero de Benalmádena, en la parte centro-sur del acuífero (arriba-derecha) y acumulación de excrementos junto a los establos del vertedero de Benalmádena (izquierda).

En resumen, las actividades potencialmente peligrosas para la calidad de las aguas subterráneas, localizadas en el área de estudio, ocupan un 18% de la superficie de la sierra, aproximadamente 19 km². En función de la superficie que ocupan los distintos peligros de la zona de estudio se han extraído los siguientes datos significativos:

1. los asentamientos humanos, de cualquier tipo, representan más de la mitad de los peligros observados
2. una tercera parte de los peligros se localizan sobre materiales de elevada permeabilidad (mármoles), mientras que el resto está sobre rocas de baja permeabilidad (margas)
3. el sistema que mayor presencia de peligros tiene es el de Torremolinos, donde se localizan dos tercios de la superficie con peligros, el 80% de los peligros puntuales (gasolineras, vertederos...) y más de la mitad de los kilómetros de carretera potencialmente contaminantes y con escorrentía desde superficies pavimentadas.

9.2.2. NOCIDIDAD DE LOS PELIGROS: FACTOR H

La presencia de peligros potencialmente muy contaminantes, de acuerdo con los criterios aportados por De Keteleare *et al.* (2004), como son las actividades industriales, es muy baja en la sierra de Mijas. Sin embargo, sí que están presentes, y con gran intensidad, los peligros

relacionados con las infraestructuras urbanas de elevada nocividad, como por ejemplo, las las gasolineras y casas sin sistema de alcantarillado (cuadro 9.16).

Tipos de peligros	Factor H (nocividad)
Gasolineras	60
Casas sin alcantarillado	45
Estercolero	45
Carreteras	40
Vertedero de residuos sólidos urbanos	40
Depósito de chatarra	40
Urbanizaciones con sistema de alcantarillado	35
Depósito de escombros	35
Aparcamiento-depósito de vehículos	35
Campo de golf	35
Centro turístico	30
Estación de transformación	30
Canteras de gravas y arenas	30
Establos	30
Escorrentía desde superficie asfaltada	25
Cementerio	25
Estadios deportivos	25
Canteras	25
Campos de cultivo	25
Viveros	20
Excavación y terraplenes	10

Cuadro 9.16. Peligrosidad de las fuentes de contaminación detectadas en el acuífero de la Sierra de Mijas, según los criterios de De Keteleare *et al.* (2004).

La clasificación del factor H (mapa 1M anexo), muestra que las actividades de mayor nocividad en la sierra de Mijas (gasolineras) tienen una nocividad de clase Moderada. Las sustancias contaminantes que pueden verter las gasolineras son compuestos orgánicos (hidrocarburos) de alta toxicidad y permanencia en el medio. El resto de peligros son actividades que presentan una nocividad menor, de clase Baja, y solamente dos tipos de peligros tienen una nocividad Muy Baja: peligros relacionados con viveros y áreas de expansión de canteras.

En el mapa 1M del anexo se observa que la mayor proporción de peligros y nocividad de los mismos está localizada en la mitad oriental de la sierra, concretamente en el sector del acuífero de Torremolinos, la zona más ocupada por el hombre, dada la cercanía a la Costa del Sol y a la ciudad de Málaga. La mitad occidental se encuentra prácticamente libre de peligros como consecuencia de un relieve agreste, que dificulta la expansión urbana, y la lejanía a los principales puntos de atracción de población: Costa del Sol y ciudad de Málaga.

9.2.3. INTENSIDAD DE LA CONTAMINACIÓN: FACTOR Q_n

Según la metodología propuesta por De Keteleare *et al.* (2004) descrita en el epígrafe 5.1, Q_n es un factor que puede modificar en un 20 % la peligrosidad de una fuente contaminante en función de la cantidad de contaminante que puede ser vertida. Este factor ha sido analizado

para las variables de población, carreteras y gasolineras según la densidad de viviendas, intensidad media diaria de tráfico y capacidad de almacenamiento de los tanques de combustibles de las gasolineras, respectivamente. El resto de fuentes de contaminación no poseen características que permitan un cálculo de la intensidad de un vertido, por lo que, siguiendo las indicaciones metodológicas, no ha sido modificada su peligrosidad en función de este factor y han sido multiplicadas por 1.

Los asentamientos urbanos que tienen una densidad superior a 25 viviendas por hectárea han sido considerados como fuentes que incrementan la peligrosidad sobre el acuífero. Con dichas características están las zonas de Arroyo de la Miel y los pueblos de Benalmádena, Mijas y Alhaurín de la Torre, cuyos valores de nocividad se multiplican por 1,2. En el lado opuesto, se pondera por 0,8 aquellos sectores en los que la densidad es inferior a 2 viviendas por hectárea. Para las carreteras se ha utilizado la intensidad media diaria (IMD) de tráfico rodado (SET, 2002). Aquellas carreteras que superan el promedio de los valores de IMD se ha considerado con un mayor grado de intensidad por lo que han sido multiplicadas por 1,2, concretamente, este es el caso de la autovía A7. Por último, a las gasolineras se les ha incrementado la peligrosidad en función de que el volumen de combustible almacenado supere el valor medio más una desviación estándar en la zona de estudio. Las estaciones que cumplen esta condición son las situadas en la autovía A7 cuyos valores de nocividad han sido multiplicados por 1,2.

En el mapa 1M (anexo cartográfico) se observa que las zonas donde la intensidad de contaminación es mayor corresponden al borde suroriental de la sierra, el cual es el sector más cercano a la costa y donde las actividades antrópicas se manifiestan con mayor importancia.

9.2.4. PROBABILIDAD DE CONTAMINACIÓN: FACTOR R_f

R_f es un factor que puede llegar a tener una gran importancia en el resultado final de la cartografía del índice HI. La reducción de la peligrosidad puede llegar a ser del 100 %, mientras que el factor intensidad (Q_n) no supera el 20 %. Por ello, De Keteleare *et al.* (2004) aconsejan utilizar valores próximos a 1, salvo casos que puedan ser fácilmente cuantificables.

De todos los peligros localizados en la sierra de Mijas sólo a los cementerios y gasolineras se les ha aplicado este factor de reducción (mapa 1M anexo cartográfico). En el caso de los cementerios con enterramientos en nichos la probabilidad de ocurrencia se ha estimado 0,5, porque apenas existe peligro asociado a ellos. Los cementerios con enterramientos en fosas bajo tierra, como es el caso del cementerio internacional de Benalmádena, tienen una probabilidad 0,8. Las gasolineras son infraestructuras en las que hay medidas de protección para reducir el peligro de incendio y de vertidos, lo cual reduce el peligro de filtraciones al acuífero por accidentes y se asegura la recogida de los vertidos incontrolados en la estación de servicio. Por tanto, teniendo en cuenta las medidas de seguridad y la frecuencia con que se realizan las revisiones en el funcionamiento de las infraestructuras, se ha estimado que el peligro se reduce en un 15 % y, para estimar la peligrosidad, se multiplica el valor de nocividad (H) por 0,85.

9.2.5. ÍNDICE DE PELIGROSIDAD: HI

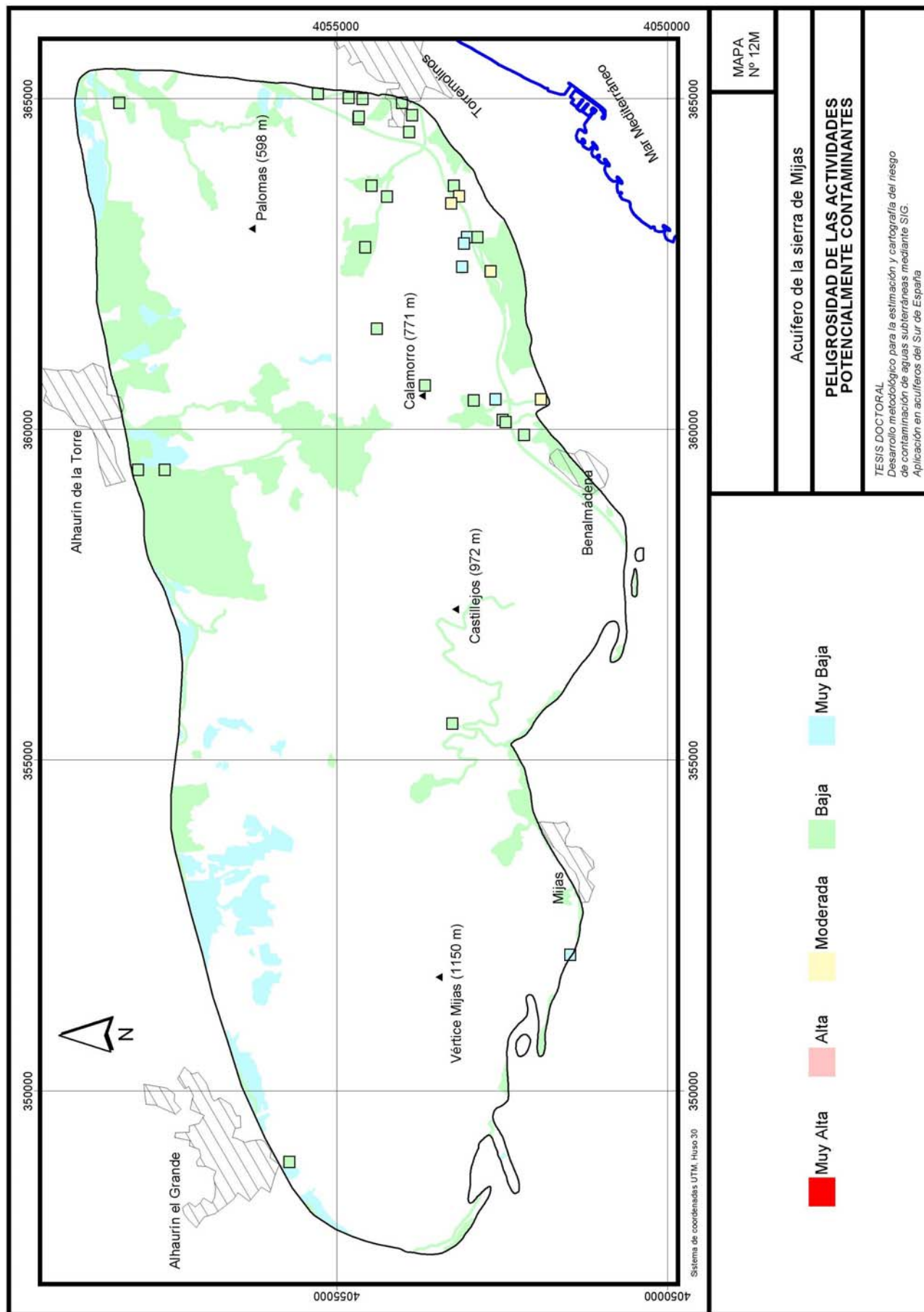
En general, la peligrosidad de las actividades y fuentes potencialmente contaminantes no es elevada. En el mapa 12M y 1M del anexo cartográfico, se observa que hay un claro predominio de las clases de peligrosidad Baja y Muy Baja y solo se han localizado peligros de grado Moderado de forma puntual, asociados a las gasolineras. Los elementos con un grado de peligrosidad Muy Baja son las actividades ligadas al sector agropecuario y a los cementerios, mientras que el resto tiene una peligrosidad Baja.

Las zonas con mayor grado de peligrosidad se localizan en la mitad oriental de la sierra, más concretamente en el sector suroriental donde la presencia de gasolineras, vertederos RSU o escombreras concentran una importante cantidad de contaminantes potenciales. La zona con menor nivel de peligrosidad es el extremo occidental de la sierra, en el municipio de Alhaurín el Grande, donde han sido detectados peligros de baja importancia relacionados con cultivos, carreteras y zonas urbanizadas en el peor de los casos.

Además de una zona de expansión de la cantera del Pinar (situada en la parte central de la sierra) y un vivero en Alhaurín de la Torre, otros elementos de baja peligrosidad, pero con una clase de nocividad superior, son los cementerios de Mijas y Arroyo de la Miel en el borde sur y los campos de cultivo del borde septentrional de la zona de estudio. El predominio de enterramientos en nichos reduce la nocividad inicial de la fuente contaminante hasta un grado de peligrosidad de clase Muy Baja. En el caso de los cultivos, se trata de espacios de poca o nula rentabilidad y con fuertes presiones urbanísticas para ser edificados. Se trata de áreas donde la intensificación de la producción agrícola es baja, en algunos casos son cultivos marginales o abandonados en los que no se utilizan sustancias fertilizantes ni pesticidas. Así, la cantidad de contaminantes que se puede verter sobre el medio es muy baja o nula.

El interior de la sierra presenta actividades potencialmente poco peligrosas relacionadas con la extracción de áridos en canteras y los caminos de acceso a las mismas. El resto de peligros detectados, también de peligrosidad Baja, se localizan fundamentalmente en los bordes de la sierra donde la accesibilidad de la población es mayor. Puntualmente, se han localizado escombreras, vertederos de RSU, chabolas con establos adosados, espacios para aparcamiento de vehículos, estercoleros, estaciones de transformación eléctrica y un centro turístico en la cima del monte Calamorro con diversas infraestructuras de ocio como cafeterías, exhibición de doma de caballos y jardines regados con aguas depuradas. Todos estos peligros mantienen una clase de peligrosidad acorde con la nocividad de las sustancias que pueden ser vertidas al medio, dado que la cantidad y probabilidad de contaminación no es elevada.

A escala de sistemas (epígrafe 9.1.6), Torremolinos es el que tiene mayor superficie con peligros de contaminación. Dos tercios de los peligros de la zona de estudio se localizan en él, con un grado de peligrosidad de clase, principalmente, Bajo, aunque cabe destacar que es el único acuífero donde se han localizado fuentes de contaminación con peligrosidad Moderada. El acuífero de Alhaurín el Grande tiene la segunda mayor extensión de peligros, pero son de grado Muy Bajo, relacionados con la agricultura, como ya se ha comentado anteriormente.



Indistintamente de la forma de cartografiar (polígonos, líneas o puntos) y medir el peligro (m^2 , m y número de casos, respectivamente) puede comprobarse que el grado de peligrosidad predominante en la zona de estudio es Bajo y que el sistema de Torremolinos es el más afectado por los peligros de contaminación.

La baja peligrosidad de las fuentes potenciales de contaminación en la zona de estudio, tiene su origen en que el baremo utilizado para evaluar la peligrosidad de las fuentes de contaminación está referido a un ámbito espacial mayor, como es el continente europeo. En el ámbito mediterráneo, en el cual se encuentra el área de estudio, las fuentes potenciales de contaminación no están ligadas principalmente a las actividades industriales, mientras que en otros ámbitos como Europa central hay un fuerte predominio de industrias y actividades muy contaminantes. Según los criterios de De Keteleare *et al.* (2004), en los espacios turísticos, difícilmente, se pueden localizar actividades con una peligrosidad elevada. Este hecho resulta especialmente llamativo en acuíferos donde la presencia de vertederos de RSU puede provocar la contaminación del agua, como ha ocurrido en el acuífero de Marbella, donde el lixiviado procedente del vertedero RSU de La Mina a provocado la contaminación del agua subterránea (Vadillo, 2003).

9.3. EVALUACIÓN Y CARTOGRAFÍA DE VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DEL ACUÍFERO DE LA SIERRA DE MIJAS

La vulnerabilidad del acuífero de la sierra de Mijas ha sido evaluada y cartografiada mediante los métodos: DRASTIC, GOD, AVI, EPIK y COP.

9.3.1. MÉTODO DRASTIC

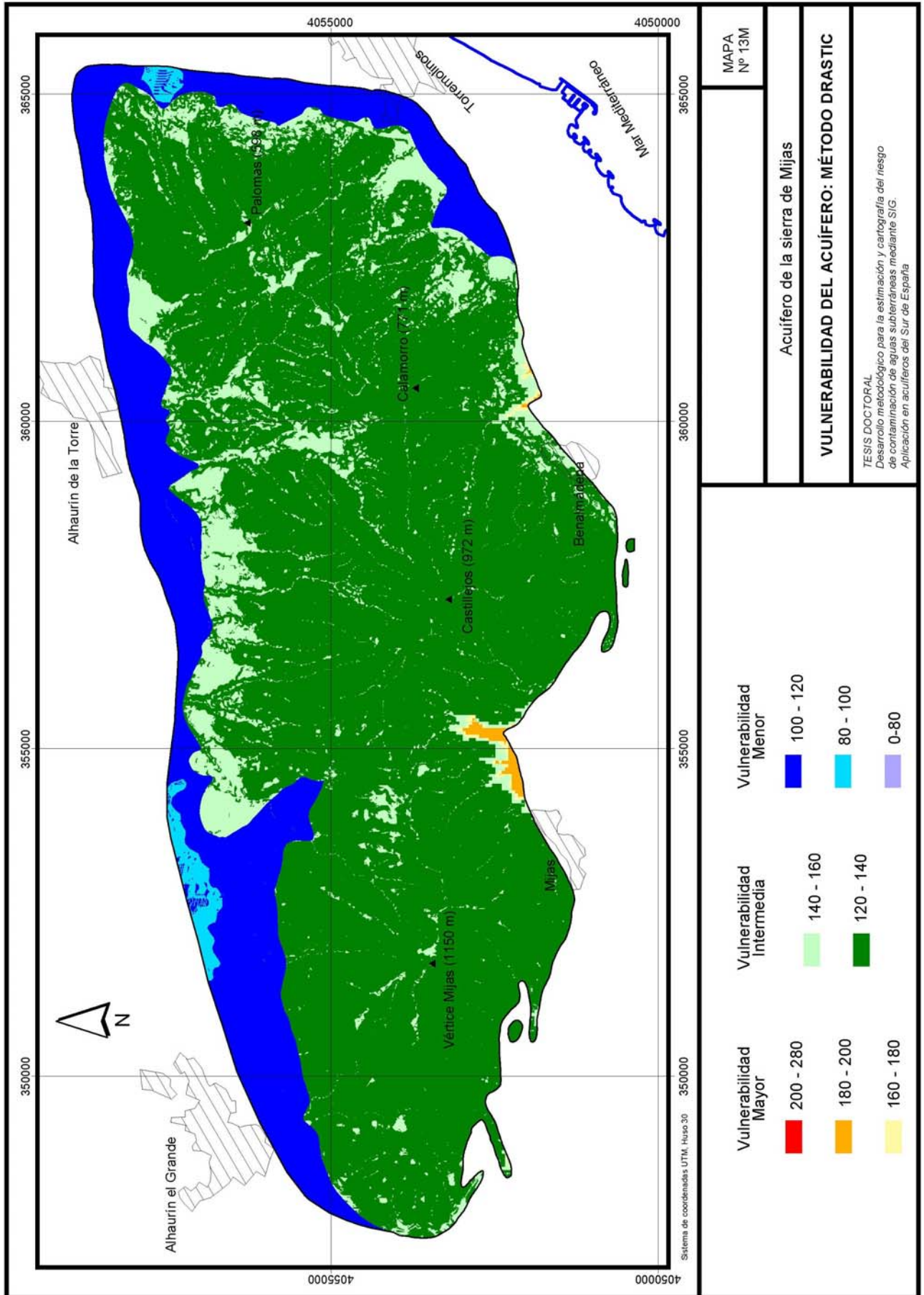
El método DRASTIC (esquema 1 del anexo) ha sido aplicado en la sierra de Mijas según las puntuaciones del cuadro 9.17.

Variable, unidad de medida y valores							Puntuación (R)
D (m)	R (mm)	A	S	T (%)	I	C (m/día)	
≤ 1			Delgado o ausente (Leptosol)	0 - 2			10
1 - 5	> 254		Arena (Regosol)	2 - 6			9
		Mármoles			Mármoles		8
5 - 10							7
							6
10 - 15				6 - 12			5
						10 - 30	4
15 - 25			Franco arcilloso (Calcisol)	12 - 18			3
25 - 30					Sedimentos pliocuaternarios		2
> 30				>18			1

Cuadro 9.17. Puntuación de los parámetros del método DRASTIC en la Sierra de Mijas.

En el acuífero de la sierra de Mijas se pueden diferenciar fácilmente dos zonas en función de las clases de vulnerabilidad y una tercera, de menor entidad, pero de gran importancia por ser la de menor protección del agua subterránea (mapa 13M y mapa 2M del anexo cartográfico). La mayor parte del acuífero presenta valores del índice de vulnerabilidad dentro del grupo intermedio, principalmente en el intervalo entre 120 – 140, donde se concentra más del 70% de la superficie del área de estudio (figura 9.22). Por tanto, la sierra de Mijas en su conjunto presenta una vulnerabilidad de clase intermedia, sobre todo si se tiene en cuenta que esta clase está directamente relacionada con el afloramiento de mármoles.

Dentro del rango de valores intermedios, el intervalo entre 140-160 tiene menos representación (10% de la zona de estudio) que el de 120-140, pero tiene especial influencia en el mapa de vulnerabilidad por la elevada dispersión que presenta en su distribución. Este intervalo está muy influenciado por la pendiente, de manera que cuando ésta es inferior al 18%, la vulnerabilidad aumenta con respecto a las zonas donde la pendiente es superior.



Las zonas de menor pendiente son algunas cimas y el piedemonte de la sierra, principalmente, en el sector de Torremolinos y Alhaurín de la Torre. También destaca la cantera del arroyo del Pinar donde la reducción de la pendiente aumenta la vulnerabilidad del acuífero.

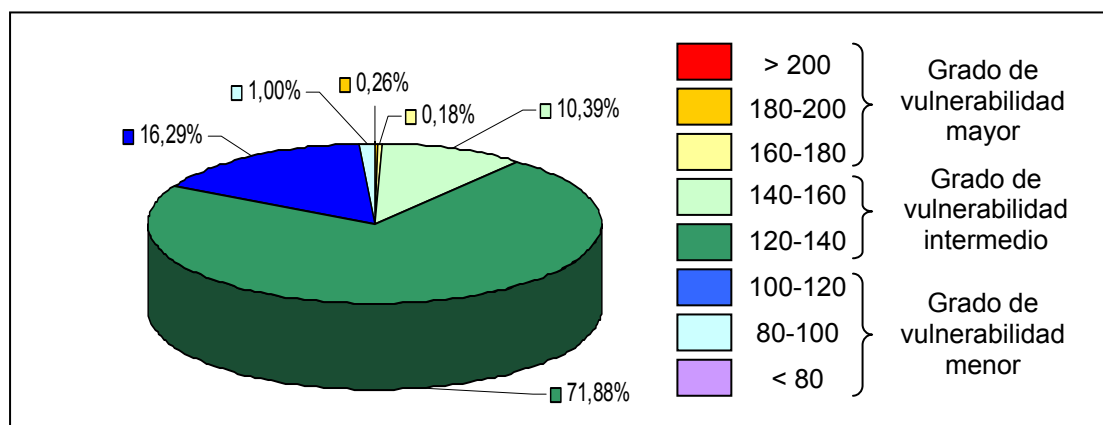


Figura 9.22. Porcentaje de superficie según intervalos de vulnerabilidad del método DRASTIC en la sierra de Mijas.

En el borde oriental y septentrional de la sierra los valores del índice están dentro del grupo de menor vulnerabilidad, intervalo 100 - 120 (mapa 14M y mapa 2M del anexo cartográfico). Todo este sector que bordea al acuífero representa el 17% del área de estudio (figura 9.22) y en él afloran materiales de baja permeabilidad, margas del Plioceno, que aumenta la capacidad de protección del acuífero. Dentro de este sector hay pequeñas zonas intercaladas con un grado de vulnerabilidad inferior, cuyos valores del índice se sitúan en el intervalo 80 - 100. En estas zonas, hay suelos que tienen una mayor capacidad de protección debido a que presentan un espesor mayor y una textura fina, lo que reduce la vulnerabilidad del acuífero en comparación con otras áreas donde no hay suelos o tienen un menor espesor y textura más gruesa.

Los sectores de mayor vulnerabilidad del acuífero son aquellos cuyos valores del índice DRASTIC se cifran por encima de 160. Dentro de este rango se han localizado dos en la parte sur del acuífero en las proximidades de los manantiales de Mijas y Benalmádena, sectores donde la profundidad del nivel piezométrico es menor y la capacidad de autodepuración, es decir, de filtro de los contaminantes, es baja. Zonas con valores por encima de 160 se diferencian dos: una más próxima al entorno de los manantiales de Mijas y Benalmádena, donde la vulnerabilidad es mayor, con valores del índice entre 180 y 200, y otra, alrededor de la anterior, donde los valores del índice están entre 160 y 180.

La influencia de cada parámetro sobre el índice de vulnerabilidad se ha obtenido a partir de los coeficientes de correlación de Pearson y de Determinación (cuadro 9.18).

Mediante estos coeficientes se observa que los parámetros D e I, ambos relacionados con la capacidad de autodepuración de la zona no saturada (Profundidad del agua subterránea e impacto de la zona vadosa, respectivamente) son los que recogen, en mayor proporción, las variaciones del índice. Así, en un 75 y 71 % de los casos respectivamente, las variaciones de estos parámetros tienen su correspondencia en el índice de vulnerabilidad.

El suelo tiene menor influencia y el parámetro T muestra una correlación prácticamente nula, sin embargo ya se ha comentado que la pendiente determina el mapa de vulnerabilidad.

Parámetro	Coficiente de Pearson ρ	Coficiente de Determinación R^2
D	0,87	0,75
R	0	0
A	0	0
S	0,60	0,37
T	0,12	0,01
I	0,84	0,71
C	0	0

Cuadro 9.18. Coeficientes de Pearson y de Determinación entre las variables y el índice DRASTIC en la sierra de Mijas.

Los parámetros R, A y C no muestran correlación con el índice, dado que se han considerado constantes en todo el acuífero. En el caso del parámetro R, el valor constante se debe a que el método interpreta como más vulnerable las zonas donde la recarga es superior a 250 mm/año y, en el año 1996/1997 (año tipo para el análisis de la vulnerabilidad), todo el acuífero tiene una recarga superior a ese umbral. El parámetro A hace referencia al tipo de litología que forma el acuífero (zona saturada), el cual está formado exclusivamente por mármoles triásicos. El parámetro C no muestra variabilidad debido a la escasez de datos; por ello, se le ha asignado un valor medio de conductividad hidráulica similar al conjunto del acuífero.

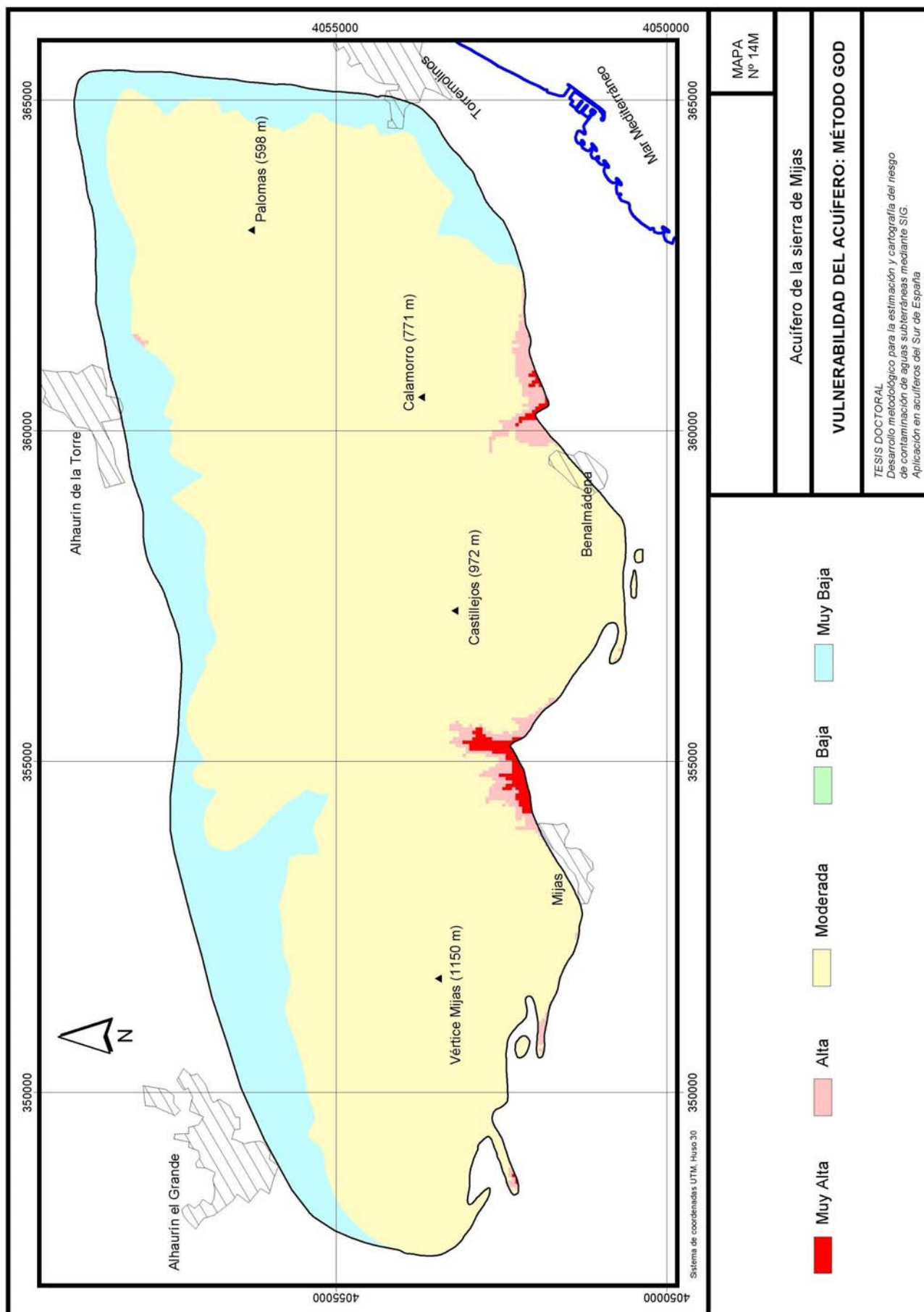
9.3.2. MÉTODO GOD

El método GOD (esquema 2 del anexo) se ha aplicado en la sierra de Mijas teniendo en cuenta las puntuaciones del cuadro 9.19

Variable, unidad de medida y valores			Puntuación (R)
G	O	D (m)	
Libre	Mármoles	≤ 2	1
		2 – 5	0,9
		5 – 10	0,8
		10 – 20	0,7
		20 – 50	0,6
	Sedimentos Pliocuaternarios	50 – 100	0,5
Semiconfinado		> 100	0,4

Cuadro 9.19. Puntuación de los parámetros del método GOD en la Sierra de Mijas.

La vulnerabilidad del acuífero de Mijas según el método GOD es principalmente de clase Moderada. El mapa de vulnerabilidad (mapa 14M y mapa 3M del anexo cartográfico) es de clase Moderada en un 80 % de la zona de estudio (figura 9.23).



Todo el afloramiento carbonático con un espesor superior a 50 m tiene una vulnerabilidad de grado Moderado. Allí donde el espesor de zona no saturada es menor, la vulnerabilidad aumenta hasta un grado de clase Muy Alta. En las áreas más cercanas a los manantiales de Mijas y Benalmádena, donde la profundidad del agua subterránea es inferior a los 5 m, la vulnerabilidad es Muy Alta. En las zonas del acuífero donde el espesor de zona no saturada varía entre 5 y 50 m, la vulnerabilidad es de clase Alta. En las cercanías de los manantiales de Alhaurín de la Torre también se ha localizado un pequeño sector con un grado de vulnerabilidad de clase Alta, apenas 2 ha, igualmente como consecuencia del escaso espesor de zona no saturada.

Con un grado de vulnerabilidad Muy Bajo se ha obtenido una franja en el borde septentrional y oriental del acuífero que está relacionada con el afloramiento de margas del Plioceno sobre los mármoles triásicos. Estos materiales aumentan la capacidad de protección de la zona no saturada y, por tanto, disminuyen la vulnerabilidad.

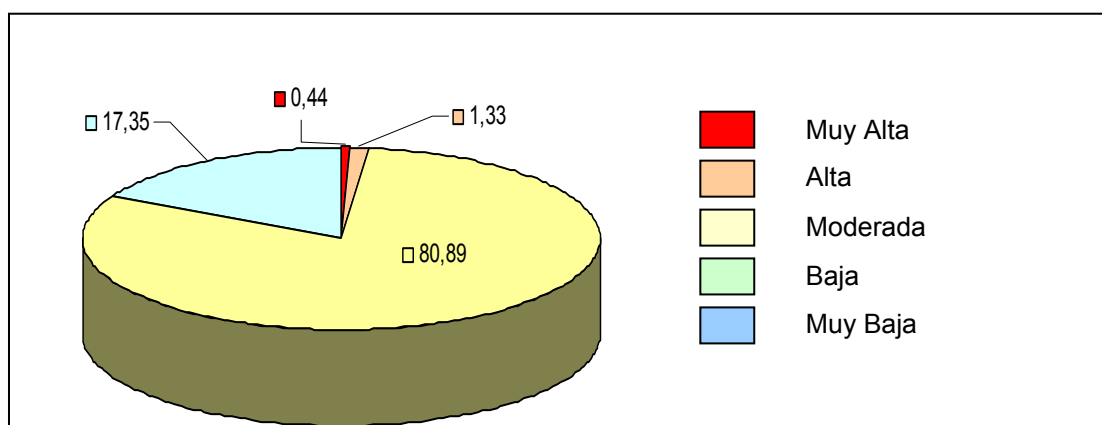


Figura 9.23. Porcentaje de superficie según clases de vulnerabilidad del método GOD en la sierra de Mijas.

Los parámetros del método GOD muestran una elevada influencia en el índice final, máxima en el caso del parámetro D (profundidad del agua subterránea) donde la correlación según el coeficiente de Determinación es del 89 % (cuadro 9.20) y disminuye hasta un 55 % en los otros dos parámetros. Cabe destacar el hecho de que el parámetro G, con una menor variabilidad espacial, esté correlacionado con el índice GOD con igual valor que el parámetro O, el cual tiene una mayor variabilidad que G. Esto implica que la vulnerabilidad en la sierra de Mijas está muy condicionada por el grado de confinamiento del acuífero.

Parámetro	Coeficiente de Pearson ρ	Coeficiente de Determinación R^2
G	0,74	0,55
O	0,74	0,55
D	0,94	0,89

Cuadro 9.20. Coeficientes de Pearson y de Determinación entre las variables y el índice GOD en la sierra de Mijas.

9.3.3. MÉTODO AVI

El método AVI no establece puntuación alguna de los parámetros y evalúa la vulnerabilidad directamente con los valores de cada uno mediante el algoritmo del esquema 3 del anexo. Los valores utilizados para los parámetros d y k en la sierra de Mijas se muestran en el cuadro (9.21).

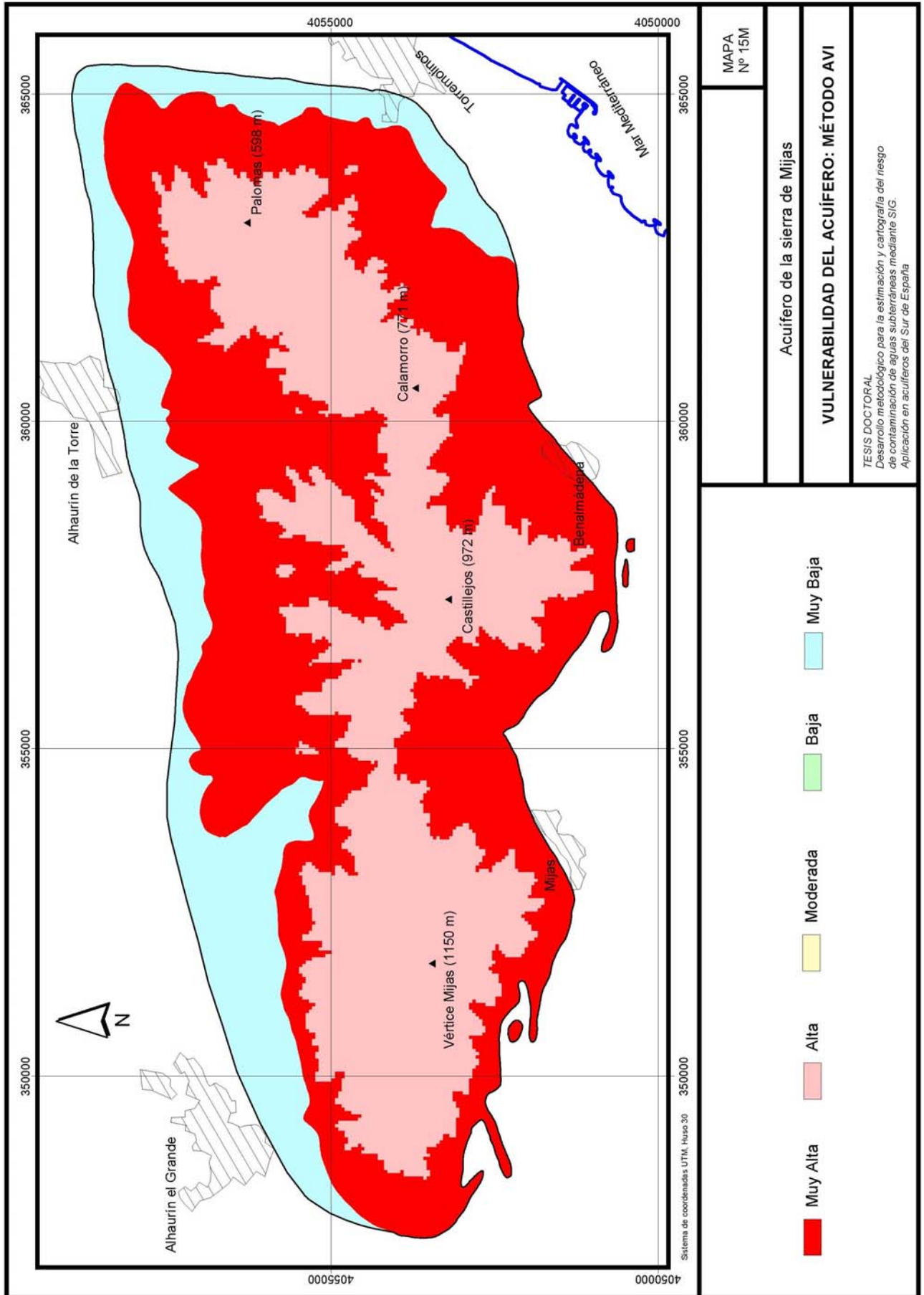
En la sierra de Mijas se han diferenciado dos áreas con distinto número de capas en la zona no saturada: una en el borde septentrional y oriental caracterizada por la presencia de suelos (calcisoles y regosoles) sobre los sedimentos de edad pliocuaternaria que semiconfinan al acuífero. En el resto de la zona de estudio, los suelos (Leptosoles líticos, principalmente) son discontinuos lo que unido al hecho de su escasa potencia, apenas 20-25 cm de espesor (Aguilar *et al.*, 1993), ha supuesto no considerarlos como una capa de protección del acuífero, de manera que sólo se ha estimado una capa de protección de las aguas subterráneas, relacionada con los mármoles.

Capa de la zona no saturada		Parámetro	
		d (m)	k (m/día)
Rocas	Mármoles	0 - 800	10 – 30
	Sedimentos pliocuaternarios	0 - 100	10 ⁻²
Suelos	Calcisoles y Regosoles	0 – 0,5	10 ⁻²

Cuadro 9.21. Valores de los parámetros del método AVI en la sierra de Mijas.

El resultado de aplicar el método AVI en el acuífero de la sierra de Mijas muestra sólo tres zonas con distinto grado de vulnerabilidad (mapa 15M y mapa 4M del anexo cartográfico): una relacionada con la existencia de materiales de baja permeabilidad y otras dos con el afloramiento de mármoles.

En el borde oriental y septentrional de la sierra, la vulnerabilidad es de clase Muy Baja debido a la presencia de sedimentos pliocuaternarios cubiertos por suelos, lo que aumenta la protección hasta el máximo. En los sectores del acuífero donde sólo los mármoles actúan como filtro de los contaminantes, la vulnerabilidad aumenta hasta un grado máximo de clase Muy Alta, donde el espesor de zona no saturada es inferior a 300 m, y disminuye hasta un grado de clase Alta donde el espesor es mayor.



La vulnerabilidad es Muy Alta, prácticamente, en la mitad de la zona de estudio (figura 9.24) y en un 35% es de clase Alta. En cualquier caso, la mayoría de la superficie del acuífero muestra índices de vulnerabilidad elevados. Según estos datos, el acuífero de la sierra de Mijas es muy vulnerable aunque en la actualidad no existen síntomas de contaminación en ninguna captación de agua. Una gran parte de la actividad humana se desarrolla justamente en las zonas donde la vulnerabilidad es mínima lo que podría explicar la ausencia de eventos de contaminación. Sin embargo, en zonas donde no hay suelos ni sedimentos pliocuaternarios sí se detectaron con anterioridad episodios de contaminación microbiológica en los sondeos de abastecimiento, como ocurrió en Benalmádena.

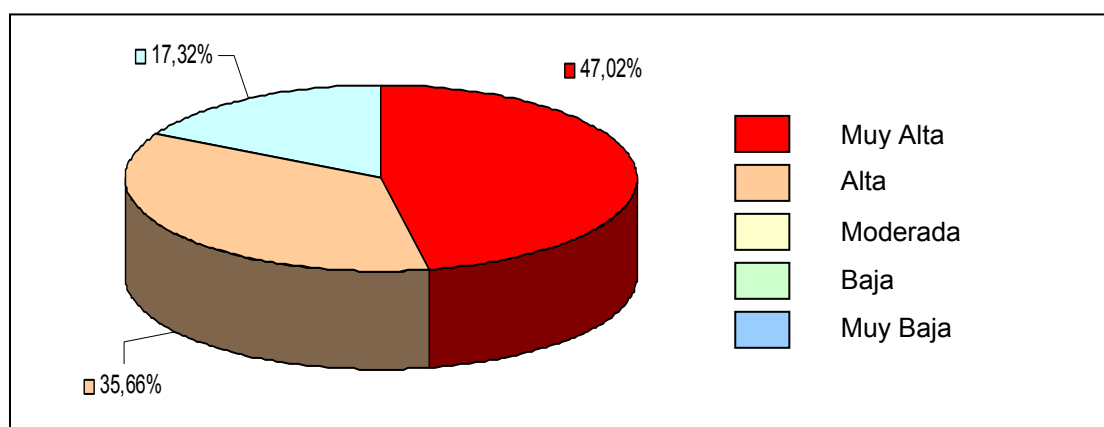


Figura 9.24. Porcentaje de superficie según clases de vulnerabilidad del método AVI en la sierra de Mijas.

La correlación entre los parámetros del método AVI y el índice final de vulnerabilidad es 1 a excepción del parámetro d referido a los mármoles (espesor de mármoles) y el índice entre los cuales no existe correlación (cuadro 9.22).

capa de la zona no saturada	Parámetro	Coefficiente de Pearson ρ	Coefficiente de Determinación R^2
Suelos	d	1	1
	k	1	1
Mármoles o sedimentos pliocuaternarios	d	-0,025	0,001
	k	-1	1

Cuadro 9.22. Coeficientes de Pearson y de Determinación entre las variables y el índice AVI en la sierra de Mijas.

9.3.4. MÉTODO EPIK

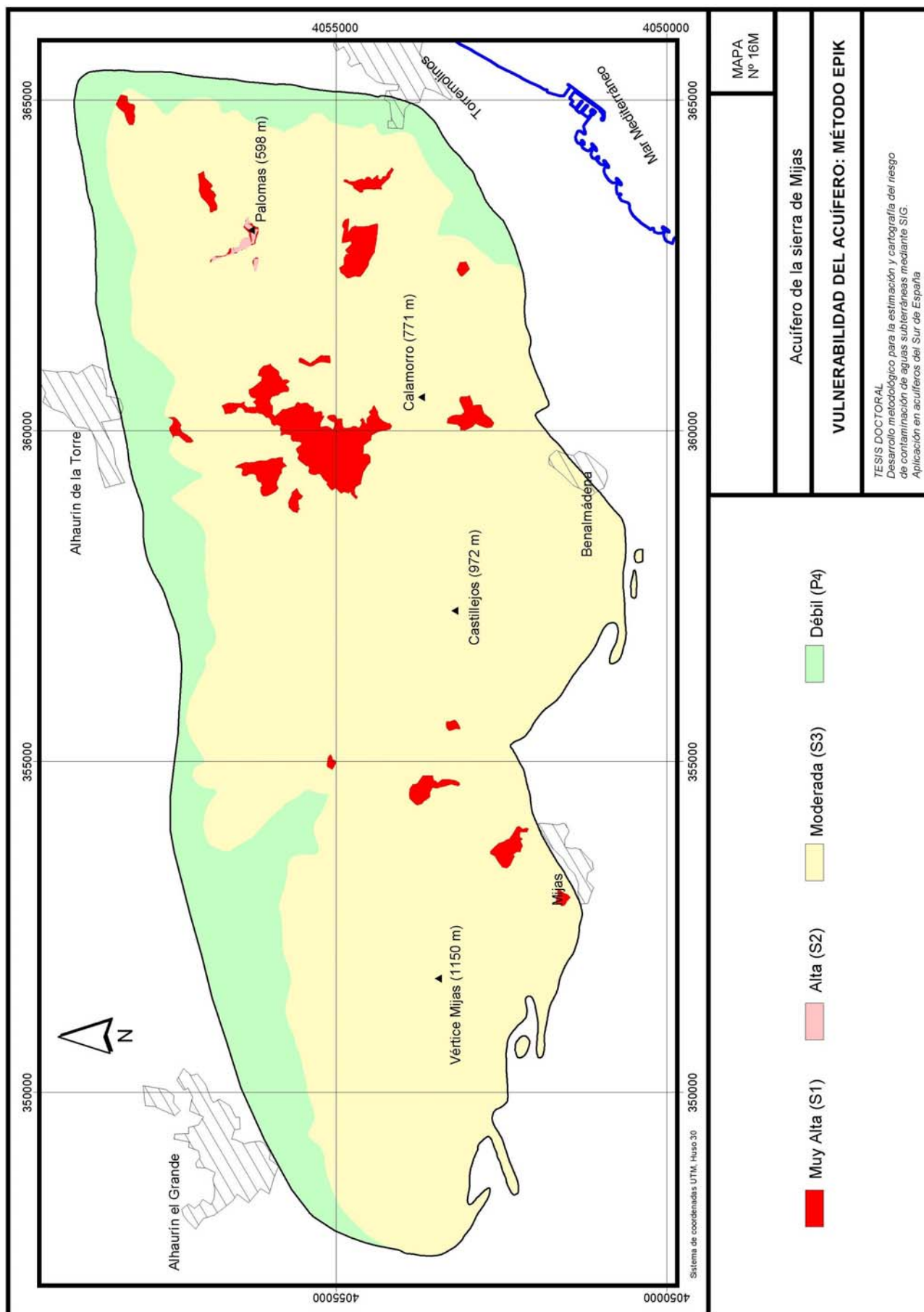
El método EPIK (esquema 4 del anexo) se ha aplicado en la sierra de Mijas teniendo en cuenta las puntuaciones del cuadro 9.23. El valor 1 del parámetro E (Epikarst), máxima vulnerabilidad, representa zonas del acuífero donde hay morfologías kársticas que carecen de cubierta protectora y las canteras en mármoles debido al intenso grado de fracturación que presenta la roca en estos lugares.

Variable y valor				Puntuación o valor típico (R)
E Epikarst	P Capa protectora	I Condiciones de infiltración	K Red kárstica	
Lapias y afloramientos con intensa fracturación (canteras)	< 20 cm suelo			1
		Áreas que actúan como colectores de las aguas de lluvia y pendientes que la generan (pendientes superiores al 10% para zonas cultivadas y mayores del 25% para praderas y pastizales)	Acuífero fisurado, no karstificado	3
Resto de la cuenca de alimentación	> 100 suelo y una gruesa formación geológica de baja permeabilidad	Resto de la cuenca no vertiente a un arroyo que alimenta un sumidero		4

Cuadro 9.23. Puntuación de los parámetros del método EPIK en la Sierra de Mijas.

Los resultados se muestran en el mapa 16M y en el mapa 5M del anexo cartográfico. Según este mapa, la vulnerabilidad del acuífero de la sierra de Mijas es de clase Débil, equivalente a P₄, en el borde oriental y septentrional, donde la presencia de una potente capa de materiales de baja permeabilidad establece un grado de protección al acuífero lo suficientemente importante como para diferenciarlo del resto.

El afloramiento de mármoles presenta una vulnerabilidad mayor y las variaciones en el grado de vulnerabilidad son función del parámetro E (mapa 5M del anexo cartográfico), de manera que las zonas donde se ha localizado un cierto desarrollo de la karstificación, como ocurre en el entorno de la cima de las Palomas, en la parte oriental de la sierra, la vulnerabilidad aumenta hasta un grado Alto (zonas de protección S2). En las canteras de la sierra la vulnerabilidad aumenta hasta un grado máximo de clase Muy Alta (protección S1), debido a la intensa fracturación de la roca y a que en estas zonas se acumulan los flujos de aguas superficiales.



La figura 9.25 muestra que el grado de vulnerabilidad predominante en la sierra es Moderado, dado que casi el 80% de la superficie de la misma presenta esta clase de vulnerabilidad. Las zonas con elevada vulnerabilidad tienen muy poco peso en el cómputo global, sobre todo, las asociadas a la clase S2.

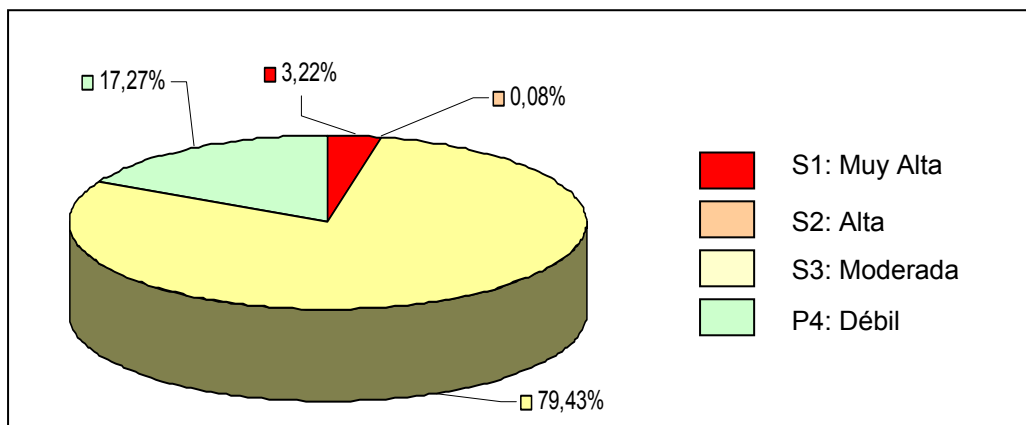


Figura 9.25. Porcentaje de superficie según clases de vulnerabilidad del método EPIK en la sierra de Mijas.

La importancia del parámetro E en el mapa final de vulnerabilidad tiene su correspondencia en los coeficientes de correlación obtenidos (cuadro 9.24), los cuales denotan la elevada significación del parámetro E sobre el índice EPIK en el caso de la sierra de Mijas. El parámetro P también guarda una importante correlación con el índice, aunque no es muy elevada. El parámetro K no tiene correlación con el índice puesto que se presenta como constante a lo largo de toda la zona de estudio y el parámetro I tiene muy baja correlación.

Parámetro	Coficiente de Pearson ρ	Coficiente de Determinación R^2
E	0,93	0,87
P	0,67	0,44
I	0,28	0,08
K	0	0

Cuadro 9.24. Coeficientes de Pearson y de Determinación entre las variables y el índice EPIK en la sierra de Mijas.

9.3.5. MÉTODO COP

El método COP (esquema 5 del anexo) se ha aplicado en la sierra de Mijas a partir de los valores del cuadro 9.25. Las principales características a resaltar de los valores empleados son, por un lado, la ausencia de valores del factor C relacionados con zonas que vierten a un sumidero activo y, por otro lado, la presencia de áreas semiconfinadas con un valor 1,5.

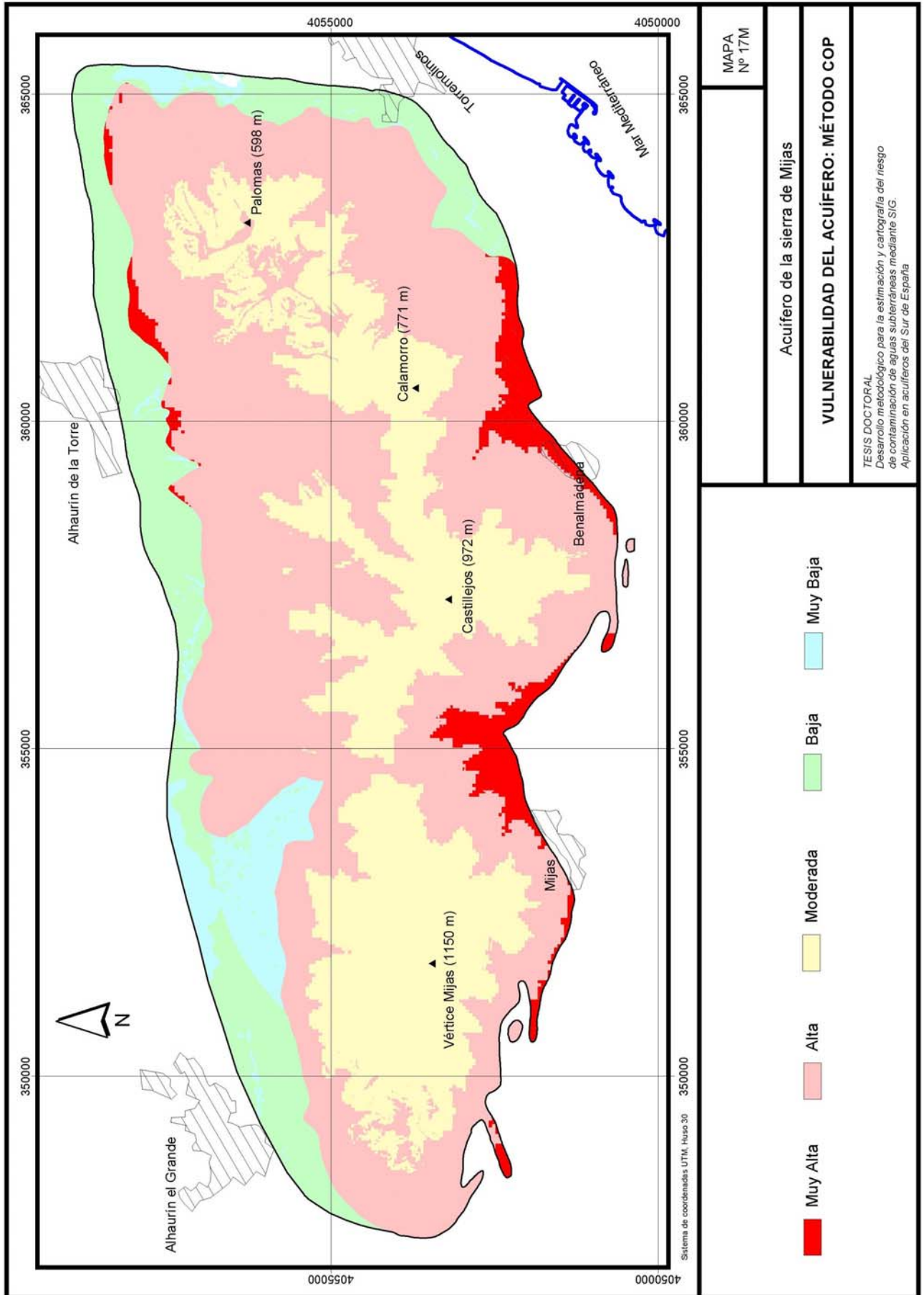
Factor	Subfactor	Variable		Puntuación
C	Escenario B: Resto del acuífero	Formas superficiales	Karst escasamente desarrollado y desnudo Ausencia de formas kársticas	0,5 1
		Pendiente y vegetación	0 – 8 % 8 – 31 % y sin vegetación 31 – 76 % y sin vegetación > 76 %	0,75 0,85 0,95 1
	O	Suelos [O _s]	Textura y espesor	Ausencia de suelo
Arenoso entre 0,5 - 1 m				1
Litología [O _L]		Grado de confinamiento	Equilibrado entre 0 – 0,5 m	2
	Limoso entre 0,5 - 1 m		3	
P	Cantidad [P _Q]	Precipitación media en año húmedo	Sedimentos pliocuaternarios	400
			Mármoles Triásicos	3
			Semiconfinado	1,5
	Intensidad [P _I]	Precipitación y nº de días	Libre	1
			> 1600 mm/ año	0,4
Intensidad [P _I]	Precipitación y nº de días	> 1200 y ≤ 1600 mm/ año	0,3	
		> 800 y ≤ 1200 mm/ año	0,2	
Intensidad [P _I]	Precipitación y nº de días	> 20 mm/día	0,2	
		> 10 y ≤ 20 mm/ día	0,4	

Cuadro 9.25. Puntuación de los parámetros del método COP en la sierra de Mijas.

En el borde septentrional y oriental de la sierra de Mijas la vulnerabilidad es inferior al resto, debido al afloramiento de sedimentos pliocuaternarios, materiales de baja permeabilidad, que junto con la presencia de suelos aumentan considerablemente la capacidad de protección natural del acuífero (mapa 17M y mapa 6M del anexo cartográfico). Además, ésta es un área donde el acuífero se encuentra semiconfinado, lo que añade un grado más de protección. Dentro de este sector, se pueden diferenciar zonas con vulnerabilidad Baja o Muy Baja en función del tipo de suelo. Así, las áreas donde hay Regosoles, suelos de textura más arenosa y de mayor permeabilidad, la vulnerabilidad es de clase Baja.

El afloramiento carbonático tiene mayor vulnerabilidad, como consecuencia de la escasez de suelos y de la elevada permeabilidad de los mármoles. La vulnerabilidad en los mármoles varía desde un grado de clase Moderada hasta Muy Alta. Las zonas de mayor vulnerabilidad (Muy Alta) se localizan, principalmente, en las cercanías de los manantiales de las localidades de Alhaurín de la Torre, Churriana, Benalmádena y Mijas. En el entorno de estos puntos el nivel piezométrico está muy próximo de la superficie topográfica, lo que reduce la acción de filtro de la zona no saturada frente a los contaminantes y aumenta la vulnerabilidad del acuífero.

Las zonas con un grado de vulnerabilidad de clase Muy Alta se caracterizan por la ausencia de suelos, un espesor de zona no saturada inferior a los 85 m y una elevada capacidad de transporte de los contaminantes a través del agua de lluvia, lo que impide a la zona no saturada ejercer su función de filtro y autodepuración de la contaminación.



Allí donde aumenta el espesor de zona no saturada, y se mantienen las condiciones comentadas en el párrafo anterior, la vulnerabilidad disminuye hasta un grado de clase Alta. Entre 85 y 330 m de espesor de zona no saturada la vulnerabilidad es de clase Alta. Así, puede observarse toda una orla alrededor de la línea de cumbres de la sierra, más amplia en la parte oriental de la sierra y más estrecha en la parte occidental de la misma. La mayor amplitud de la zona de vulnerabilidad Alta en el sector oriental es consecuencia de la presencia de un piedemonte en este sector, mientras que en la mitad occidental existe un relieve más agreste con fuertes pendientes. Por encima de los 330 m de espesor de zona no saturada, la vulnerabilidad desciende hasta un grado de clase Moderado, como se observa en la parte central de la sierra siguiendo la línea de cumbres. Los alrededores de la cima de las Palomas tiene un grado de vulnerabilidad de clase Alta a pesar de que el espesor de la zona no saturada supera los 330 m, como resultado del mayor grado de karstificación de los mármoles y la baja pendiente que favorece la infiltración en esta zona.

En función del porcentaje de superficie de cada clase de vulnerabilidad en la sierra de Mijas se puede afirmar que predomina la clase Alta, puesto que la mitad del acuífero tiene este grado de vulnerabilidad (figura 9.26). Las zonas de máxima vulnerabilidad sólo representan un 4 %, pero cualitativamente son puntos de especial interés ante un plan de ordenación del territorio o de los recursos naturales, pues se localizan en los puntos de cota más baja, cerca de las captaciones de abastecimiento a las poblaciones de Mijas, Benalmádena y Alhaurín de la Torre.

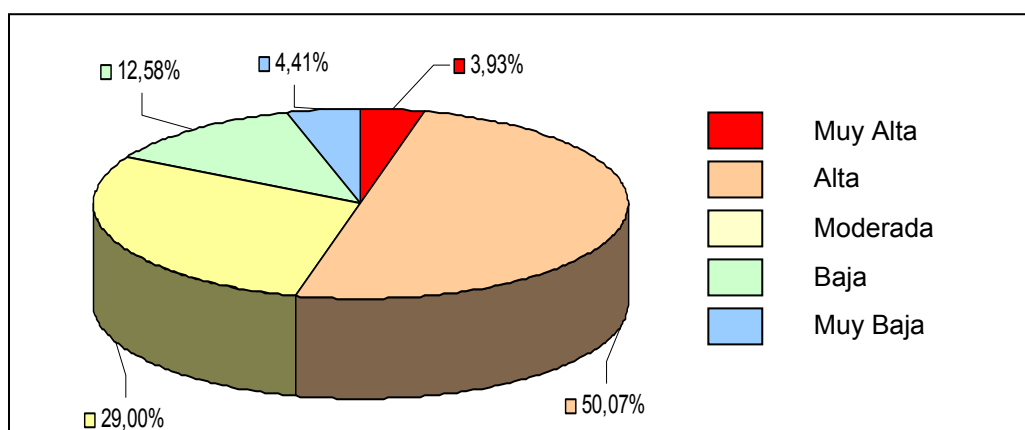


Figura 9.26. Porcentaje de superficie según clases de vulnerabilidad del método COP en la sierra de Mijas.

La correlación obtenida entre los factores del método COP y el índice de vulnerabilidad, mediante los coeficientes de Pearson y de Determinación, indica la elevada dependencia del índice respecto del factor O en el caso de la sierra de Mijas (cuadro 9.26). En más de un 90% de los casos, las variaciones del índice COP son consecuencia de variaciones en el factor O, mientras que sólo en un 25 % de los casos son consecuencia del factor C. El factor P no muestra correlación con el índice, debido en gran medida a la escasa variabilidad espacial que presenta.

Factor	Coefficiente de Pearson ρ	Coefficiente de Determinación R^2
C	0,52	0,27
O	0,95	0,91
P	0	0

Cuadro 9.26. Coeficientes de Pearson y de Determinación entre las variables y el índice COP en la sierra de Mijas.

9.3.6. ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS EN LA SIERRA DE MIJAS

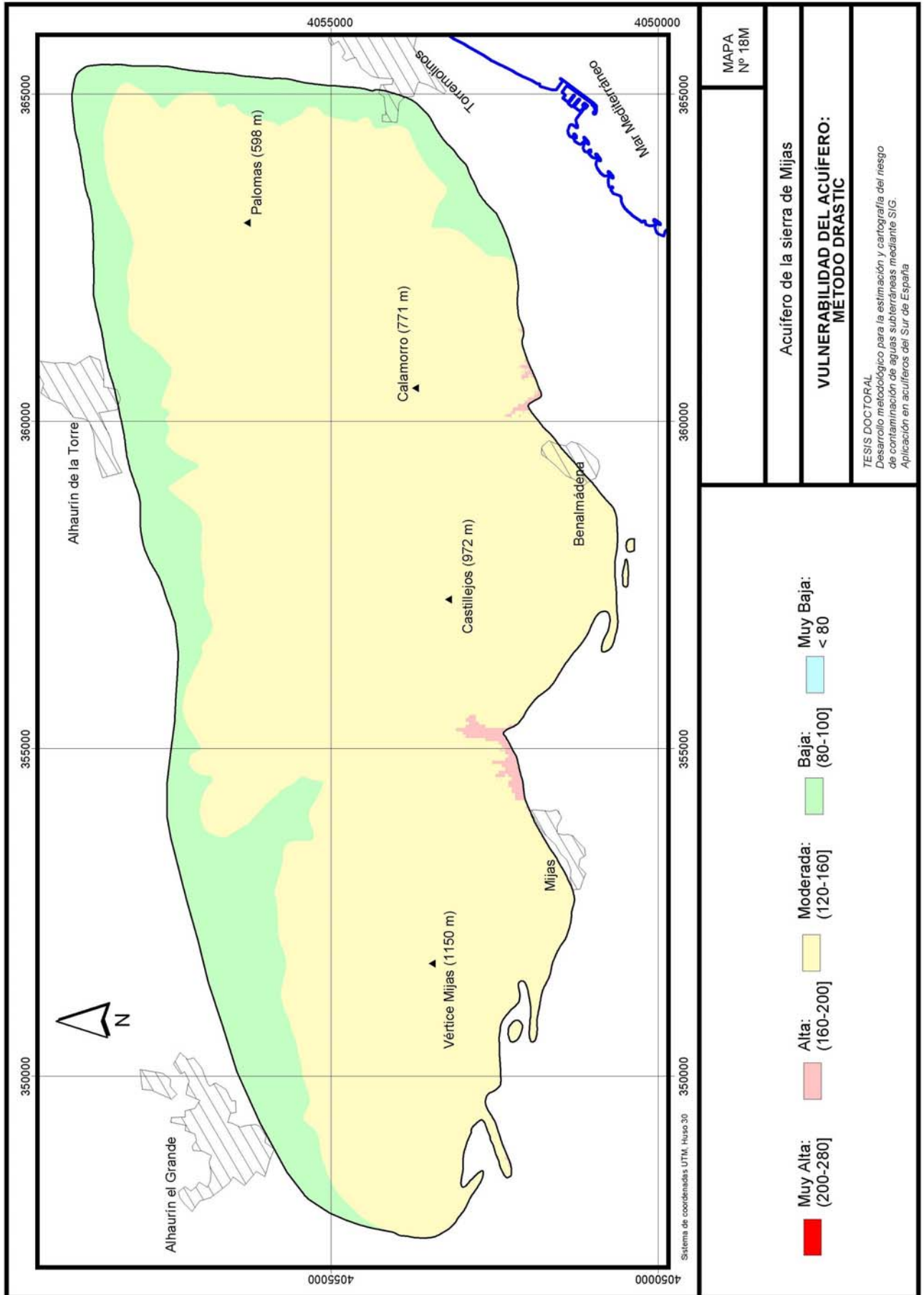
Para comparar los resultados de los distintos métodos de cartografía de vulnerabilidad, se han unificado las leyendas de los métodos utilizados en cinco clases de vulnerabilidad (desde Muy Alta a Muy Baja) con el fin de establecer un criterio común.

En algunos métodos ha sido necesario modificar su leyenda para adaptarse al estándar de cinco clases. Así, la clasificación del método DRASTIC en ocho intervalos ha sido modificada como se muestra en el cuadro 8.3.6 y los resultados obtenidos mediante la nueva leyenda se presentan en el mapa 18M.

EPIK es otro método que no utiliza cinco intervalos del índice, pero debido a las características de su clasificación se ha optado por no modificarla y tener presente que no se puede obtener una clase de vulnerabilidad Muy Baja.

En general, la vulnerabilidad obtenida con los métodos DRASTIC, GOD y EPIK es bastante similar en la medida que muestran un elevado porcentaje de superficie, aproximadamente 80%, de la clase Moderada (figura 9.27). El borde septentrional y oriental presenta una vulnerabilidad menor, Baja con los métodos DRASTIC y EPIK y Muy Baja con GOD. El resto son pequeños sectores de elevada vulnerabilidad relacionados con un reducido espesor de zona no saturada, en los casos de DRASTIC y GOD, y en relación con la intensa fracturación en las canteras, según el método EPIK. En cualquier caso, estos tres métodos muestran una elevada homogeneidad en la distribución de la vulnerabilidad.

Los métodos AVI y COP muestran un resultado de la vulnerabilidad más heterogéneo, sobre todo COP que diferencia hasta cinco clases de vulnerabilidad, mientras que AVI solo tres. Según el método AVI la vulnerabilidad del acuífero es, principalmente, Alta y Muy Alta. Según el método COP, la vulnerabilidad es Alta y Moderada, pero permite diferenciar zonas con mayor vulnerabilidad en las cercanías de los manantiales donde la capacidad de filtro de la zona no saturada es muy baja. En ambos casos, y al igual que con el resto de métodos, las zonas de menor vulnerabilidad son el borde oriental y septentrional de la sierra, donde la presencia de materiales de baja permeabilidad aumenta la capacidad de protección del acuífero.



Los resultados obtenidos con los métodos EPIK, DRASTIC y GOD no reflejan, con la misma intensidad que AVI y COP, variaciones en la vulnerabilidad en función del espesor de zona no saturada. DRASTIC y GOD sólo muestran variaciones de la vulnerabilidad en el entorno más inmediato de los manantiales, mientras que EPIK no tiene en cuenta ningún parámetro relacionado con la profundidad del agua subterránea. Por otra parte, el método AVI sobreestima la vulnerabilidad del acuífero, en la medida que muestra una gradación superior a la del resto de métodos y la equipará a la de acuíferos con menor capacidad de atenuación como el de Líbar. Además, si la vulnerabilidad fuera realmente tan alta, se habrían detectado indicios de contaminación en buena parte de las captaciones de la sierra, lo cual no ha ocurrido.

Por tanto, el método COP es el que ofrece mayor capacidad para discriminar zonas con distinta vulnerabilidad y, además, es coherente con los datos de calidad química del agua.

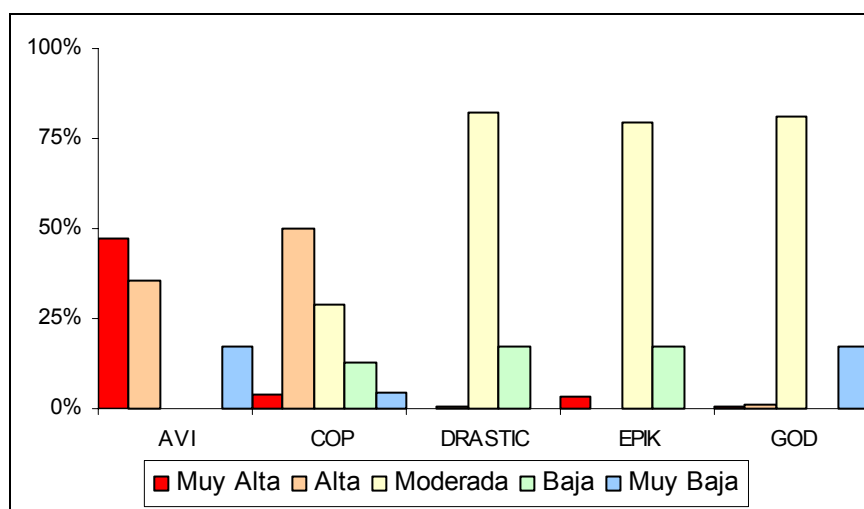


Figura 9.27. Porcentaje de superficie del acuífero de la sierra de Líbar según las clases de vulnerabilidad de los métodos AVI, COP, DRASTIC, EPIK y GOD.

9.4. EVALUACIÓN Y CARTOGRAFÍA DE VULNERABILIDAD DE LA POBLACIÓN Y SUS BIENES (MEDIO HUMANO) EN EL ACUÍFERO DE LA SIERRA DE MIJAS

9.4.1. VULNERABILIDAD DE LA POBLACIÓN (V_P)

El riesgo de contaminación de las aguas subterráneas del acuífero de Mijas está condicionado por el valor que tiene el agua como recurso para el abastecimiento de los núcleos de población, factor que se ha evaluado a partir de la vulnerabilidad (función de la exposición y resistencia) de los elementos del medio humano dependientes de los recursos de la sierra, en este caso la población.

En total ha sido evaluada la vulnerabilidad de 40 núcleos urbanos donde se concentra la población abastecida con los recursos de la sierra de Mijas, según los datos aportados por las empresas gestoras del agua de los seis municipios implicados: Alhaurín el Grande, Alhaurín de la Torre, Málaga, Torremolinos, Benalmádena y Mijas.

Las entidades de población evaluadas mediante los factores E_P (exposición) y R_{2P} (resistencia según la edad de la población) son las que establece la Consejería de Obras Públicas y Transporte en el Mapa Digital de Andalucía, equiparables al Nomenclátor de población. A partir del factor R_{1P} (resistencia según el tipo de abastecimiento), se diferencia la vulnerabilidad entre núcleos, o dentro de un mismo núcleo mediante secciones censales.

El factor de exposición de la población (E_P), en conjunto, es muy elevado, aunque a escala de entidad de población hay fuertes variaciones en el grado de exposición (mapa 7M anexo cartográfico). Los núcleos de Torremolinos y Arroyo de la Miel son los que tienen una mayor concentración de habitantes dependientes de los recursos de la sierra de Mijas. Benalmádena Costa, Alhaurín el Grande y Alhaurín de la Torre tienen un grado de exposición menor, aunque también es importante. El resto de núcleos urbanos se corresponden con urbanizaciones en las cuales se concentra una menor cantidad de población.

Respecto tipo de abastecimiento de la población (factor R_{1P}) la mayor parte de la población depende, en la actualidad, exclusivamente de los recursos de la sierra, lo cual no quiere decir que no dispongan de otros sistemas de abastecimiento para garantizar el suministro de agua a la población. En color amarillo (mapa 7M del anexo cartográfico) se han marcado aquellos núcleos urbanos que utilizan el agua del acuífero complementariamente a otros recursos, caso de Benalmádena Costa y La Capellanía, en Benalmádena, Campo Mijas y El Coto en Mijas y los núcleos de Torremolinos. El resto, núcleos marcados en color rojo, realizan un uso exclusivo del acuífero, lo que implica una vulnerabilidad mayor en función de este factor. En este punto cabe señalar que la localidad de Torremolinos se ha considerado que hace un uso complementario del acuífero porque está conectada a la infraestructura de abastecimiento procedente del embalse de La Concepción pero, actualmente, el abastecimiento se realiza exclusivamente con agua de la sierra de Mijas.

En cuanto al factor R_{2P} , no hay una elevada vulnerabilidad. Las entidades con mayor porcentaje de población vulnerable (niños y ancianos) están localizadas en la parte occidental de la sierra dentro de los municipios de Alhaurín el Grande y Mijas (mapa 7M del anexo cartográfico). En la mitad oriental de la sierra, la población es menos vulnerable en función de la edad.

El resultado final de la vulnerabilidad de la población frente a la contaminación del agua subterránea es muy variable según las características de cada núcleo de población aunque, en ningún caso, se supera un valor de vulnerabilidad de clase Moderada (mapa 19M y mapa 7M anexo cartográfico).

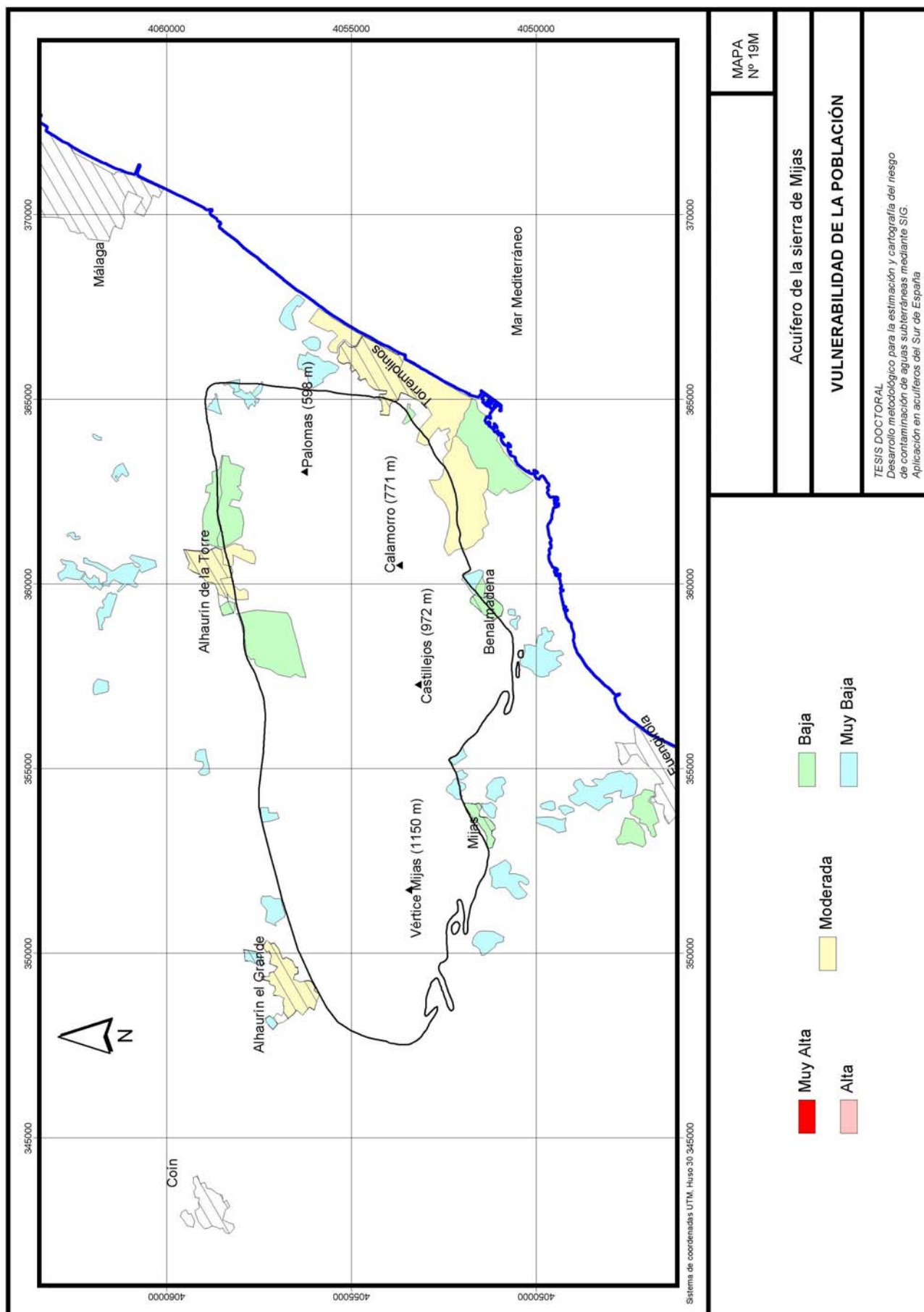
Alhaurín el Grande, Alhaurín de la Torre, Torremolinos y Arroyo de la Miel son núcleos de población con un grado de vulnerabilidad de clase Moderada. Mijas, El Coto, Campo Mijas, Benalmádena, Benalmádena Costa, La Colina, Los Álamos, Los Tomillares y Pinos de Alhaurín (ver localización en figura 9.17) tienen un grado de vulnerabilidad de clase Baja. El resto son pequeños núcleos de población con vulnerabilidad Muy Baja.

El caso de Benalmádena Costa es un ejemplo de cómo la utilización de varios recursos para el abastecimiento de la población reduce el riesgo. En Benalmádena Costa se utiliza agua procedente del embalse de la Concepción (Istán) para garantizar el abastecimiento de agua a la población, lo cual implica un menor uso del agua de la sierra de Mijas y un menor riesgo de contaminación para la población.

El núcleo de Los Tomillares (al Este de Alhaurín de la Torre) tiene una vulnerabilidad de clase Baja, debido a que su población utiliza sistemas de abastecimiento diferentes (factor R_{1P}) según la sección que se analice de ese núcleo. El sector meridional tiene una infraestructura de tipo compleja y básica, es decir, utiliza agua de los sondeos de la empresa de abastecimiento (infraestructura compleja) y también tiene la posibilidad de explotar agua subterránea en sus propios sondeos (infraestructura básica). En cambio, la mitad septentrional de Los Tomillares sólo dispone de una infraestructura de tipo compleja. Esto conlleva que se diferencien en la cartografía ambos sectores y que se divida la población expuesta, lo que reduce el grado de vulnerabilidad. Este es un caso similar al que ocurre entre Benalmádena Costa y Arroyo de la Miel; ambas entidades de población son continuas en el espacio, pero han sido diferenciadas según el tipo de abastecimiento.

En función de los factores de resistencia (R_{1P} y R_{2P}) la población expuesta menos vulnerable es la de El Romeral y Peñon-Molina (en el municipio de Alhaurín de la Torre), El Pinar (Torremolinos), Arroyo de la Miel, Benalmádena Costa y La Capellanía (en el municipio de Benalmádena), Las Terrazas, Las Lomas, Haza del Algarrobo, La Capellanía y La Alquería en el municipio de Mijas y Torremolinos (mapa 7M del anexo).

Torremolinos es un caso especial en el análisis que se ha realizado. Esta localidad tiene una infraestructura de abastecimiento que le permitiría obtener agua de la presa de la Concepción de Istán en caso de necesidad, pero actualmente sólo utiliza el agua de la sierra de Mijas por cuestiones económicas. Esto quiere decir, que si se interpretara el uso del acuífero como exclusivo, la vulnerabilidad de la población de Torremolinos sería mayor (casi el doble).



9.4.2. VULNERABILIDAD DE LA ACTIVIDAD PRODUCTIVA V_{AG} : AGRICULTURA

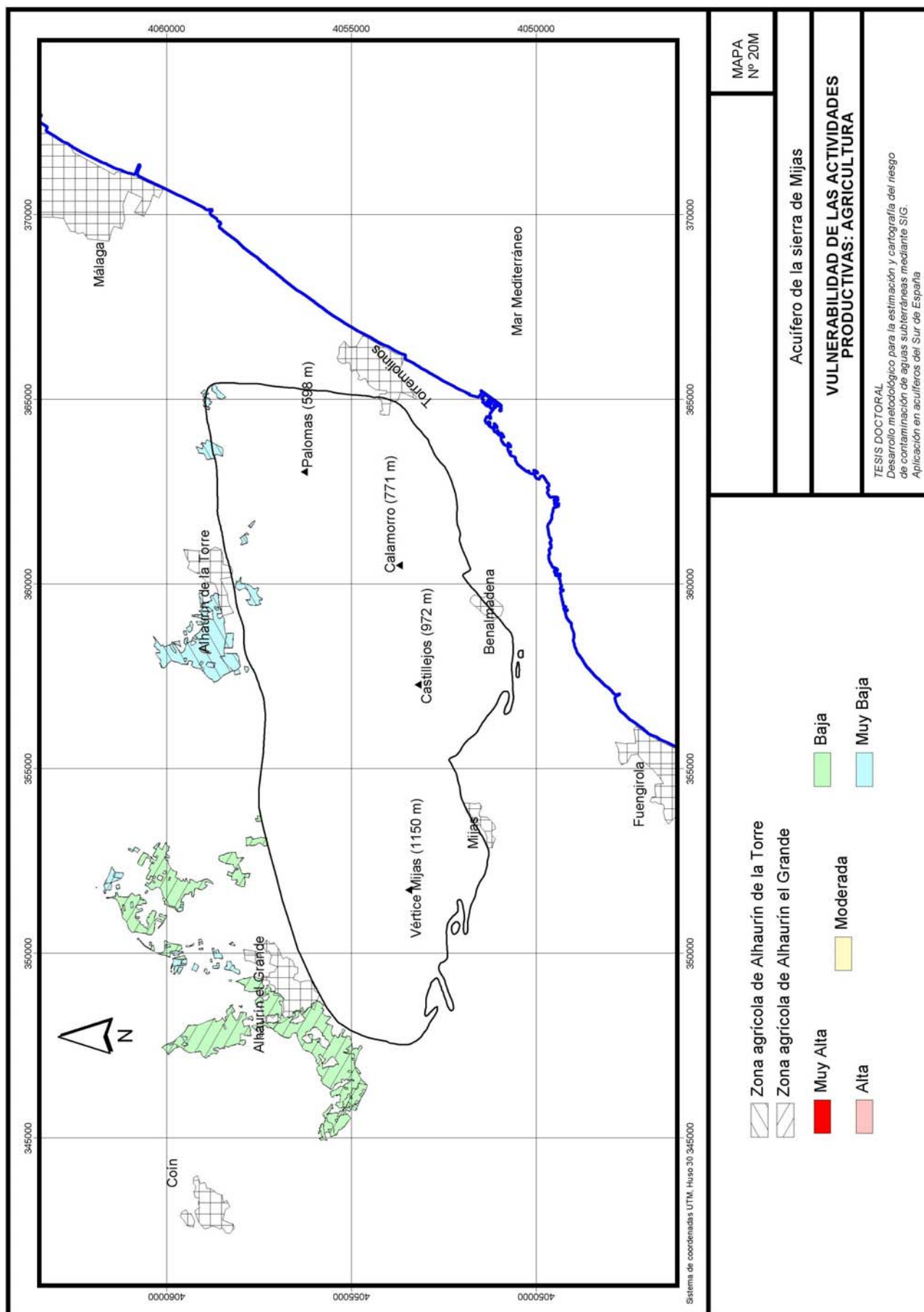
La actividad agrícola dependiente de los recursos de la sierra de Mijas no presenta una vulnerabilidad elevada (mapa 20M y mapa 8M del anexo cartográfico), debido a la escasa cantidad de superficie que se riega con agua subterránea procedente de la sierra de Mijas.

En conjunto, la vulnerabilidad de la actividad agrícola es de clase Baja o Muy Baja. Las zonas relativamente más vulnerables (clase Baja) se localizan al noroeste de la sierra de Mijas, en el municipio de Alhaurín el Grande, y las menos vulnerables (clase Muy Baja) alrededor de la localidad de Alhaurín de la Torre.

En Alhaurín el Grande se cultivan principalmente, cítricos y productos hortícolas. En general, no representan una elevada vulnerabilidad debido a que la rentabilidad socioeconómica es baja. Los cultivos más rentables desde un punto de vista económico y social, es decir, beneficios económicos generados y jornales necesarios, son los productos hortícolas. En contraposición, los cultivos menos rentables son los cítricos. La baja rentabilidad socioeconómica (factor R_{2AG}) de las explotaciones agrícolas en esta zona es una de las razones por la que la superficie de cultivos expuesta no presenta mayor vulnerabilidad.

En las explotaciones de Alhaurín de la Torre regadas con aguas de la sierra se cultivan frutales y, en menor medida, cítricos. En general, los valores de E_{AG} (exposición según hectáreas regadas de cada tipo de cultivo) no son elevados a excepción de los cítricos (mapa 8M del anexo), pero la vulnerabilidad es baja por la escasa rentabilidad socioeconómica de estos cultivos. En comparación con los valores de rentabilidad (R_{2AG}) obtenidos para los cultivos de Alhaurín el Grande, en Alhaurín de la Torre hay una mayor rentabilidad de las explotaciones agrícolas, aunque no lo suficientemente elevada como para establecer una vulnerabilidad elevada, lo que disminuye su importancia como actividad productiva y se reduce la vulnerabilidad de los cultivos expuestos.

El factor R_{1AG} (tipo de abastecimiento) no establece diferencias en la vulnerabilidad, dado que se han analizado sólo aquellas explotaciones que dependen de los recursos de la sierra. Las explotaciones agrícolas están agrupadas en comunidades de regantes, que en los casos analizados no disponen de infraestructuras de tipo compleja y sólo utilizan agua de un único punto. Por tanto, toda la superficie regada con aguas subterráneas se ha evaluado con un valor 1.



9.4.3. VULNERABILIDAD DE LA ACTIVIDAD PRODUCTIVA V_{ST} : HOSTELERÍA Y OTROS

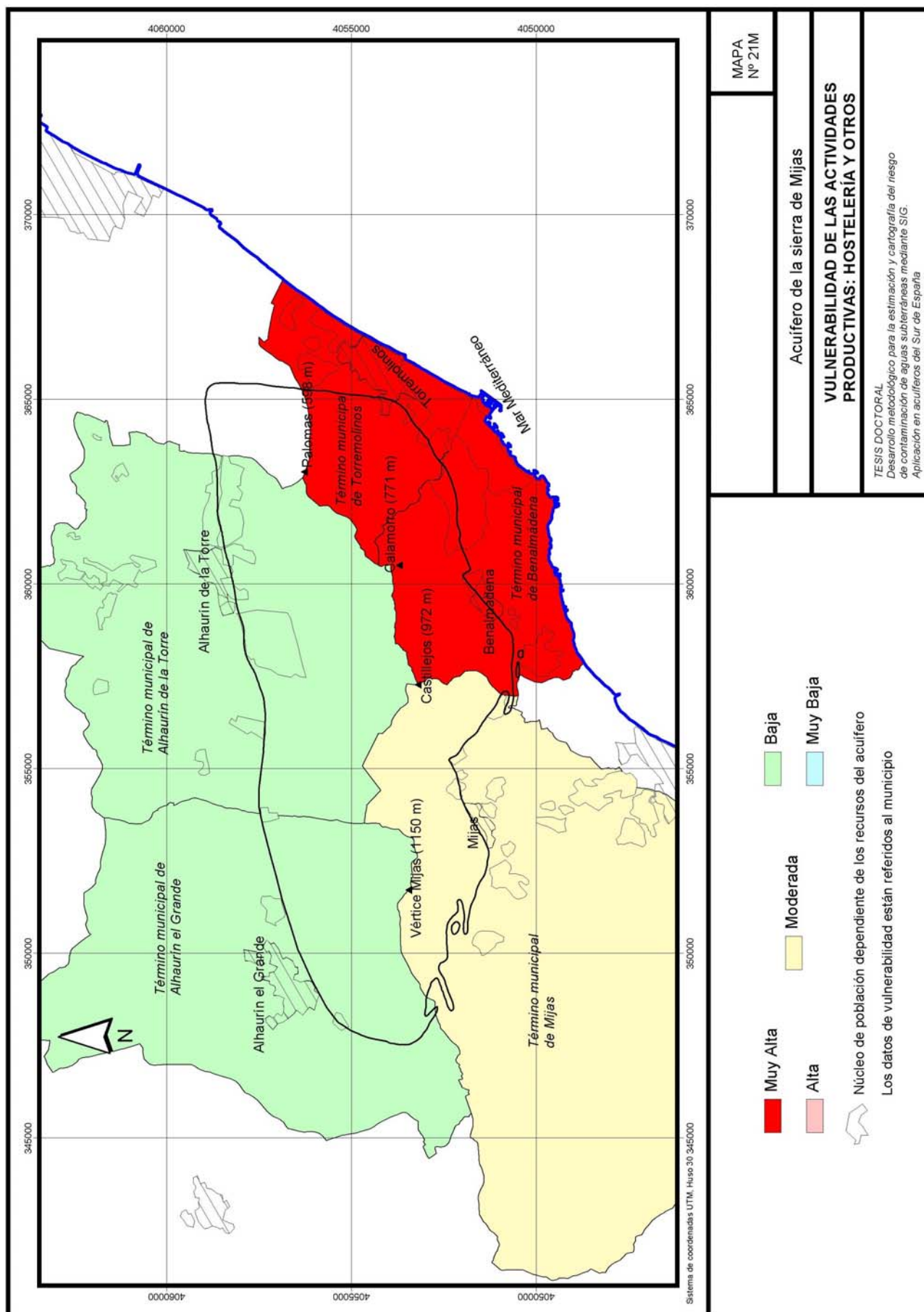
Las actividades productivas que se han incluido en este epígrafe son las relacionadas con la hostelería (2093 establecimientos), una empresa de envasado de agua del acuífero de la sierra de Mijas, un parque de atracciones acuático y dos campos de golf. En conjunto, el número de establecimientos dependientes de los recursos de la sierra de Mijas es 2097. Por tanto, el grado de exposición de estas actividades del medio humano es elevado, aunque a escala municipal se observa que en Alhaurín de la Torre y Alhaurín el Grande la exposición es menor (mapa 8M del anexo) y en Mijas se sitúa en una posición intermedia. Los municipios de Benalmádena y Torremolinos son los que concentran la mayor parte de los establecimientos y los que tienen una mayor exposición.

Los datos anteriores, a escala municipal, no denotan la exposición real de las actividades. Por ejemplo, en Mijas y Benalmádena, no todo el municipio se abastece con agua de la sierra, es decir, hay sectores urbanizados en estos municipios cuyo abastecimiento depende de otras fuentes. No obstante, una gran parte de la actividad hostelera depende del agua de la sierra.

El factor R_{1ST} en Benalmádena y Mijas ha sido interpretado como un sistema de abastecimiento de tipo complejo y complementario a otros recursos (valor 0,5), dado que se utiliza agua de la presa de la Concepción para el abastecimiento de la costa, mientras que el resto del municipio se abastece a partir de los sondeos de la sierra. En Alhaurín el Grande y Alhaurín de la Torre el abastecimiento se ha considerado de tipo exclusivo y complejo (0,9) y en Torremolinos de tipo complementario y complejo (valor del factor R_{1ST} igual 0,5).

El factor R_{2ST} se ha estimado a partir de los datos del censo de locales de Andalucía de 1990, corregidos con un factor de ponderación obtenido a partir del incremento en el número de establecimientos hosteleros con respecto al año 2001, y los salarios según el convenio colectivo vigente. Los resultados muestran que los municipios más vulnerables según el factor R_{2ST} son los de la costa (Mijas, Benalmádena y Torremolinos) y los menos vulnerables los del interior (mapa 8M del anexo).

El mapa de vulnerabilidad resultante (mapa 21M y 9M del anexo) muestra que los municipios más vulnerables son Benalmádena y Torremolinos, con un grado de vulnerabilidad de clase Alta. La hostelería es un sector clave en la economía de los núcleos de población costeros, por lo que cualquier interferencia en su sistema productivo, como el que podría derivarse de un evento de contaminación del agua, conllevaría unas consecuencias graves para la economía de la zona. Los municipios con un menor grado de vulnerabilidad, concretamente Bajo, son Alhaurín el Grande y Alhaurín de la Torre, situados en la vertiente septentrional de la sierra, donde la actividad hostelera es menor que en la costa. Mijas presenta una vulnerabilidad de clase intermedia; en este municipio la actividad turística es importante, pero afecta principalmente al sector costero, el cual se abastece con recursos externos al acuífero.



9.4.4. VULNERABILIDAD DEL MEDIO HUMANO

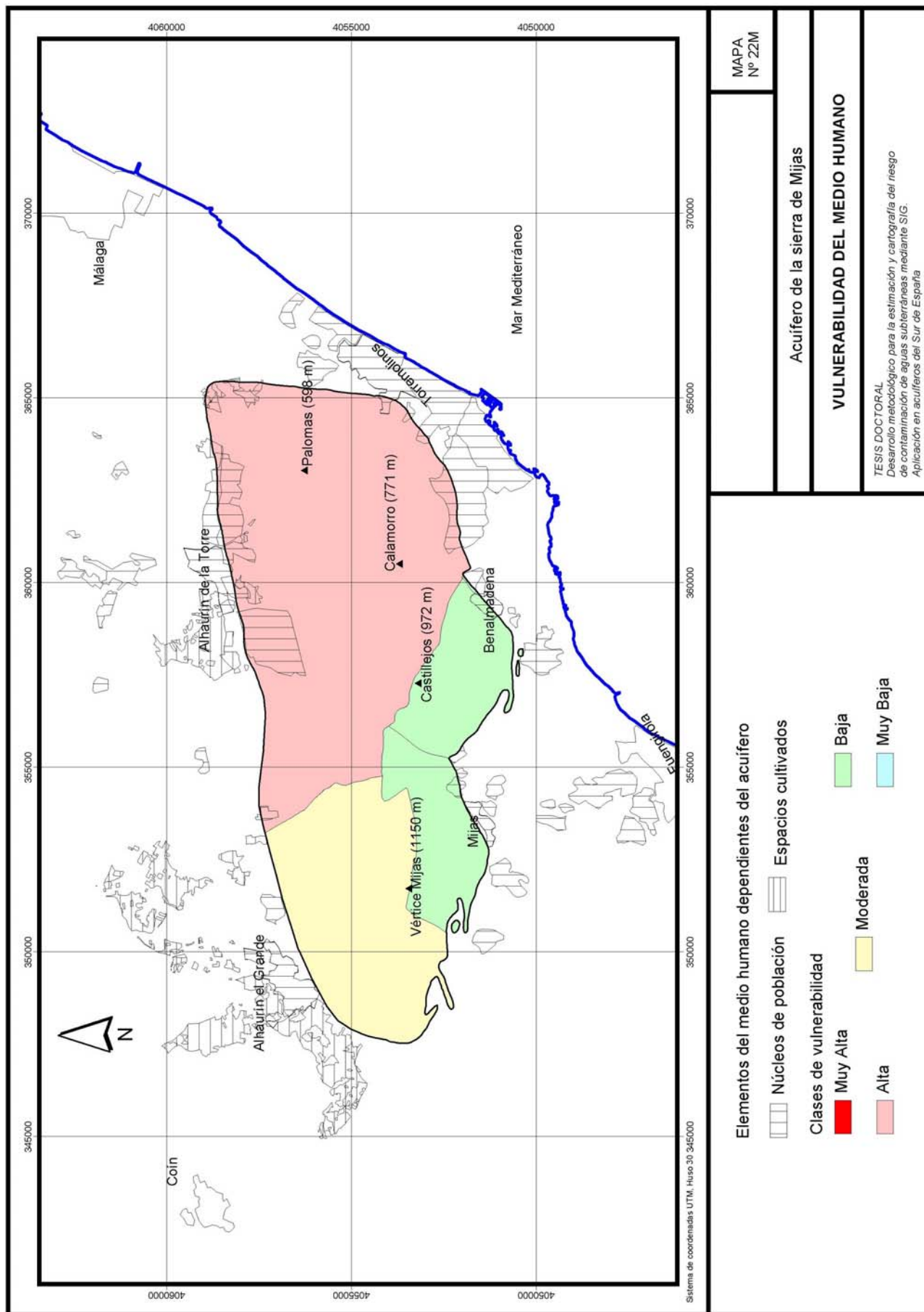
Los distintos elementos del medio humano expuestos a un evento de contaminación de las aguas subterráneas dan un valor al acuífero variable según el grado de vulnerabilidad del sistema del que dependan. En la sierra de Mijas se diferencian cuatro sistemas acuíferos, cuyas aguas tienen un valor variable de vulnerabilidad del medio humano.

El total de personas expuestas, es decir, dependientes de los recursos de la sierra de Mijas asciende a 130660 repartidos de la siguiente forma: 96975 en el sistema de Torremolinos, 14472 en Alhaurín el Grande, 15309 en el de Mijas y 3904 en el de Benalmádena. La superficie de cultivos que dependen de los recursos de la sierra de Mijas es de 1100 ha. Si se diferencia por sistemas de la sierra de Mijas: 815 ha dependen del de Alhaurín el Grande y 285 de Torremolinos. Las actividades productivas suman 1678 dependientes del acuífero de Benalmádena y Torremolinos, 89 de Alhaurín el Grande y 327 de Mijas.

En el mapa 22M se muestra la vulnerabilidad del medio humano para cada uno de los sistemas acuíferos de la sierra de Mijas. El acuífero de Torremolinos es el que presenta mayor vulnerabilidad, concretamente un grado de clase Alta, debido a que el volumen de población expuesta y la actividad económica dependiente de los recursos es la más elevada a la par que tienen un grado de resistencia menor.

Los acuíferos de Benalmádena y Mijas son los que presentan una menor vulnerabilidad del medio humano, dado que la actividad agropecuaria es, prácticamente, nula y el volumen de población y actividades productivas expuesto es bajo. Además, no hay una dependencia exclusiva de las aguas del acuífero puesto que se utilizan recursos procedentes del embalse de la Concepción.

El sistema de Alhaurín el Grande presenta una situación intermedia respecto a los otros sistemas de la sierra de Mijas. En este sistema, hay una especial influencia de la actividad agrícola en el grado de vulnerabilidad, la cual es la más importante de toda la que se desarrolla en la sierra de Mijas. Si a ello se le une el hecho de que en Alhaurín el Grande se concentran casi 15000 personas, el resultado es una vulnerabilidad del medio humano de clase Moderada.



9.5. CARTOGRAFÍA DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL ACUÍFERO DE LA SIERRA DE MIJAS

En el acuífero de la sierra de Mijas, hay riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en un 15% de su superficie. El grado de riesgo predominante es de clase Moderado, dado que el 80 % de la superficie de la sierra tiene esta clase de riesgo (figura 9.28). El resto es de clase Bajo y, excepcionalmente, algunos puntos tienen un grado de riesgo de clase Alto.

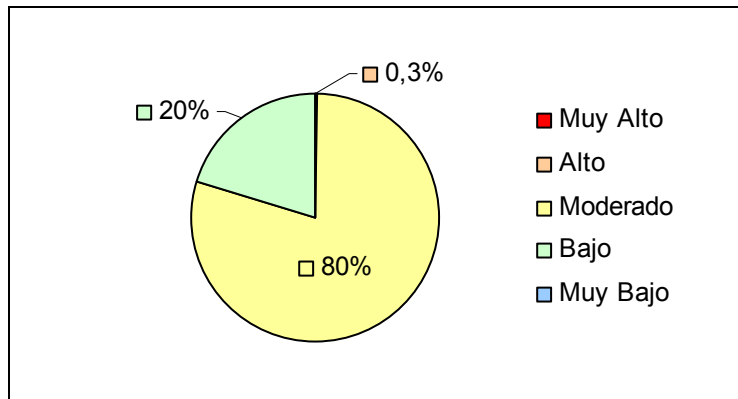
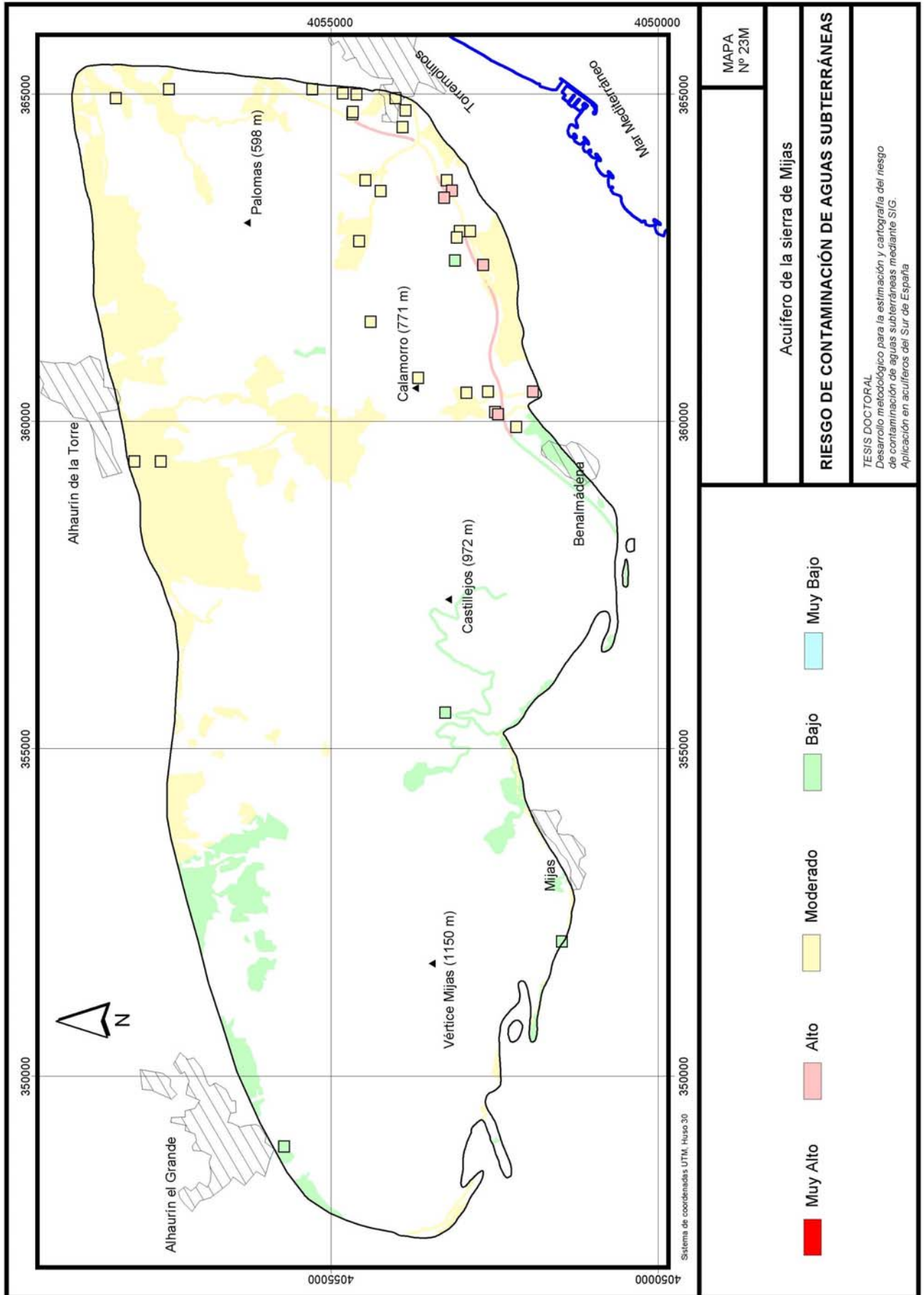


Figura 9.28. Superficie del acuífero de la sierra de Mijas según clase de riesgo.

Las zonas de mayor riesgo en la sierra de Mijas (mapa 23M y 10M del anexo) están asociadas a gasolineras y carreteras. Al Este de Benalmádena hay una elevada concentración de establos en los que se acumulan indiscriminadamente grandes cantidades de excrementos sobre el acuífero, que también muestran un riesgo de clase Alto. Este elevado riesgo tiene especial trascendencia si se tiene en cuenta que, en años anteriores, se detectaron casos de fiebre tifoidea asociada a los residuos orgánicos de unas cuerdas localizadas muy cerca de los puntos de abastecimiento de Benalmádena, según datos aportados por el distrito sanitario de la Costa del Sol y la empresa de aguas del municipio de Benalmádena.

La autovía A7 a su paso por Arroyo de la Miel y Torremolinos tiene un grado de riesgo de clase Alto, debido a la mayor vulnerabilidad intrínseca del acuífero en esos tramos, ya que se corresponden con zonas donde el espesor de zona no saturada es menor. En el resto de tramos de la autovía A7 el riesgo es Moderado allí donde la dependencia de las aguas subterráneas es mayor, lo que aumenta el valor de las mismas, y Bajo a su paso por el acuífero de Benalmádena donde la menor utilización de las aguas disminuye el grado de riesgo.

Las gasolineras se localizan en zonas de elevada vulnerabilidad de un acuífero del que se tiene una elevada dependencia de sus recursos, como es el caso de Torremolinos lo cual aumenta el grado de riesgo hasta la clase Alta.



En el resto del acuífero de la sierra de Mijas predomina el riesgo Moderado, aunque se pueden diferenciar dos sectores. Por un lado la mitad oriental de la sierra donde hay una mayor proporción de zonas con riesgo de contaminación de las aguas subterráneas. Este sector es el más cercano a los principales núcleos de población de la sierra, donde la presión del hombre sobre el medio es más acuciante. Además, la importancia del riesgo en esta mitad oriental es mayor, concretamente, de clase Moderada. Por otra parte, se podría diferenciar una mitad occidental donde hay una menor concentración de zonas de riesgo sobre el acuífero, y que además tienen menor importancia, porque el grado de riesgo predominante es de clase Bajo (mapa 23M y mapa 10M del anexo).

La marcada diferenciación en el grado de riesgo entre un sector y otro del acuífero está motivada, principalmente, por la exposición, tanto de recursos hídricos subterráneos, como de elementos del medio humano dependientes de los recursos. En ambos casos, la peligrosidad de las actividades humanas sobre el acuífero es, en general, Baja (mapa 10M del anexo).

La mitad oriental de la sierra se corresponde, prácticamente, con el sistema de Torremolinos, el cual tiene importantes recursos (más de 30 hm³ en un año húmedo) que posibilitan el abastecimiento de casi 100000 personas repartidas en los términos municipales de Torremolinos, Benalmádena y Alhaurín de la Torre. El hecho de utilizar el agua del acuífero de forma complementaria a otros recursos para abastecer a esa población dependiente, reduce la exposición de la población a la mitad y con ello el riesgo hasta un grado de clase Moderado.

La actividad agropecuaria de la sierra, en general, muestra un grado de riesgo Bajo, mientras que el resto de actividades humanas supone un riesgo variable en función de la dependencia del agua subterránea que haya en cada acuífero.

**10. EVALUACIÓN Y CARTOGRAFÍA DEL RIESGO DE
CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS
DEL ACUÍFERO DEL RÍO VÉLEZ**

10.1. CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO FÍSICO Y HUMANO DEL ACUÍFERO DEL RÍO VÉLEZ

10.1.1. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El acuífero del río Vélez se localiza en la parte centro oriental de la provincia de Málaga, concretamente, en la comarca de la Axarquía en el tramo final del río del mismo nombre (figura 10.1), entre los núcleos urbanos de La Viñuela al Norte, Vélez-Málaga al Este, Torre del Mar al Sur y Benamocarra al Oeste. Ocupa una extensión de 20 km², representada en la hoja 1054 del Instituto Geográfico Nacional a escala 1/50.000. El mapa Topográfico de Andalucía, a escala 1/10.000, incluye el acuífero del río Vélez en las hojas 1054 (1-1), 1054 (1-2), 1054 (1-3), 1054 (2-1), 1054 (2-2), y 1054 (2-3), entre las coordenadas UTM: 394000-4077000 y 405000-4064000.

El acuífero se encuentra en un valle de dirección norte-sur de 1'5 km de anchura en su punto más amplio, cuyo extremo sur se abre en forma de abanico formando el delta del río y el extremo norte queda configurado en forma de "V" por la confluencia con el río Benamargosa, su principal afluente (mapa 1V). Los elementos naturales y humanos más destacados de su entorno son el Mar Mediterráneo al Sur, los Montes de Málaga al Oeste, la presa de La Viñuela al Norte y las estribaciones occidentales de la sierra Tejeda-Almijara al Este. Las principales carreteras son la Autovía del Mediterráneo (E-15) que ha relegado a un segundo plano la antigua carretera Nacional 340, ambas situadas en la parte sur del acuífero, la carretera comarcal A-335 en el norte y la carretera provincial MA-135 al Oeste.

El acuífero ha sido catalogado como Paisaje Singular Agrario AG3 dentro del Plan Especial de Protección del Medio Físico de la Provincia de Málaga. Esta figura de protección busca el mantenimiento y fomento de las artes agrícolas tradicionales y frenar la ocupación por usos o actividades que impacten en su función productiva, principalmente el uso residencial, con el que entra en conflicto a través de diversos factores como el recurso agua, infraestructuras o calidad paisajística.

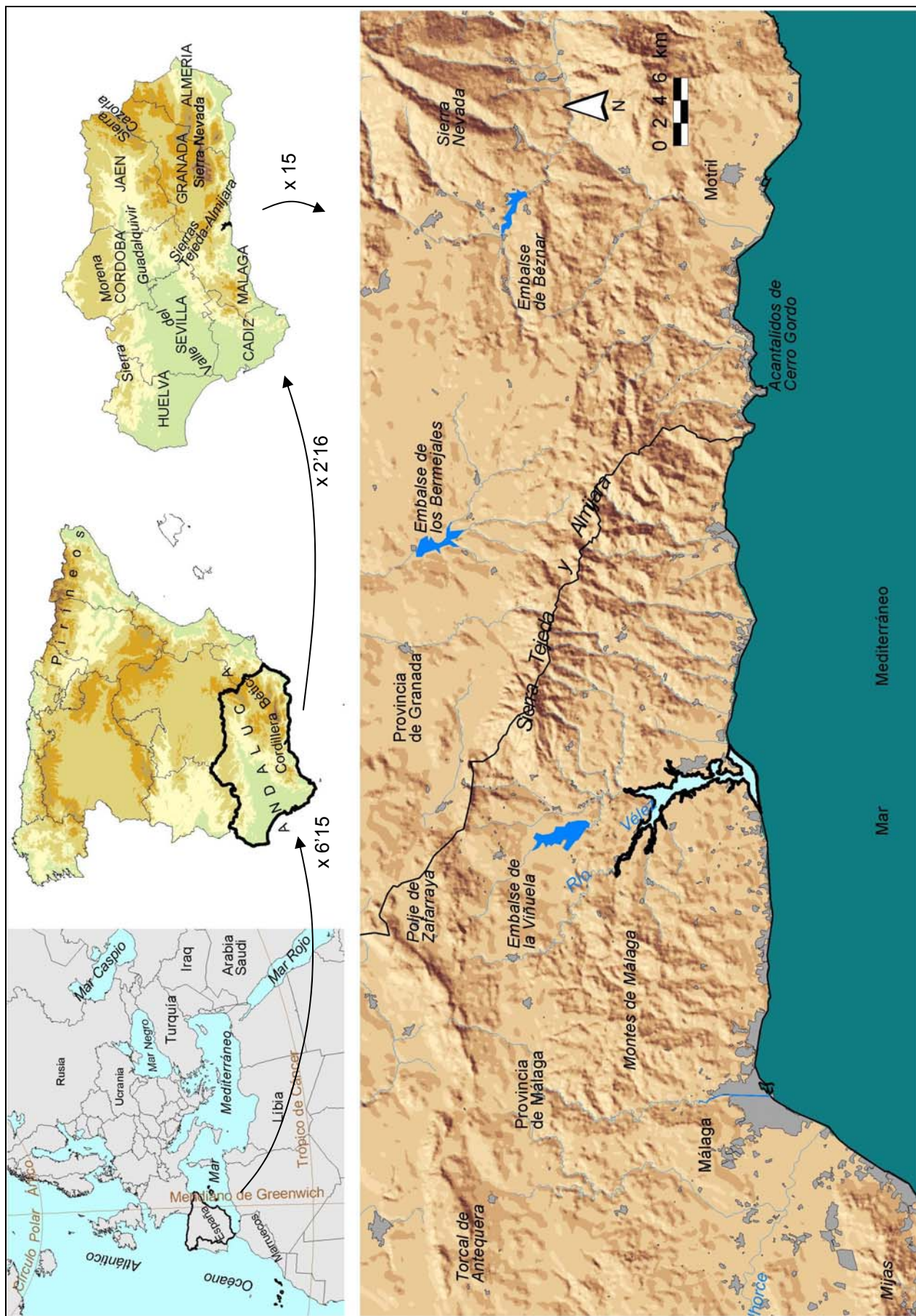
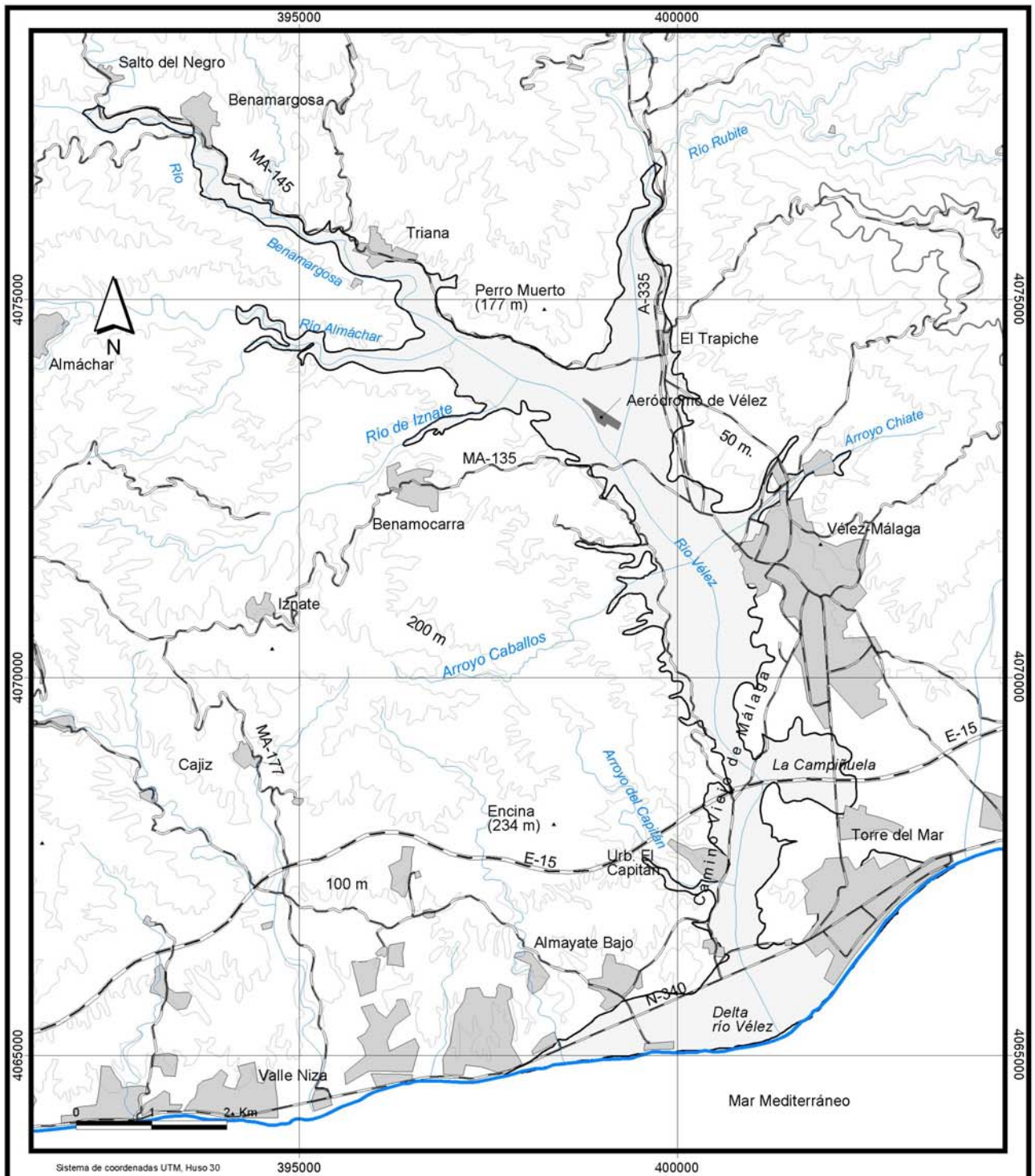


Figura 10.1. Localización del acuífero del río Vélez.



Sistema de coordenadas UTM, Huso 30

▲ Vértice geodésico	— Línea de costa	Fuente: Mapa Digital de Andalucía (1999)	MAPA Nº 1V
— Ríos y arroyos	— Ferrocarril	Acuífero del río Vélez	
— Curva de nivel Equidistancia 100 m	— Carretera	TOPOGRÁFICO	
— Curva de nivel maestra (500 m)	■ Área Urbanizada	<p><i>TESIS DOCTORAL</i> Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España</p>	
	■ Área de estudio		

10.1.2. RELIEVE: ALTITUD Y PENDIENTE

El río Vélez es el principal cauce de la comarca de la Axarquía y su cuenca hidrográfica con 610 km², equivale al 60 % de la comarca. El tramo final del río Vélez donde se localiza el acuífero homónimo, tiene una topografía plana, propia de la llanura de inundación de los ríos, mientras que el resto de la cuenca está constituida por un relieve montañoso (Mapa 2V).

La altitud media del acuífero es de 25 m s.n.m. y varía entre 130 m s.n.m. al norte, en el sector del río Benamargosa, junto a la localidad del mismo nombre, y el nivel de mar en el delta del río, en la parte sur (mapa 3V). Una cuarta parte del acuífero está por debajo de 10 m s.n.m. (figura 10.2 izquierda), concretamente la parte sur, desde el delta hasta el arroyo de El Capitán. Entre 10 y 50 m s.n.m. se encuentra la mitad del acuífero, desde el arroyo de El Capitán hasta la confluencia del río Vélez con el río Benamargosa. En los afluentes Benamargosa, Almáchar, Iznate y arroyo Chiate se encuentran las mayores alturas, por encima de 50 m.

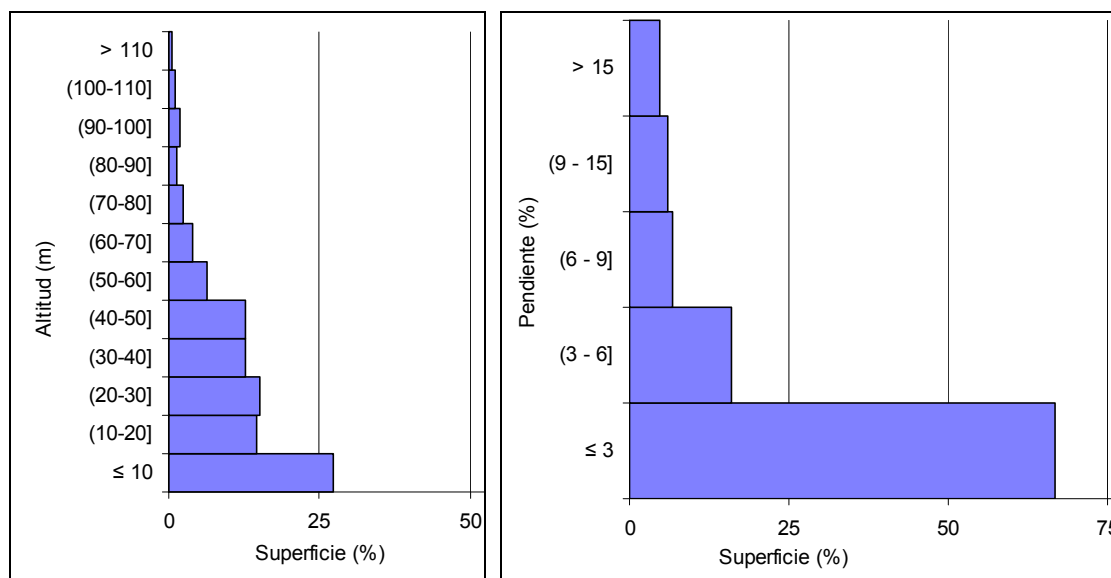
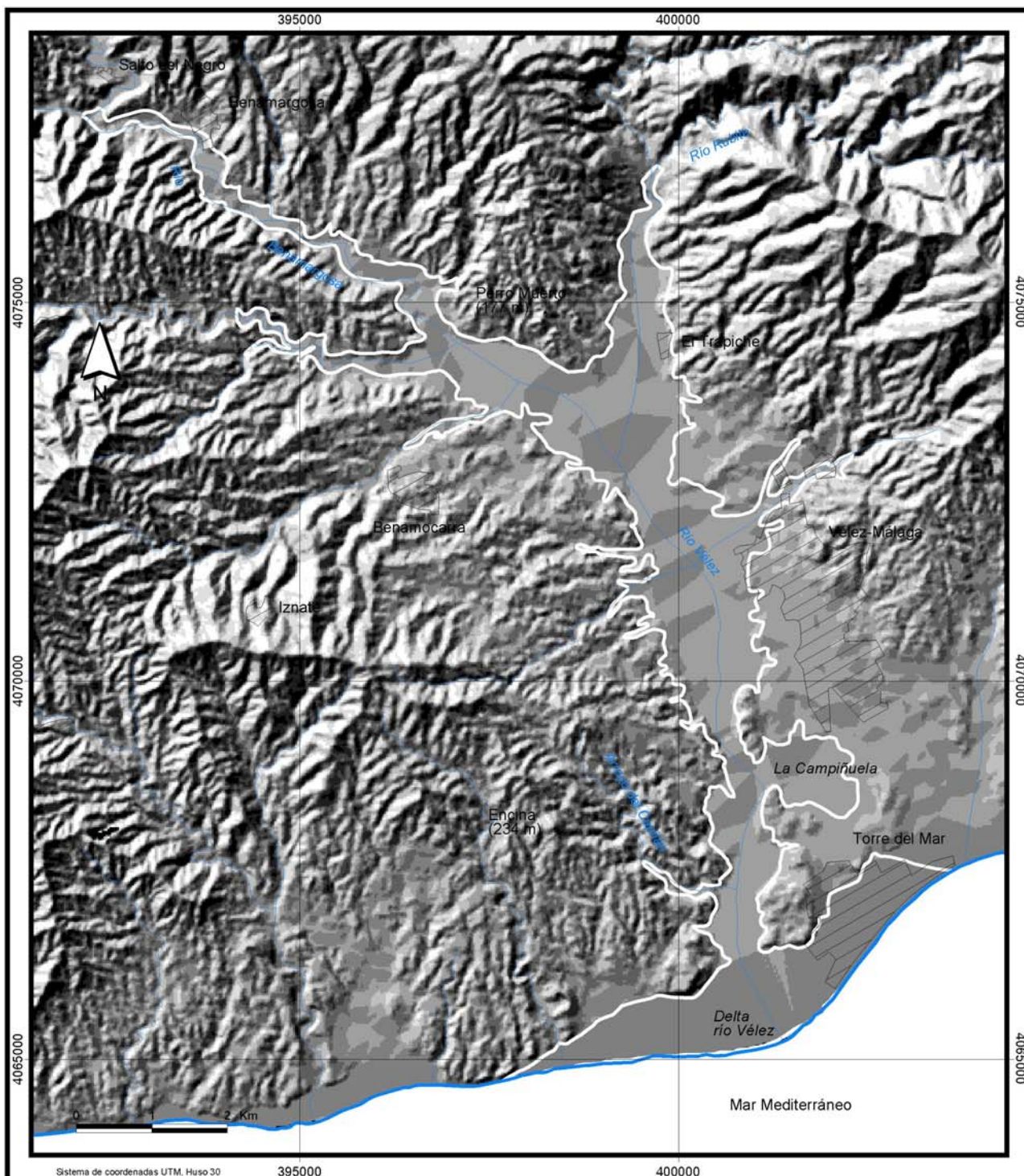


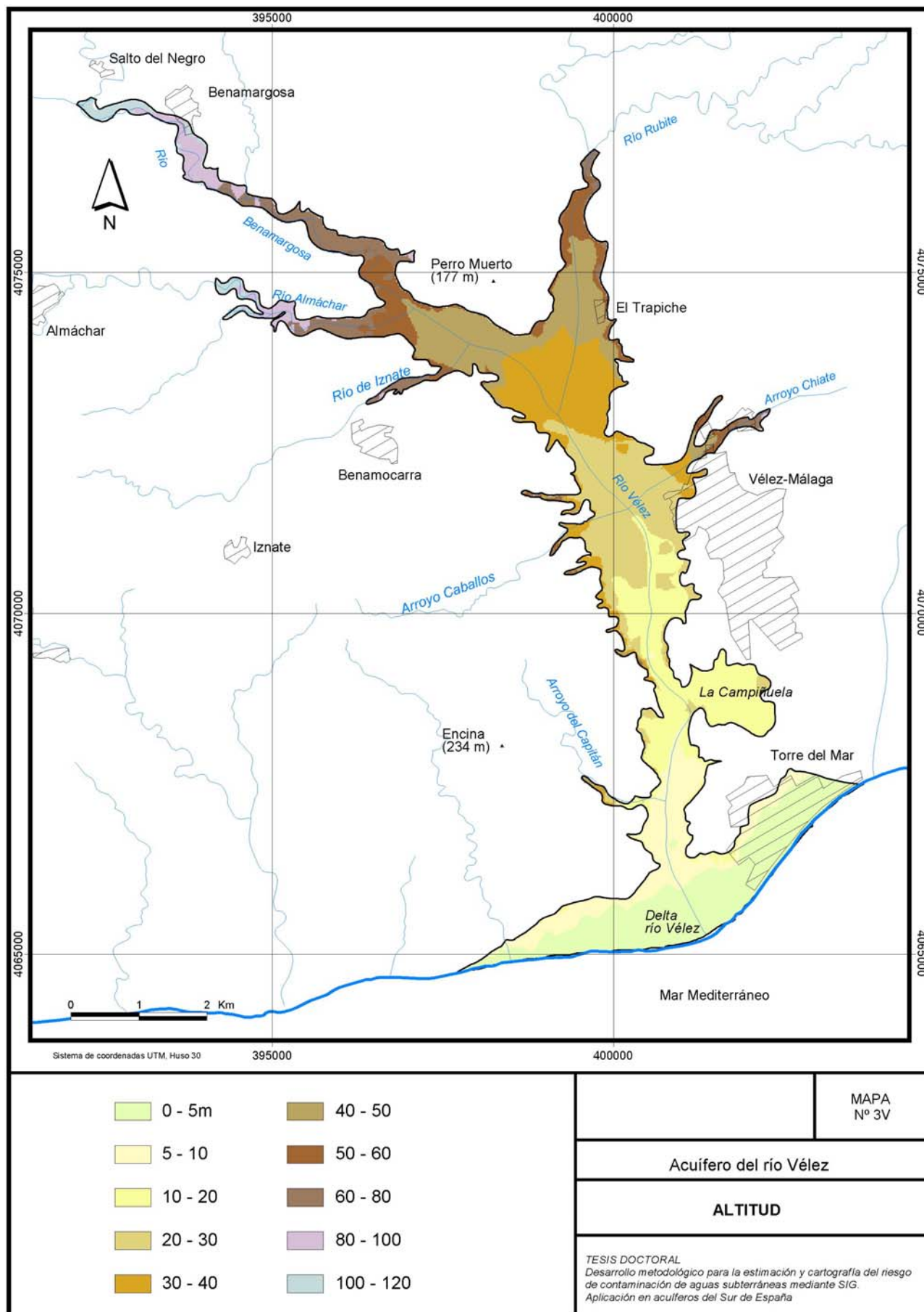
Figura 10.2. Porcentaje de superficie del acuífero del río Vélez en función de la altitud (izquierda) y la pendiente (derecha).

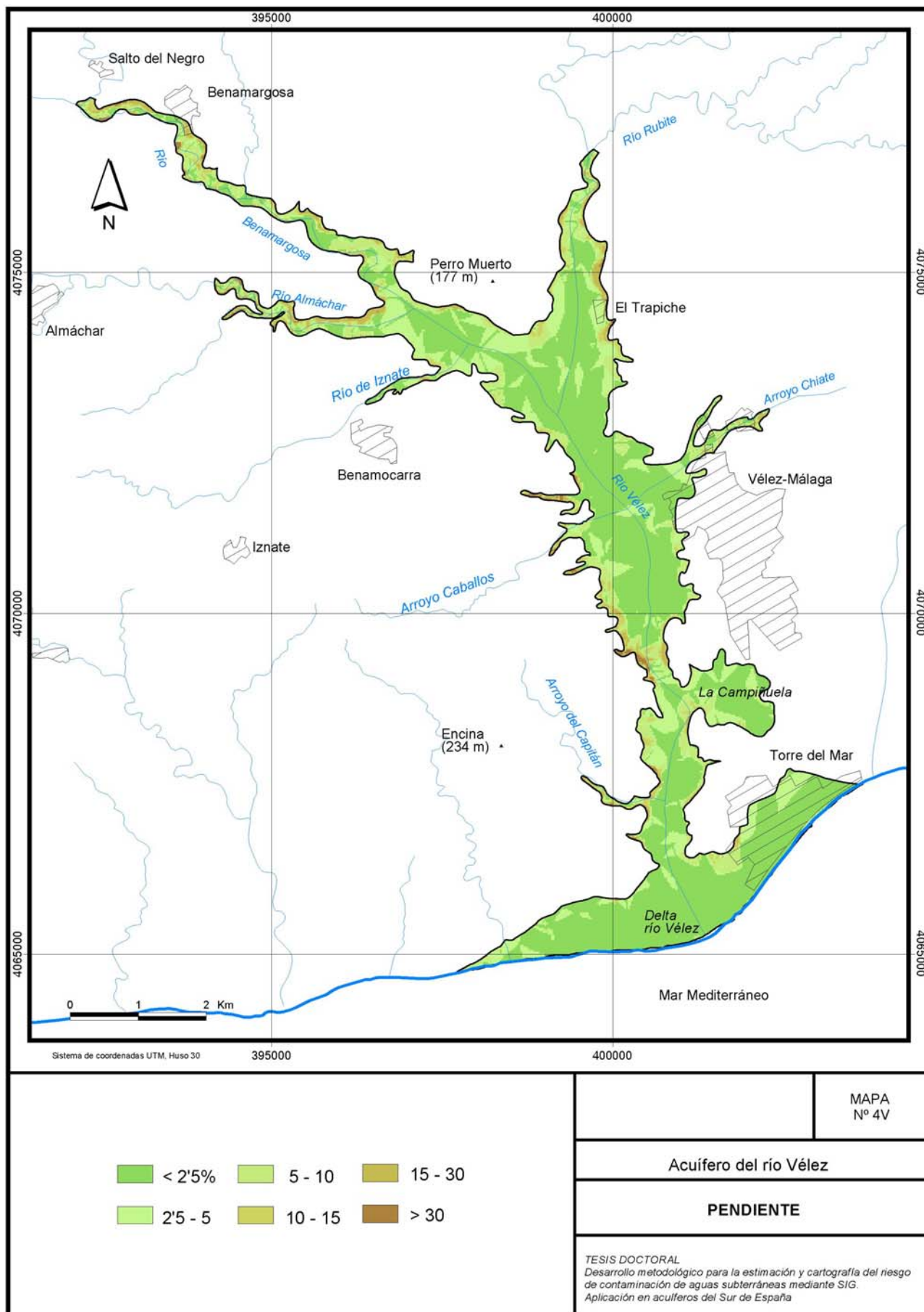
La topografía es prácticamente plana, de forma que dos tercios de la superficie del acuífero tienen una pendiente inferior al 3 % y, solamente en un 10 % hay mayor pendiente (figura 10.2 derecha). Las zonas de mayor pendiente se localizan hacia los bordes del acuífero y al sur de la Campiñuela, área de mayor estrechamiento del valle, donde se alcanza un 10 % de pendiente (mapa 4V).



Sistema de coordenadas UTM, Huso 30

Valores de iluminación Azimut: 315° Altitud: 45°	MAPA Nº 2V	
	Acuífero del río Vélez	
	RELIEVE	
	TESIS DOCTORAL Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España	





10.1.3. CLIMA: PRECIPITACIÓN

10.1.3.1. INVENTARIO DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS

El análisis de la precipitación se ha llevado a cabo para una serie histórica de 30 años, entre 1970 y 2000, a partir de los datos de Confederación Hidrográfica del Sur de España, en un total de 5 estaciones (cuadro 10.1), cuya localización se muestra en la figura 10.3.

Estación meteorológica	Altitud (m)	UTM	
		X	Y
Algarrobo "La Mayora"	80	407111	4070330
Benamargosa	96	393684	4077267
Benamocarra	126	396473	4072301
Vélez-Málaga	165	401421	4071472
La Viñuela	130	398784	4079054

Cuadro 10.1. Estaciones meteorológicas en el acuífero del río Vélez.

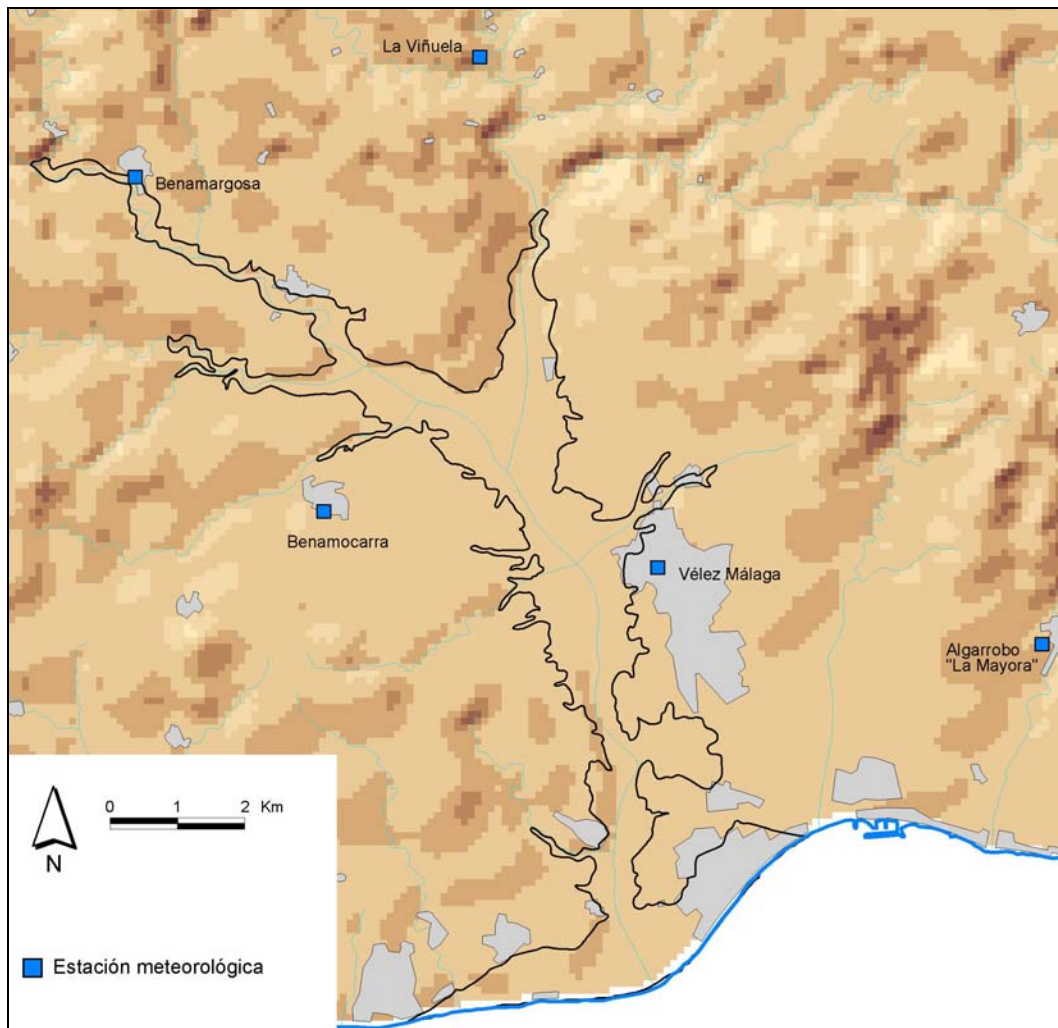


Figura 10.3. Localización de estaciones meteorológicas cerca del acuífero del río Vélez.

10.1.3.2. ANÁLISIS DE LAS PRECIPITACIONES

La serie histórica se ha completado mediante la expresión recogida en Claver (coord.) (1991). A continuación se han clasificado los años en húmedos o secos en función de que la precipitación anual sea un 15 % superior o inferior a la media, respectivamente (cuadro 10.2).

Años	Algarrobo "La Mayora"	Benamargosa	Benamocarra	Vélez-Málaga	La Viñuela	Acuífero del río Vélez
1970/71	620	645	758	497	687	642
1971/72	477	494	761	408	495	528
1972/73	521	657	604	570	650	601
1973/74	498	491	494	399	511	479
1974/75	399	377	518	327	396	404
1975/76	615	519	574	432	573	543
1976/77	603	651	726	609	754	669
1977/78	530	673	761	520	731	643
1978/79	500	785	850	618	786	709
1979/80	450	590	625	461	515	530
1980/81	426	493	511	385	435	452
1981/82	417	440	545	323	517	449
1982/83	256	387	373	185	294	300
1983/84	559	639	870	611	564	649
1984/85	296	424	599	374	435	426
1985/86	373	359	516	355	320	385
1986/87	527	527	621	568	499	549
1987/88	385	419	587	352	464	442
1988/89	389	463	460	169	397	376
1989/90	763	1095	870	661	501	778
1990/91	420	473	397	390	422	350
1991/92	275	415	373	332	333	346
1992/93	316	406	378	298	300	340
1993/94	423	585	419	437	445	462
1994/95	135	262	184	198	198	196
1995/96	754	1137	843	819	883	888
1996/97	886	1024	976	986	834	942
1997/98	574	832	641	648	769	693
1998/99	252	329	320	283	262	290
1999/00	444	477	487	505	503	484
Promedio ¹	469	563	588	439	516	491
Promedio ² corregido	469	569	588	446	516	494
Año húmedo	540	655	676	513	593	568
Año seco	399	484	500	379	438	420

Cuadro 10.2. Datos de lluvia de las estaciones seleccionadas para el análisis de la precipitación. En negrita se han marcado los valores estimados. En azul se han resaltado los años húmedos y en amarillo los años secos. En la parte baja del cuadro se muestran los valores medios de las series de datos, sin los valores estimados (1) y con los valores estimados (2), y los valores límite de precipitación para considerar los años húmedos y secos.

La precipitación media de las estaciones analizadas en el valle del río Vélez es 500 mm, aproximadamente. Las estaciones donde más llueve son las de Benamargosa, Benamocarra y La Viñuela, con valores medios superiores a los 500 mm. Por el contrario, en la estación de Vélez-Málaga solamente llueve una media de 450 mm de promedio.

A escala interanual (figura 10.4), se observa que el año hidrológico 1996/1997 es el más lluvioso de los últimos treinta años en el área de estudio y el año 1994/1995 ha sido el más seco. En total hay nueve años considerados como húmedos y once años clasificados como secos. El año 1996/1997 ha sido seleccionado para evaluar la vulnerabilidad dado que cumple con la condición de ser un año húmedo, al igual que en el resto de acuíferos considerados en la tesis.

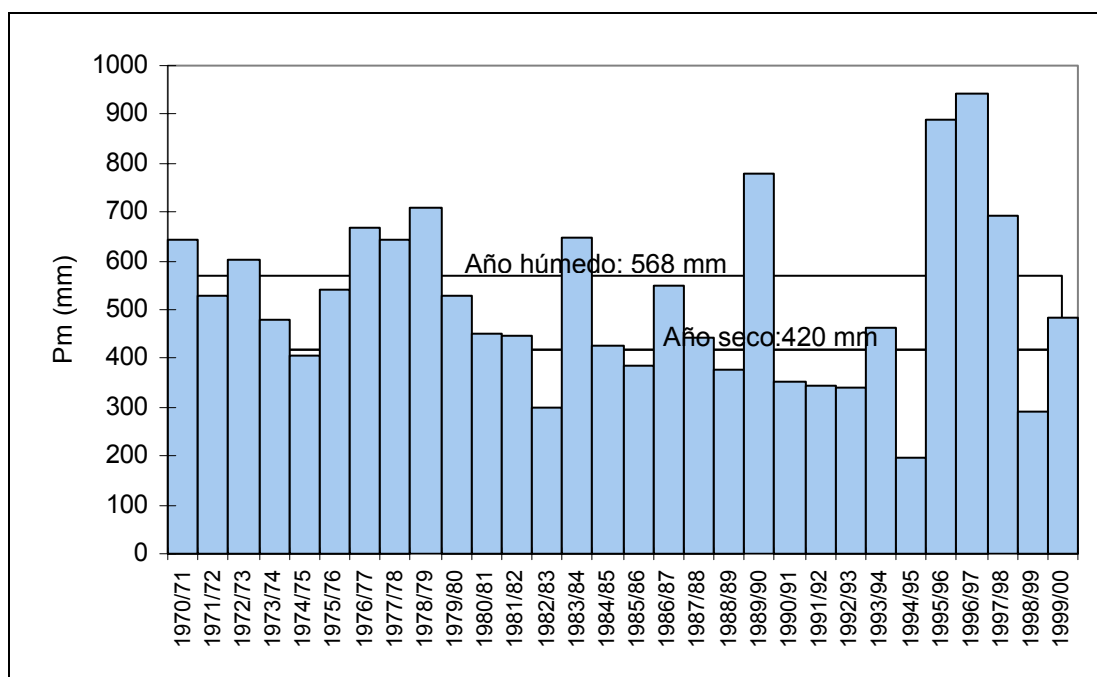
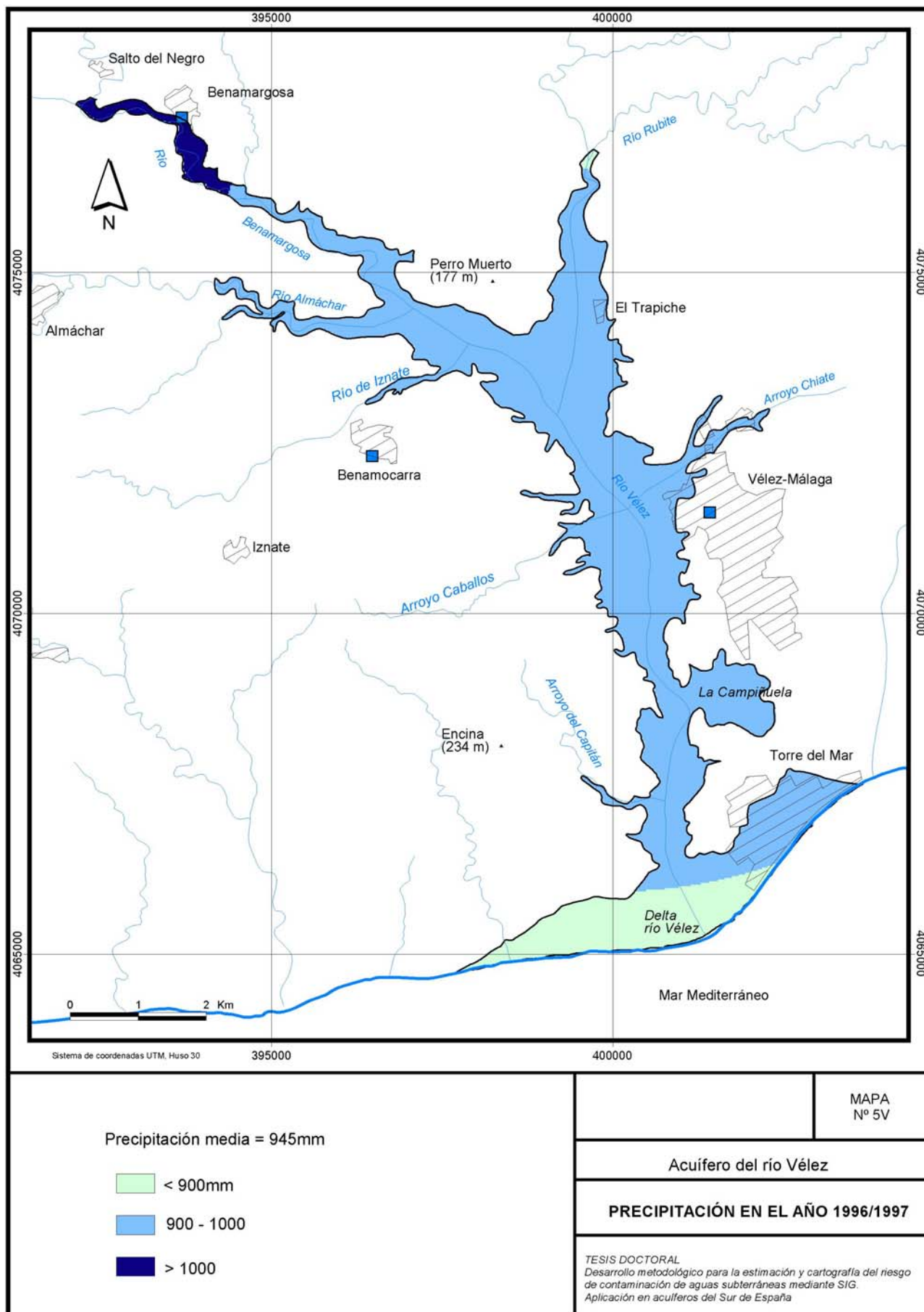


Figura 10.4. Evolución temporal de las precipitaciones medias anuales en el acuífero de Vélez.

La precipitación media del acuífero del río Vélez fue de 942 mm en el año 1996/1997. El mapa 5V muestra que las máximas precipitaciones tuvieron lugar en el sector más septentrional del acuífero. La precipitación varía entre los 890 mm en el delta del río Vélez y los más de 1000 mm en el punto más lluvioso, en la localidad de Benamargosa.

El gradiente pluviométrico no es elevado como consecuencia de la escasa variación altitudinal. La altitud asciende poco y progresivamente a lo largo del valle desde la desembocadura hacia el Norte, lo que se traduce en un aumento muy suave de la precipitación por efecto de la altitud.

El balance hídrico de Thornthwaite ha sido utilizado para calcular el porcentaje de lluvia que recarga el acuífero. Mediante este método se ha estimado el excedente de agua en el suelo, lo que equivale a la lluvia útil, es decir que recarga al acuífero si no hay escorrentía. El valor máximo de reserva de agua en el suelo utilizado ha sido de 100 mm, debido a la presencia arcillas y limos en el suelo. Los datos de temperatura proceden del Instituto Nacional de Meteorología y del Sistema de Información Ambiental de Andalucía.



En la estación de Benamargosa, los excedentes de precipitación que recargan al acuífero representan casi el 60 % de la lluvia. El valor más bajo se corresponde con la estación de Algarrobo, en la cual la mitad de la precipitación se convierte en lluvia útil (cuadro 10.3). El valor medio de lluvia útil en el acuífero es 500 mm y varía entre 600 mm al norte y 450 mm en el Sur.

Estación	Algarrobo "La Mayora"	Benamargosa	Benamocarra	Vélez- Málaga	Viñuela
Temperatura (°)	19	15	15	19	13
Precipitación (mm)	886	1024	976	986	834
Evapotranspiración real (mm)	439	425	436	468	406
Excedentes (mm)	447	599	539	518	427
% lluvia útil	50	58	55	52	51

Cuadro 10.3. Resultados del balance de Thornthwaite realizado en el acuífero del río Vélez para el año hidrológico 1996/1997.

10.1.4 GEOLOGÍA

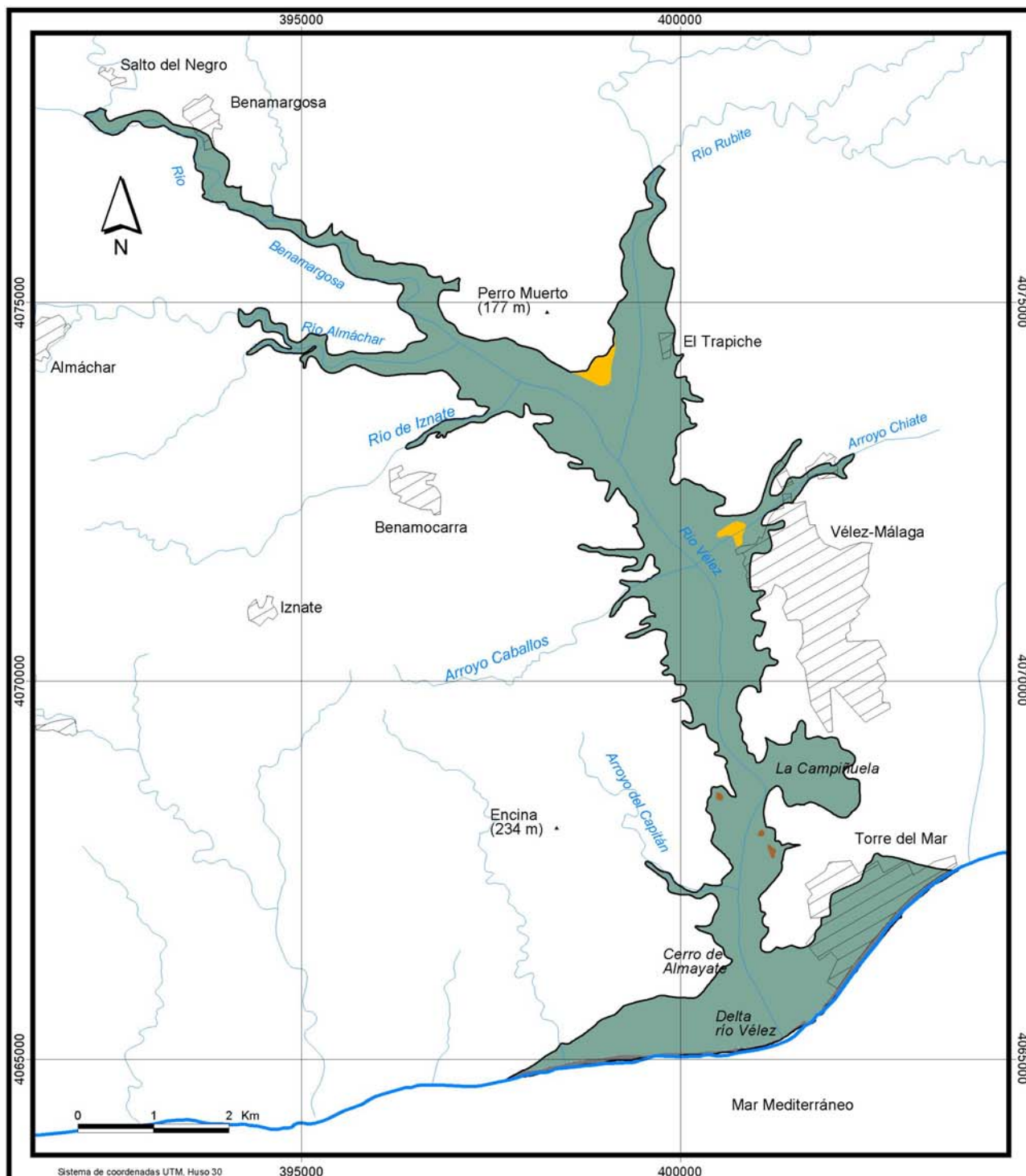
El entorno del acuífero del río Vélez está formado por materiales de la Zona Interna de la Cordillera Bética. En las cercanías del acuífero del río Vélez sólo afloran esquistos, gneises y micaesquistos de la Unidad de Benamocarra, la cual ejerce la función de zócalo y sustrato impermeable del acuífero del río Vélez.

10.1.4.1. LITOLOGÍA

La cuenca baja del río Vélez, donde se encuentra el acuífero estudiado, está formada por dos grandes conjuntos litológicos: sedimentos del Plioceno y materiales detríticos del Cuaternario (Machuca (coord.) 1988). Estos dos conjuntos se sitúan, de forma discordante, sobre un sustrato impermeable formado por esquistos y gneises pertenecientes a la Unidad de Benamocarra.

Para el conjunto de sedimentos del Plioceno se pueden diferenciar dos tramos desde un punto de vista estratigráfico. Hacia muro conglomerados heterométricos de matriz limosa, más groseros en la base y hacia techo predominan margas y limos.

El conjunto de sedimentos cuaternarios (Mapa 6V) está constituido por depósitos aluviales: gravas, arenas, limos y arcillas. La granulometría de los sedimentos aluviales presenta una mayor proporción de materiales finos hacia la desembocadura; así, las gravas predominan en los sectores altos del valle, mientras en los puntos más próximos al delta predominan las arenas y limos (García Aróstegui, 1998).



<p>■ Arenas de playa. Cuaternario</p>	<p>Fuente: Mapa geológico serie Magna Hoja 1054 Escala 1/50.000</p>	<p>MAPA Nº 6V</p>
<p>■ Arenas y gravas aluviales. Cuaternario</p>	<p>Acuífero del río Vélez</p>	
<p>■ Areniscas conglomerados, limos y arcillas. Plioceno</p>	<p>LITOLOGÍA</p>	
<p>■ Esquistos biotíticos con andalucita y granate. Paleozoico</p>	<p><i>TESIS DOCTORAL</i> Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España</p>	

Los limos y arcillas se localizan en profundidad, en un tramo de entre 5 y 10 m de espesor que divide al acuífero en dos tramos de gravas y arenas, principalmente en el delta y parte central del valle al oeste de Vélez-Málaga. El tramo superficial tiene una potencia aproximada de 30 m y puede alcanzar, puntualmente, hasta 65 m como máximo (García Aróstegui, 1998). El tramo más profundo, localizado entre 20 y 32 m de profundidad, tiene un espesor máximo de 30 m en el sector deltaico. Diversos autores coinciden en opinar que los depósitos aluviales del curso bajo del río Vélez son bastante recientes: del Holoceno en el sector deltaico y del Pleistoceno en los sectores más antiguos (Hoffmann, 1987 y Schubart, 1991).

En el Pleistoceno se produjeron sucesivas fases de relleno y erosión que dieron lugar a distintos niveles de terrazas. Durante el Holoceno existió un estuario donde ahora se encuentra la llanura de inundación del río Vélez (García Aróstegui, 1998). En época de los fenicios, el estuario entraba hasta siete km hacia el interior del valle desde la línea de costa actual, aproximadamente hasta la confluencia de los ríos Benamargosa y Vélez. A partir de entonces, la actividad humana ha intensificado los procesos de erosión en la cuenca y, paralelamente, el arrastre de sedimentos produjo la colmatación del estuario, hecho que se acentuó a partir del siglo XV.

10.1.4.2. ESTRUCTURA GEOLÓGICA Y TECTÓNICA

La estructura geológica de la cuenca baja del río Vélez se caracteriza por la disposición horizontal de los materiales pliocenos y aluviales discordantes sobre los materiales plegados de la Unidad de Benamocarra. La existencia de fracturas en el sustrato provoca variaciones de la potencia de los materiales del acuífero. En el delta hay fallas paralelas a la costa que contribuyen a la progradación de este medio sedimentario (García Aróstegui, 1998).

10.1.4.3. GEOMORFOLOGÍA

El principal elemento geomorfológico de la cuenca baja del río Vélez es la terraza fluvial. Se pueden diferenciar tres niveles de terrazas (Senciales, 1995), de los cuales se reconocen dos en la llanura de inundación: el nivel más bajo está formado por pequeños cantos rodados envueltos en matriz arcillosa sin encostramiento alguno (Justicia, 1988) y un nivel superior entre 130 y 160 m s.n.m., al Norte de Vélez-Málaga, con una potencia de 30 m.

Otros elementos geomorfológicos del curso bajo del río Vélez son los meandros. Hay meandros abandonados en la vega del río Benamargosa, a 20 m sobre el nivel actual del río, cerca de la localidad de Salto del Negro (Senciales, 1995). También destaca la presencia de conos de deyección de actividad reciente, que contribuyen a la formación de la vega (Senciales, 1995).

Los materiales pliocenos dan lugar a un relieve alomado poco resistente a la erosión cuando son margosos, pero cuando son areniscas y tienen cierto grado de cementación, que les proporciona resistencia frente a la erosión, dan lugar a relieves como el cerro de Almayate, junto a la desembocadura del río Vélez (mapa 6V).

10.1.5. HIDROGRAFÍA

La red hidrográfica del río Vélez presenta una cuenca dendrítica de 9º orden según la jerarquización de Strahler en el tramo final del valle, en la llanura de inundación (Senciales, 1995). La cuenca se puede dividir en dos sectores drenados por una serie de ríos que forman igualmente una red dendrítica sobre esquistos. A partir de la confluencia de los ríos Benamargosa y Vélez, al norte de la localidad de Vélez-Málaga, se forma la llanura de inundación y el valle toma su mayor anchura (alrededor de 2 km de ancho). El sector occidental está formado por la cuenca del río de la Cueva en cabecera, afluente del Benamargosa, mientras que el sector oriental se inicia con el río Sabar en cabecera y continúa con el Guaro hasta la confluencia con el Benamargosa (figura 10.5).

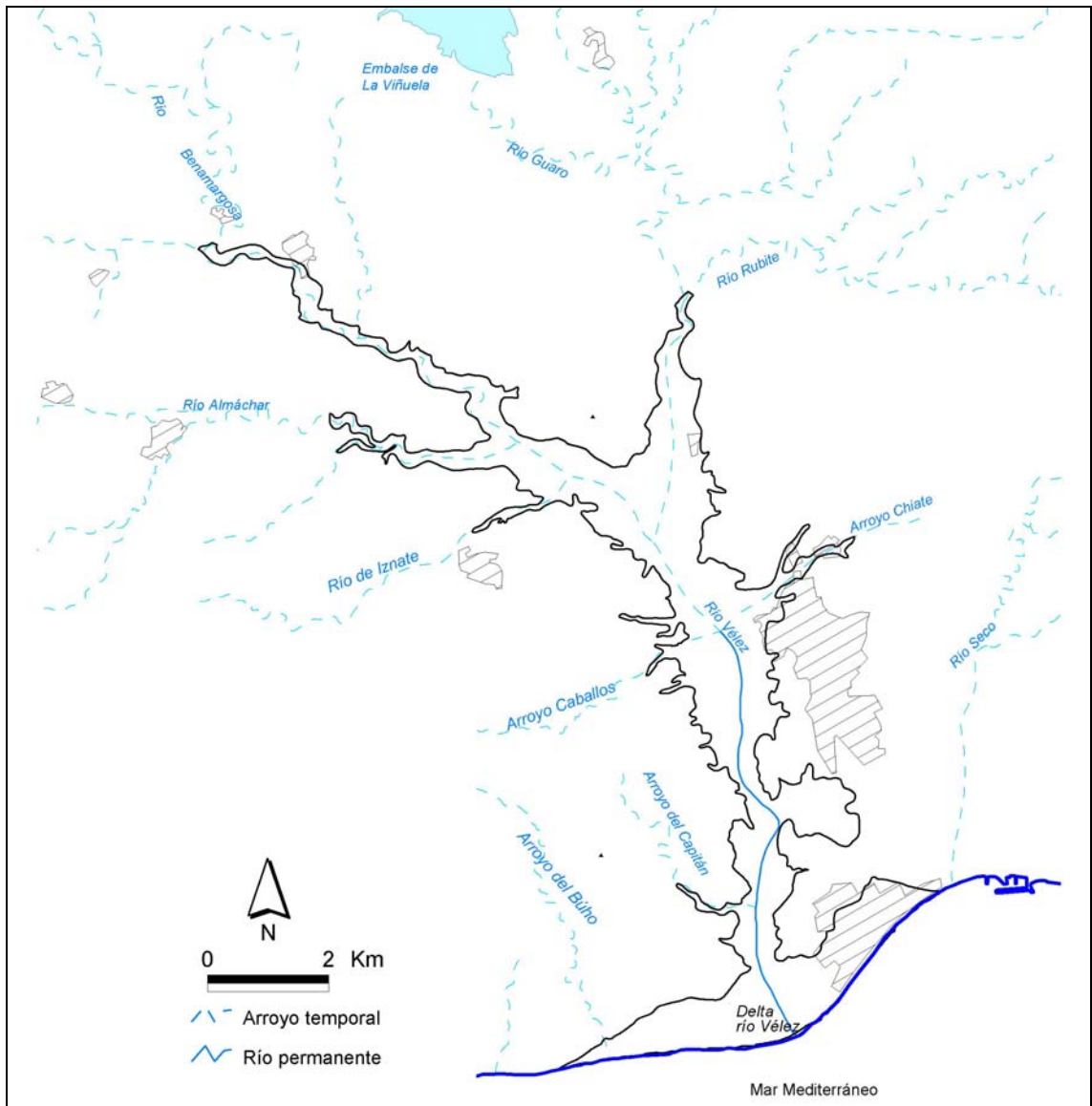


Figura 10.5. Red hidrográfica del curso bajo del río Vélez.

En el sector occidental la red presenta una tipología dendrítica, mientras que en el sector oriental se observan con mayor frecuencia trazados angulados y paralelos indicativo de fuertes pendientes (Senciales, 1995).

10.1.6. HIDROGEOLOGÍA

El acuífero aluvial del río Vélez está formado por los materiales depositados por los ríos Vélez, desde la costa hasta la confluencia con el arroyo Rubite al norte, y Benamargosa, desde la confluencia con el río Vélez hasta cerca de la localidad de Salto del Negro.

Desde un punto de vista hidrogeológico, el acuífero se asienta sobre un sustrato paleozoico impermeable, formado por margas del Plioceno y esquistos de la unidad de Benamocarra, y sus bordes laterales lo constituyen margas y limos del Plioceno al Este, el mar Mediterráneo al Sur y esquistos al Oeste. Al Norte, el estrechamiento de los valles de los ríos Benamargosa y Vélez, aguas arriba de la confluencia con el río Benamargosa, reduce la superficie de aluvial y el acuífero pierde importancia.

En el aluvial del Vélez se pueden diferenciar dos niveles acuíferos. Un nivel superior de carácter libre, que abarca toda la superficie de las vegas de los ríos Benamargosa y Vélez comentada anteriormente. El otro nivel se localiza a una profundidad variable entre 20 y 30 m en la zona del delta y la parte central del valle aluvial. Estos dos niveles acuíferos están separados por una capa de limos y arcillas que semiconfinan al nivel inferior García Aróstegui (1998). El análisis hidrogeológico del acuífero y la posterior evaluación de la vulnerabilidad del mismo están referidas al nivel superior, de mayor interés por los importantes recursos que proporciona para abastecimiento doméstico y agrícola. Además, la falta de datos hidrogeológicos del acuífero inferior, en comparación con el acuífero superior, ha motivado que no se tenga en cuenta este nivel acuífero profundo.

García Aróstegui (1998) diferenció cuatro sectores en el acuífero caracterizados en función de su geometría y geología, aunque a efectos de funcionamiento hidrogeológico el acuífero responde a un mismo esquema. Un primero sector, con 467 ha de superficie y un espesor máximo varía entre 25 y 35 m, se corresponde con el valle del río Benamargosa desde la localidad de Salto del Negro hasta la confluencia con el río Vélez. Un segundo sector con 248 ha de superficie, lo constituye el valle del río Vélez desde la confluencia con el río Benamargosa hasta la confluencia con el río Rubite, donde el fuerte encajamiento del valle reduce la importancia del acuífero. El tercer sector y más importante, de 796 ha y un espesor máximo de 70 m, se localiza en la parte central del valle del río Vélez desde la confluencia con el Benamargosa hasta el inicio del delta. Por último, el delta del río Vélez ocupa una extensión de 454 ha y se caracteriza por ser el sector donde existe una mayor cantidad de puntos de agua.

10.1.6.1. PUNTOS DE AGUA

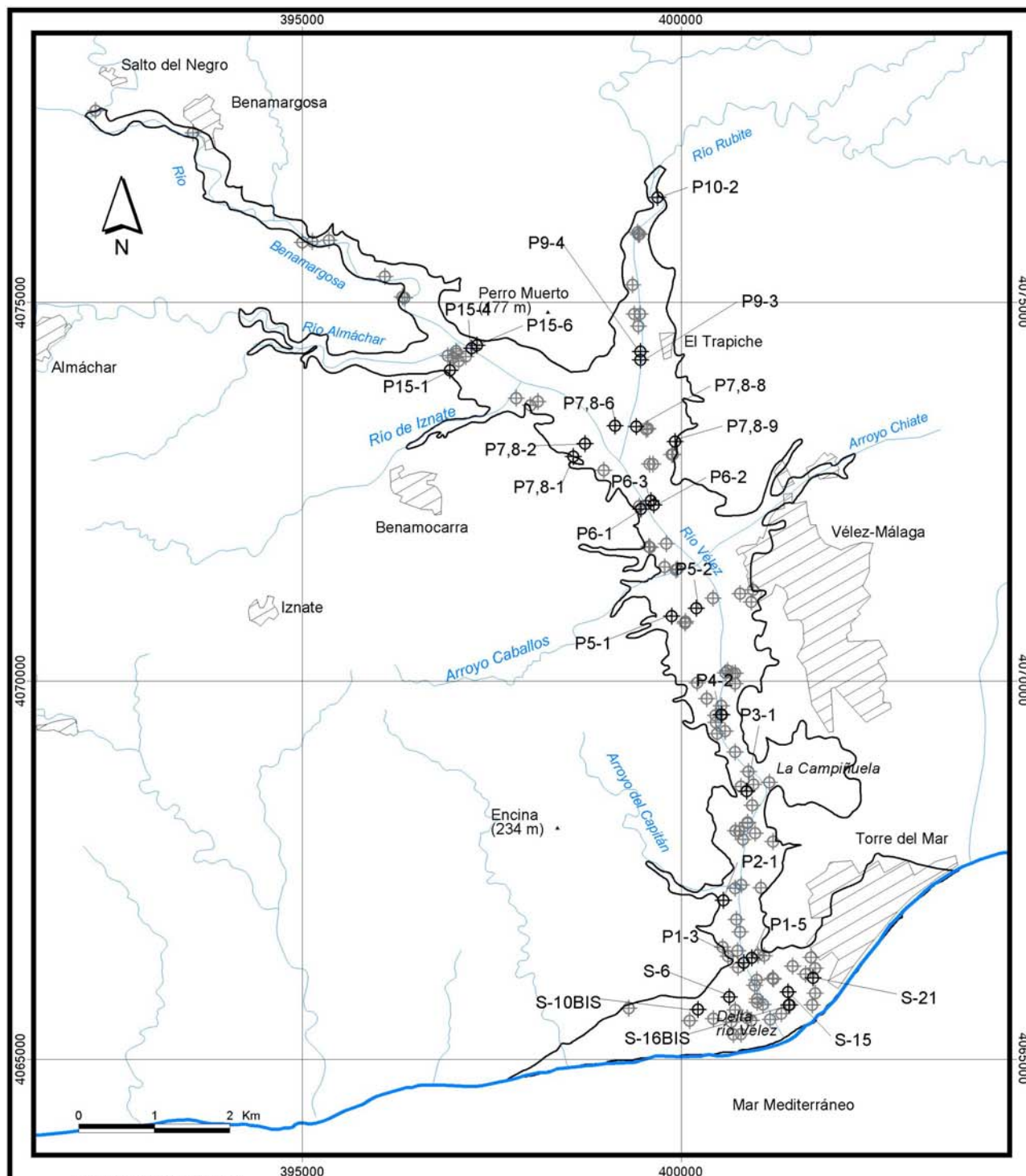
En el acuífero del río Vélez hay una gran cantidad de captaciones, para abastecimiento agrícola y urbano, y piezómetros para el control del nivel del agua subterránea. En este trabajo se ha utilizado el inventario de puntos de agua recopilados por García Aróstegui (1998) que, a

su vez, proceden del estudio elaborado por CHSE (1997), en el cual se realizó una profunda actualización de los puntos de agua del informe CHSE (1987). En total, se han utilizado 147 puntos repartidos a lo largo de todo el acuífero. En el cuadro 10.4 se muestra un listado de los 26 puntos de agua con información piezométrica durante el año hidrogeológico 1996/1997 y que han sido los utilizados para la posterior evaluación y cartografía de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero.

Referencia sondeo	Coordenada UTM		Cota topográfica (m s.n.m.)	Cota piezométrica (m s.n.m.) Año 1996/1997
	X	Y		
P1-3	400830	4066275	6	4
P1-5	400935	4066340	5,9	3,9
P2-1	400560	4067100	8,9	6,7
P3-1	400865	4068540	13,7	11
P4-2	400530	4069555	17,4	15
P5-1	399875	4070850	25,3	21,2
P5-2	400200	4070955	22	21,3
P6-1	399470	4072265	28,9	26,3
P6-2	399640	4072320	28,6	26,1
P6-3	399600	4072375	29,5	26,7
P7,8-1	398575	4072960	35,3	31,3
P7,8-2	398730	4073130	34,2	31,6
P7,8-6	399125	4073370	34,6	31,8
P7,8-8	399410	4073355	32,2	20,4
P7,8-9	399920	4073160	32,1	30,5
P9-3	399465	4074235	40,9	39,1
P9-4	399465	4074345	41,4	25,9
P10-2	399690	4076385	57,2	55,5
P15-1	396950	4074100	54,3	33,2
P15-4	397235	4074390	48,9	42,7
P15-6	397305	4074430	48,8	31,2
S-6	400635	4065820	3,4	2,6
S-10BIS	400220	4065655	3	1,8
S-15	401412	4065890	2	1,8
S-16BIS	401420	4065715	1,9	0,6
S-21	401740	4066075	1,7	1,4

Cuadro 10.4. Inventario de puntos de agua y datos piezométricos medios en el año 1996/1997. Elaborado a partir de los datos de García Aróstegui, 1998.

En el mapa 7V se muestra la distribución de los 147 puntos de agua localizados por (García Aróstegui, 1998) en el acuífero del río Vélez y los 26 puntos utilizados en la presente tesis para el análisis de la piezometría.



Sistema de coordenadas UTM, Huso 30

Fuente:
Modificado de
García Aróstegui (1998)

MAPA
Nº 7V

- ⊕ Sondeos y piezómetros (CHSE, 1997)
- ⊕ Sondeos y piezómetros con datos piezométría en el año 1996/1997

Acuífero del río Vélez

PUNTOS DE AGUA

TESIS DOCTORAL
Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España

10.1.6.2. PIEZOMETRÍA

Los valores de cota piezométrica correspondientes al año hidrogeológico 1996/1997 varían entre un mínimo de 0,6 m s.n.m. en el delta hasta un máximo de 55,5 m s.n.m. en la confluencia con el río Rubite (Mapa 8V). A medida que el río se acerca a la desembocadura, la cota piezométrica disminuye según un gradiente medio de 0,005. En la confluencia de los ríos Vélez y Benamargosa se observan cotas alrededor de 30 m s.n.m., salvo algunos puntos donde el nivel del agua disminuye hasta los 20 m s.n.m. Valores habituales a la altura de la localidad de Vélez-Málaga son del orden de 20 m s.n.m. En la zona de la Campiñuela, la cota piezométrica está próxima a 10 m s.n.m. y, al sur, desciende hasta los 6 m s.n.m. A partir de aquí, y ya en el sector del delta, la cota piezométrica varía entre 5 y 0 m s.n.m. con un valor medio para esta área de 2 m s.n.m. y un gradiente hidráulico medio cifrado en 0,0035.

Durante el año hidrológico 1996/1997 existió un descenso progresivo del nivel piezométrico desde el sector norte del acuífero hasta la desembocadura, que estuvo fuertemente influenciado por la topografía del terreno. Las variaciones de altitud de la superficie piezométrica son directamente proporcionales a las variaciones de la superficie topográfica, de modo que conforme disminuye la cota topográfica disminuye la cota piezométrica y viceversa.

Las variaciones de la cota piezométrica durante los años ochenta y noventa (García Aróstegui, 1998) fueron, más o menos acusadas, según la localización de los puntos de agua (figura 10.6). Así, los sondeos S-10BIS y P1-5, situados en el delta, son los que presentaron menor variación del nivel piezométrico. Por el contrario, en los pozos P6-2 y P7,8-8 localizados en la parte central del aluvial, se registraron variaciones acusadas del nivel piezométrico en función de los bombeos y de las precipitaciones. Durante los años 1989 y 1996 se produjeron fuertes precipitaciones que dieron lugar a un ascenso del nivel piezométrico. Por último, en el pozo P10-2, localizado cerca de la confluencia con el río Rubite, también se registraron variaciones del nivel piezométrico de magnitud intermedia a los anteriores.

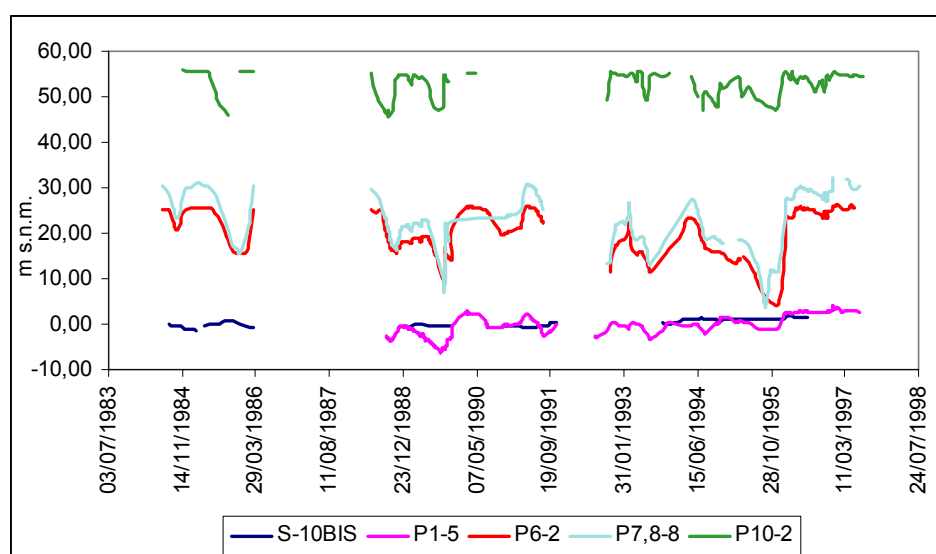
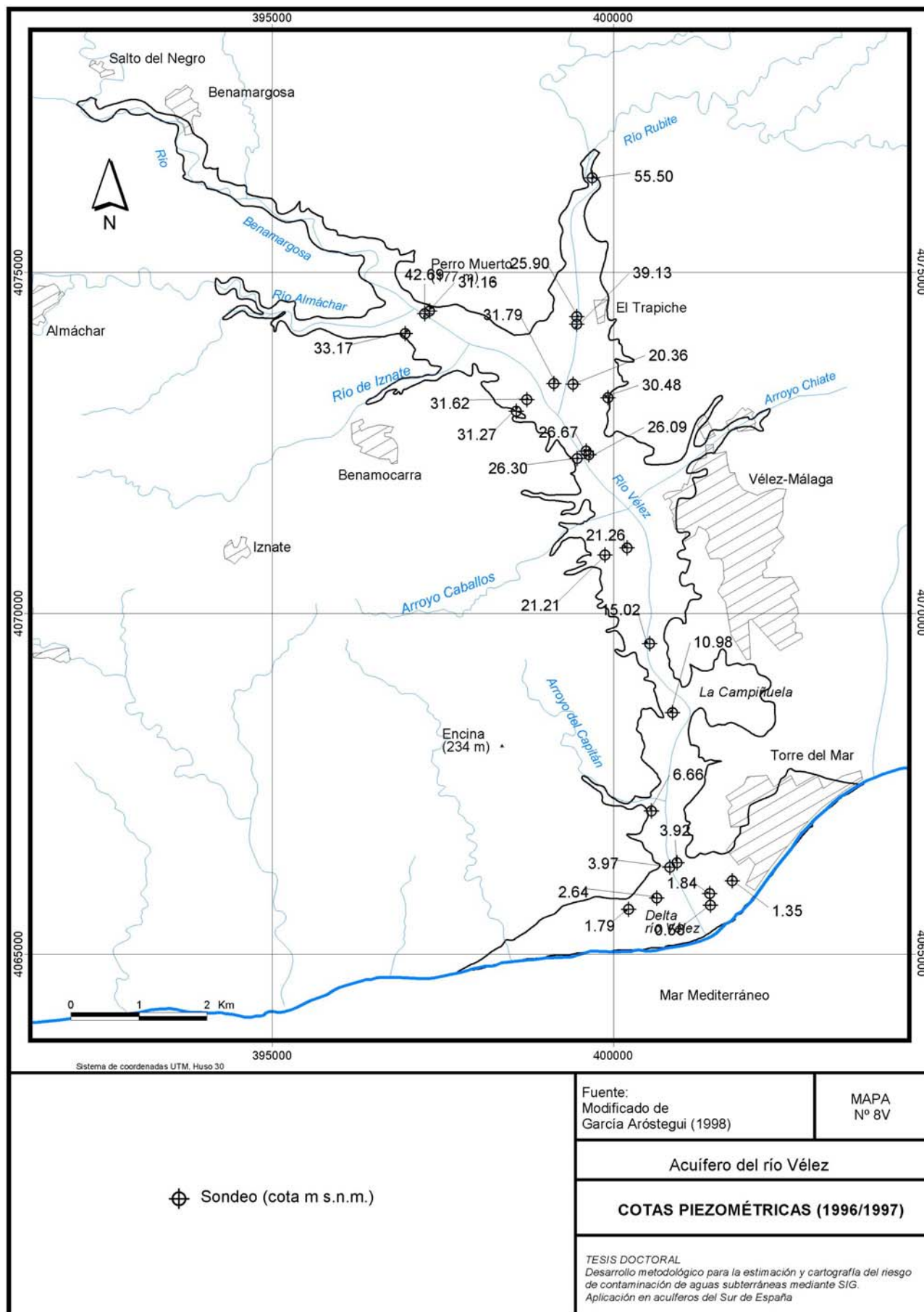


Figura 10.6. Evolución del nivel piezométrico en sondeos representativos del acuífero entre los años 1983 y 1998 (datos tomados de García Aróstegui, 1998).



10.1.6.3. PARÁMETROS HIDRÁULICOS

Los parámetros hidráulicos del acuífero (permeabilidad, transmisividad, coeficiente de almacenamiento) varían en función del sector que se considere (García Aróstegui, 1998).

La mitad septentrional del acuífero presenta valores de transmisividad elevados, que llegan a ser del orden de 10000 m²/día en los puntos de mayor espesor saturado, zona de confluencia de los ríos Vélez y Benamargosa. El valor del coeficiente de almacenamiento varía entre 5 y 6 %.

Entre la localidad de Vélez-Málaga y el sector deltaico, se obtienen valores de transmisividad inferiores, del orden de 2000 m²/día y el coeficiente de almacenamiento baja hasta un 1 ó 3 %.

En el delta, la transmisividad presenta valores en torno a 5000 m²/día que decrecen hasta 3000 m²/día en los puntos más alejados del cauce del río Vélez. El coeficiente de almacenamiento, en este sector, está comprendido entre 5 y 7 %.

Si se considera un valor medio del coeficiente de almacenamiento de 5 % y un volumen saturado de 477 hm³, el volumen de agua almacenada es de 24 hm³ (García Aróstegui, 1998).

10.1.6.4. FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO Y BALANCE HÍDRICO

Hasta la construcción de la presa de La Viñuela, el acuífero era recargado por el agua de lluvia y de escorrentía de los ríos Vélez, Rubite y Benamargosa, principalmente, entre los meses de Noviembre y Abril. La descarga se produce al mar por la línea de costa pero, en verano, la escasez de precipitaciones y el bajo caudal del río Vélez conllevan una intensa explotación de las aguas subterráneas en los sondeos. Las relaciones hidráulicas entre el río y el acuífero varían según el sector y la época del año. Así, en periodo de recarga, el acuífero es ganador aguas arriba de la confluencia de los ríos Benamargosa y Vélez, mientras que aguas abajo de ese punto el río es ganador. Durante el periodo estival, el río es perdedor y en el delta se produce intrusión marina (García Aróstegui, 1998).

Tras la construcción del embalse de La Viñuela, la retención de agua de escorrentía procedente del río Vélez conlleva modificaciones en las relaciones entre el río y el acuífero. Durante el invierno el río es perdedor debido a la retención de agua en el embalse, mientras que en verano el acuífero es ganador por la circulación de agua procedente del embalse, de forma modulada para evitar la intrusión marina en el delta (García Aróstegui, 1998).

Las características climáticas e hidrológicas del acuífero del río Vélez han propiciado una explotación de los recursos del acuífero, con el consiguiente descenso de los niveles, aunque se recuperan en años húmedos como el considerado en este trabajo (1996/1997). Durante este año las entradas de agua en el acuífero fueron muy superiores a las salidas por lo que se produjo la recarga del mismo. En condiciones climáticas medias o secas, las salidas de agua del acuífero son muy superiores a las entradas (García Aróstegui, 1998).

El balance hídrico del acuífero se ha tomado de CHSE (1997), por el cual las entradas se pueden clasificar en tres categorías: infiltración del agua de lluvia, escorrentía de las cuencas fluviales y retornos de riego.

La recarga del acuífero procedente de la infiltración del agua de lluvia es 3'4 hm³/año.

En cuanto a las entradas por escorrentía, las principales fuentes de recarga son los ríos Vélez, Benamargosa y Rubite. Los ríos Benamargosa y Rubite son los que en mayor medida recargan al acuífero de forma natural, con valores de 26 y 27 hm³/año, mientras que el río Vélez aporta 8,9 hm³/año. En cambio, si se tienen en cuenta los desembalses realizados en el embalse de La Viñuela, el volumen de recarga se eleva hasta los 100 hm³/año. Los desembalses realizados tienen por objeto aliviar los excedentes embalsados y verificar el correcto funcionamiento de las compuertas de la presa, además de recargar al acuífero y mantener el caudal ecológico.

Junto a la aportación de agua superficial desde los ríos citados, hay que tener en cuenta el volumen de agua que recargan de modo subterráneo. En este sentido, el río Benamargosa es el más importante ya que supone una recarga de 0,45 hm³/año, mientras que el río Vélez aporta 0,33 hm³/año y el Rubite 0,17 hm³/año.

El volumen de agua que recarga al acuífero procedente del retorno de riegos se cifra 1 hm³/año y se diferencian seis tipos según la procedencia: riegos con aguas superficiales, agua desembalsada en acequias, aguas recicladas en la estación de tratamiento del Trapiche, agua residuales, aguas subterráneas extraídas en pozos del acuífero y extraídas en pozos ajenos al acuífero de Vélez. De estas seis categorías, los retornos procedentes del riego con aguas superficiales representan dos tercios del total y los que menor importancia adquieren, en el cómputo total, son las aguas procedentes del retorno de riego con aguas recicladas, el agua desembalsada en las acequias y las procedentes de captaciones ajenas al acuífero.

Las salidas de agua del acuífero presentan un esquema más simple y se pueden dividir en tres categorías: superficiales, subterráneas y bombeos en sondeos.

La descarga subterránea se produce a lo largo de la línea de costa y apenas representa 2,5 hm³/año mientras que las salidas superficiales procedentes del río Vélez y las acequias de riego suman 145 hm³/año. El agua extraída mediante sondeos entre los meses de Octubre de 1996 y Mayo de 1997 fue de 5,5 hm³/año, repartidos en un 95 % para uso agrícola y el resto para uso doméstico.

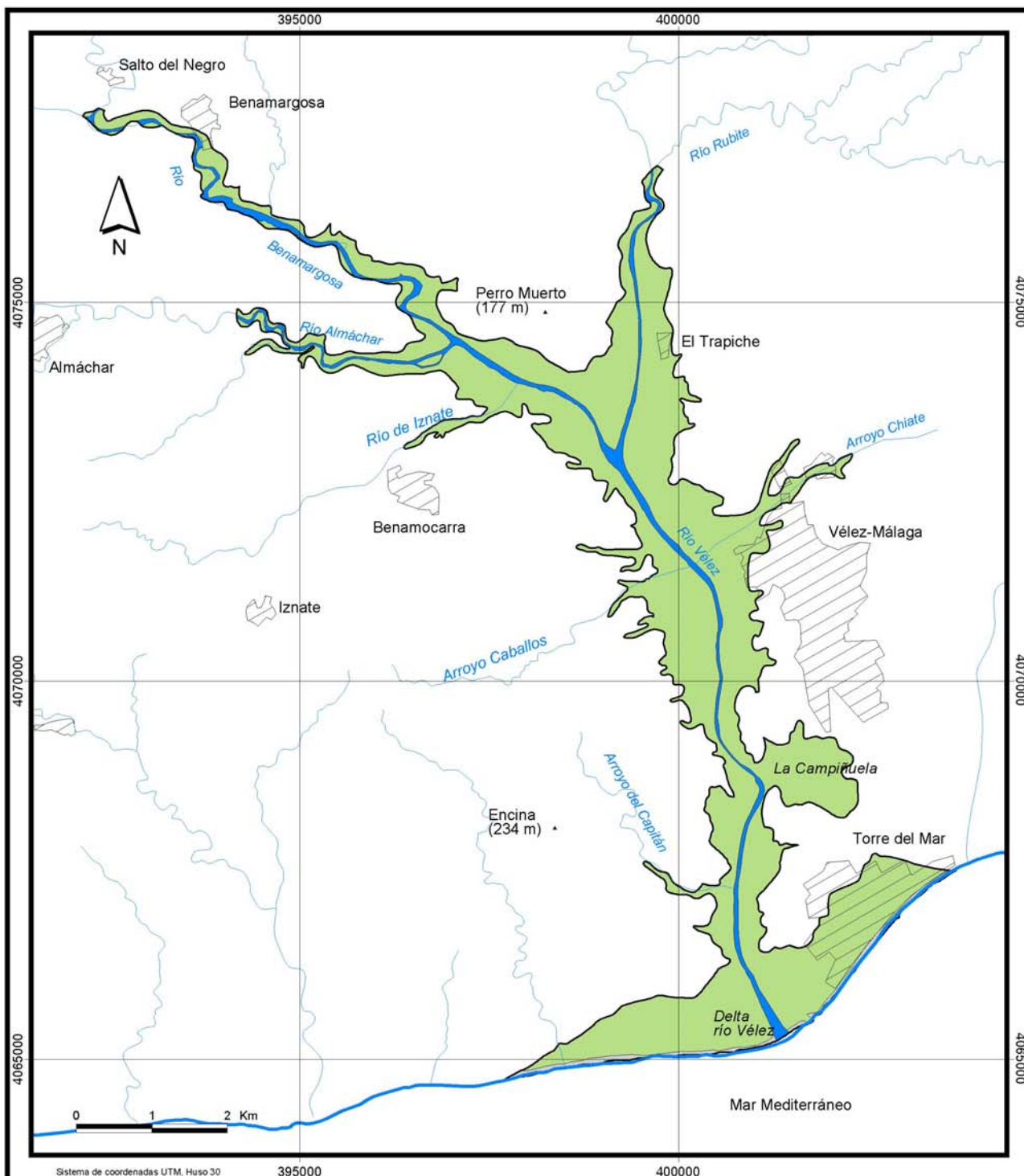
En total, las entradas en el acuífero de Vélez representan un volumen de 193 hm³/año y las salidas 153 hm³/año de manera que el balance es positivo y se cifra en 40 hm³/año.

10.1.7. SUELOS

10.1.7.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES

La litología aluvial o coluvial y la topografía plana de la vega del Vélez son características favorables a la presencia de suelos poco evolucionados con alta variabilidad en su composición química, textura entre franco-arenosa y franca y un pH generalmente alcalino. Los suelos que más fácilmente se desarrollan sobre el acuífero son Fluvisoles, pero debido a su elevada capacidad agrícola han sido muy roturados, y se han transformado en Antrosoles.

En el acuífero del río Vélez, el tipo de suelo dominante, según Aguilar *et al.* (1992), es una asociación de Antrosoles cumúlicos, Fluvisoles calcáricos y Regosoles calcáricos (Mapa 9V).



<p> Asociación de Fluvisoles calcáricos con Antrosoles cumúlicos y Regosoles calcáricos Cantos rodados Arenas de playa </p>	Fuente: Modificado de Aguilar et al. (1992)	MAPA Nº 9V
	Acuífero del río Vélez	
	SUELOS	
	TESIS DOCTORAL Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España	

Los Fluvisoles son suelos profundos, poco pedregosos y con abundantes gravas y arenas de esquistos y cuarcitas del Paleozoico.

Los Antrosoles tienen una estructura y textura resultado de importantes modificaciones en los suelos originales, debido a las medidas adoptadas por los agricultores para aumentar el rendimiento de sus explotaciones. Concretamente, los Antrosoles cumúlicos son los que mayor extensión presentan en el acuífero debido a la importante actividad humana que se ha desarrollado en este espacio.

Los Regosoles calcáricos son los que menor importancia tienen, en cuanto a extensión superficial, y se localizan en los sectores de mayor pendiente, como las laderas del valle. Son suelos profundos con una pedregosidad baja, elevada proporción de gravas y están ocupados por cultivos subtropicales, mientras que los Antrosoles derivados de su alteración se utilizan en invernaderos y enarenados dedicados a productos hortícolas, sobre todo en el tercio norte del acuífero.

10.1.7.2. CARACTERÍSTICAS TEXTURALES

En el área de estudio hay tres catas edáficas realizadas para el análisis granulométrico y químico de los suelos en el marco del proyecto LUCDEME (Aguilar *et al.*, 1992). Los perfiles corresponden a dos Fluvisoles (perfiles 1054-1 y 1054-3, cuadro 10.5) y un Regosol (perfil 1054-13, cuadro 10.6).

El perfil 1054-1 presenta una textura franca con tendencia a franco-arcillosa-arenosa y un espesor superior a un metro (figura 10.7). Los porcentajes de cada fracción granulométrica a lo largo del perfil son relativamente constantes, excepto en el horizonte más profundo, donde se produce un aumento del contenido en limos que permite catalogarlo como franco-arcilloso, muy próximo a franco-arcillo-limoso.

Los porcentajes de arena, limo y arcilla en el perfil 1054-3 son parecidos en los más de 50 cm que tiene de espesor (figura 10.8). Solamente se observa un ligero incremento del contenido en arenas, en detrimento del porcentaje de limos, desde el horizonte superficial hasta el más profundo. El valor medio de cada fracción granulométrica para el conjunto del suelo (cuadro 10.5) permite clasificarlo como un suelo franco-arenoso.

En ambos casos, el tamaño de arena predominante es muy fino y la presencia de gravas es muy baja. Son suelos en una topografía plana, donde existen procesos de sedimentación de materiales finos. La diferencia granulométrica con respecto a los suelos anteriores se debe a la posición geográfica que ocupan. El perfil 1054-3 se localiza en la confluencia de los ríos Vélez y Benamargosa, una zona donde el río tiene más energía y, por tanto, mayor capacidad de arrastre, en comparación con la zona de la desembocadura donde se localiza el perfil 1054-1.

Perfil 1054-1. Fuvisol Calcárico				Perfil 1054-3. Fuvisol Eútrico			
Horizonte	Arenas	Limos	Arcillas	Horizonte	Arenas	Limos	Arcillas
Ap1	55,4	21,5	23,1	Ap	58,3	25,0	16,6
Ap2	50,1	26,7	23,1	C	73,1	11,2	15,6
AC	53,8	20,7	25,4	2C	80,4	9,4	10,1
C	48,6	27,1	24,4	3C	72,9	16,5	10,5
Cg	26,1	45,1	28,7	Valor medio	71,2	15,5	13,2
Valor medio	46,8	28,2	24,9				

Cuadro 10.5. Porcentaje del tamaño de grano de los horizontes de un Fluvisol. Elaborado a partir de los datos del proyecto LUCDEME (Aguilar *et al.*, 1992).

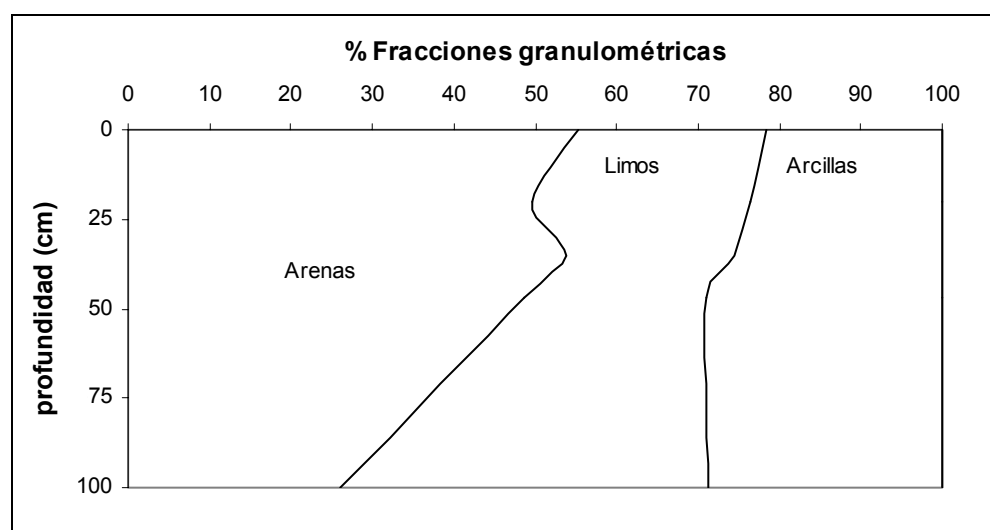


Figura 10.7. Variaciones granulométricas según la profundidad en el perfil n° 1054-1 correspondiente a un Fluvisol calcárico. Elaborado a partir de los datos del proyecto LUCDEME (Aguilar *et al.*, 1992).

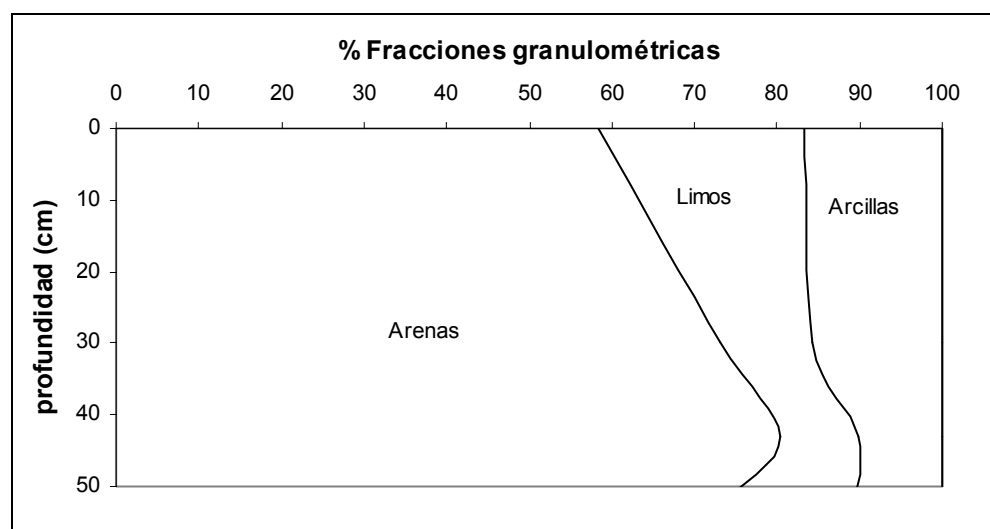


Figura 10.8. Variaciones granulométricas según la profundidad en el perfil n° 1054-3 correspondiente a un Fluvisol eútrico. Elaborado a partir de los datos del proyecto LUCDEME (Aguilar *et al.*, 1992).

Los Regosoles calcáricos, en general, se pueden clasificar como franco-arenosos (cuadro 10.6) dado que más de la mitad del perfil presenta estas características. En los horizontes superficiales, la textura evoluciona desde franco-arcillosa a franca hasta terminar en franco-arenosa (figura 10.9). Este tipo de suelo tiene un espesor aproximado de 1 m y se desarrolla en una topografía ligeramente ondulada.

Perfil 1054-13. Regosol Calcárico			
Horizonte	Arenas	Limos	Arcillas
Ap	39,9	30,3	29,7
Ck	46,2	28,5	25,3
C1	70,6	14,5	14,9
C2	80,7	11,7	7,7
Valor medio	59,4	21,3	19,4

Cuadro 10.6. Porcentaje del tamaño de grano de los horizontes de un Regosol calcárico. Elaborado a partir de los datos del LUCDEME (Aguilar *et al.*, 1992).

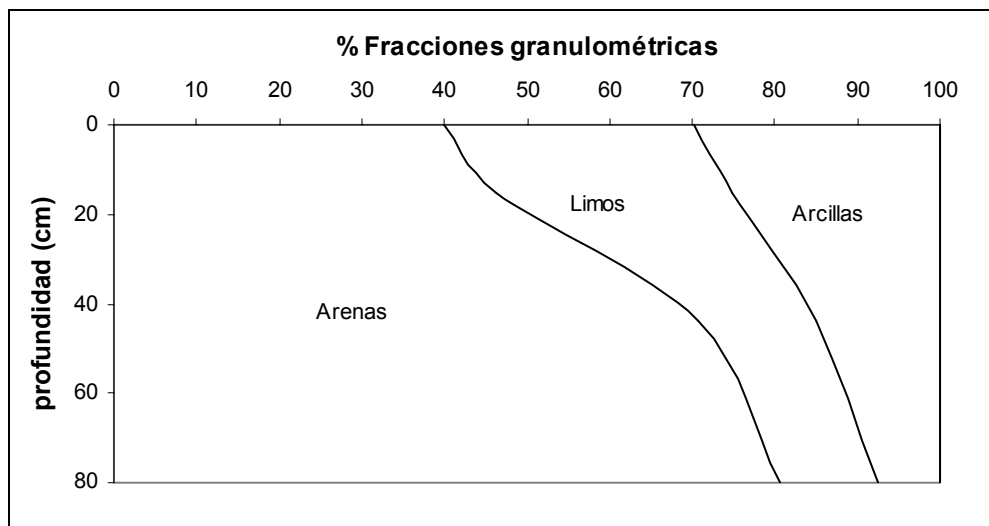
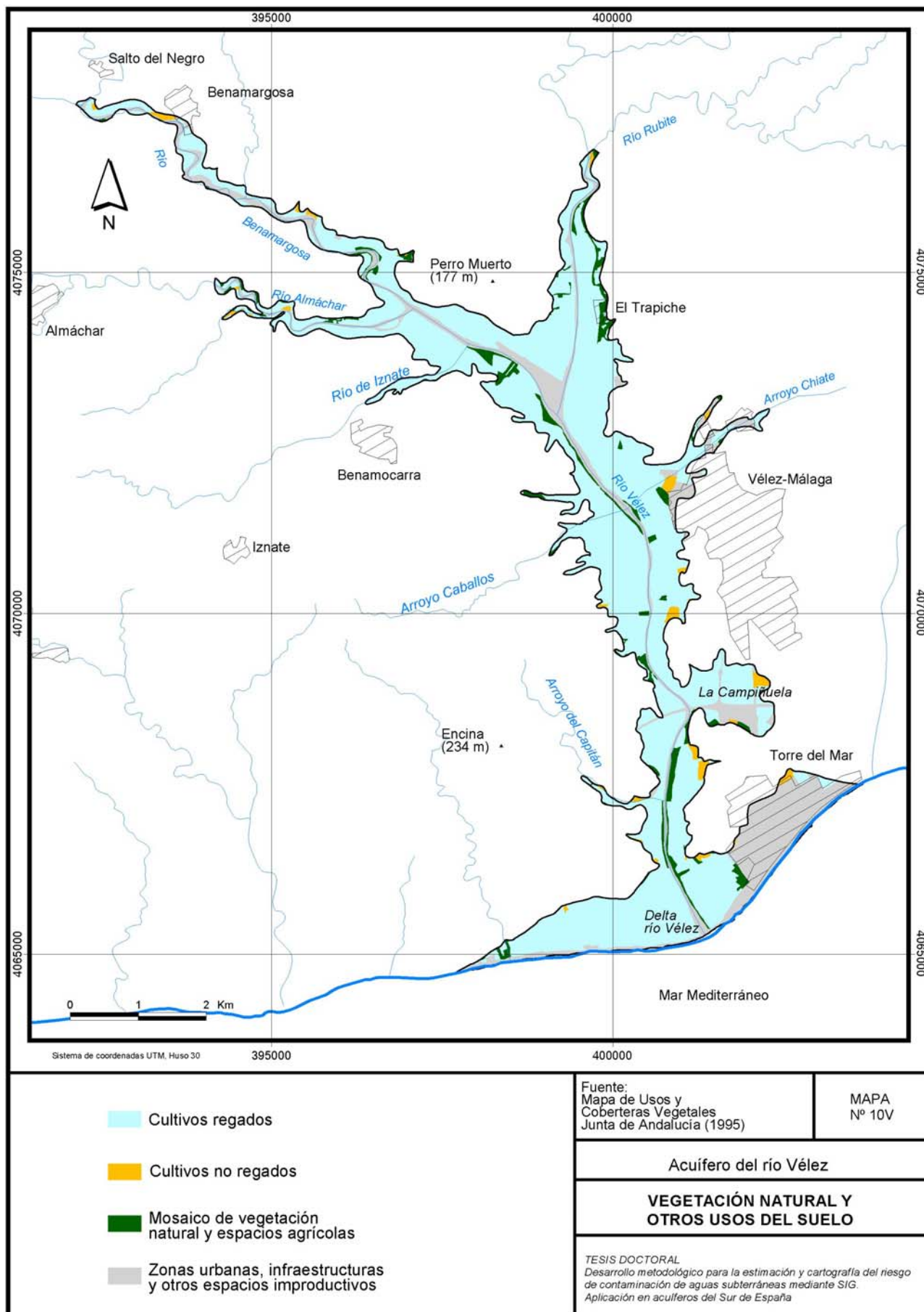


Figura 10.9. Variaciones granulométricas según la profundidad en el perfil n° 1054-13 correspondiente a un Regosol calcárico. Elaborado a partir de los datos del proyecto LUCDEME (Aguilar *et al.*, 1992).

10.1.8. VEGETACIÓN NATURAL Y OTROS USOS DEL SUELO

En el acuífero del río Vélez hay signos de aprovechamiento humano en la totalidad de su superficie y son muy pocos los espacios con evidencias de vegetación natural.

Este espacio se utiliza para la agricultura y, en menor medida, para infraestructuras urbanas. Los suelos de la vega de los ríos Benamargosa y Vélez son muy fértiles y proporcionan unas condiciones edáficas excelentes para el cultivo de productos hortícolas. En total, el uso agrícola representa tres cuartas partes de la superficie del acuífero, mientras que el resto está dedicado a uso residencial (figura 10.10). Respecto al uso agrícola, los principales cultivos sobre el acuífero son los hortícolas, desarrollados desde la confluencia de los ríos Vélez y Benamargosa hasta la desembocadura (Mapa 10V).



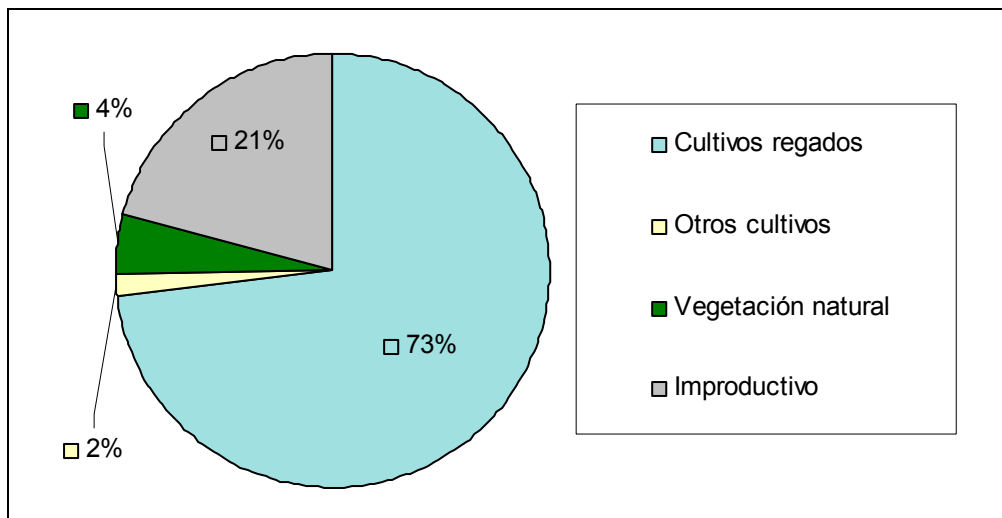


Figura 10.10. Distribución de los usos del suelo en el acuífero del río Vélez.

Aguas arriba de la confluencia de estos ríos, se observa un predominio de espacios dedicados a cítricos y subtropicales en el valle del río Benamargosa y un aumento de la superficie dedicada a cultivos en invernaderos.

La superficie no utilizada para las labores agrícolas, o es espacio urbano o se corresponde con el cauce del río. Las áreas urbanizadas tienen mayor importancia en el sector de Torre del Mar, parte más oriental del delta del río Vélez, y en la confluencia de los ríos Vélez y Benamargosa, donde se encuentra el aeródromo de la Axarquía. La zona de la Campiñuela es un espacio que se está urbanizando recientemente. La presencia de un gran centro comercial, un vivero, varias vías de comunicación y la cercanía del polígono industrial de la localidad de Vélez-Málaga han dado a este sector un fuerte dinamismo que está transformando el paisaje original.

10.1.9. POBLACIÓN

10.1.9.1. POBLACIÓN DE DERECHO

En la actualidad, el volumen de población dependiente de los recursos hídricos del acuífero del río Vélez es muy bajo, con relación a la importancia que ha tenido tradicionalmente para el abastecimiento de las localidades de los municipios de Vélez-Málaga, Benamocarra y Benamargosa. Hasta Agosto de 1994, los tres municipios se abastecían del acuífero (García Aróstegui, 1998), momento a partir del cual el abastecimiento se ha realizado con los recursos del embalse de La Viñuela, excepto durante la sequía de 1995, cuando se tuvo que volver a utilizar agua del acuífero. El municipio de Benamargosa es el único que se abastece a partir del acuífero y utiliza el agua del embalse de la Viñuela como recurso complementario. El número de habitantes que se abastecen de las aguas del acuífero del río Vélez es de 1442 (cuadro 10.7). Para el resto de localidades, el acuífero es un recurso alternativo en caso de sequía.

Municipio y Núcleo de Población		Habitantes			
		Municipio (INE, 2004)	Núcleo (INE, 2004)	% del total	% del municipio
Benamocarra	Benamargosa*	1517	1442	2,4	95,1
Benamargosa	Benamocarra	2825	2756	4,6	97,6
Vélez-Málaga	Almayate Alto	57142	425	0,7	0,7
	Almayate Bajo		994	1,7	1,7
	El Capitán		50	0,1	0,1
	El Hornillo		52	0,1	0,1
	Los Toscanos		94	0,2	0,2
	Urb. diseminadas de Almayate Bajo: Monte azul, Piedras, Los Camachos, La Capellanía		609	1,0	1,1
	Benajárfate		1278	2,2	2,2
	Los Puertas		147	0,2	0,3
	Urb. diseminadas de Benajárfate: Las Lomas del Sol, El Molino, La Sirena, Las Monjas y San José		447	0,8	0,8
	Cajiz		400	0,7	0,7
	Los Iberos		111	0,2	0,2
	Urb. diseminadas de Cajiz: Cajisillo, Valle Niza y Los Martínez		120	0,2	0,2
	Caleta de Vélez		2211	3,7	3,9
	Chilches		1289	2,2	2,3
	Urb. diseminadas de Chilches: Panorama, Los Algarrobos		61	0,1	0,1
	El Tomillar		1028	1,7	1,8
	Torre del Mar		14502	24,4	25,4
	Trapiche		179	0,3	0,3
Urb. diseminadas de Triana: Aldea Baja, Aldea Alta, Zorrilla, Las Chozas y La Dehesa	181	0,3	0,3		
Triana	543	0,9	1,0		
Vélez-Málaga	31208	52,6	54,6		
Total	61484	60127	100,0	97,8	

Cuadro 10.7. Población dependiente de los recursos del acuífero del río Vélez. * Localidad que utiliza, en la actualidad, agua del acuífero para abastecimiento de la población.

El número total de habitantes que tiene acceso al acuífero del río Vélez es 60127, pero en la actualidad sólo es utilizado por el 2,4 %. Del total de habitantes vinculados en alguna medida a los recursos del acuífero, casi la mitad se corresponden con Vélez-Málaga y una cuarta parte a Torre del Mar, de forma que estos dos núcleos representan el 75 % de la potencial demanda de agua del acuífero. Otros núcleos importantes en cuanto a volumen de población son Benamargosa, Benamocarra, Caleta de Vélez, Benajárfate, Chilches y el Tomillar, los cuales suman casi el 95 % del total. El resto son núcleos de menor entidad cuya población total es inferior a 1000 habitantes.

La estructura por edad del conjunto de la población muestra una tendencia regresiva desde los años setenta. Hasta esa década la población de los tres municipios analizados crecía progresivamente debido a la situación estratégica que tienen, sobre todo en el caso de Vélez-Málaga que ha actuado como núcleo de atracción para la población de la comarca de la Axarquía. La pirámide de población (figura 10.11) muestra un elevado peso de la población adulta y, sobre todo, de la población con edad entre 15 y 35 años.

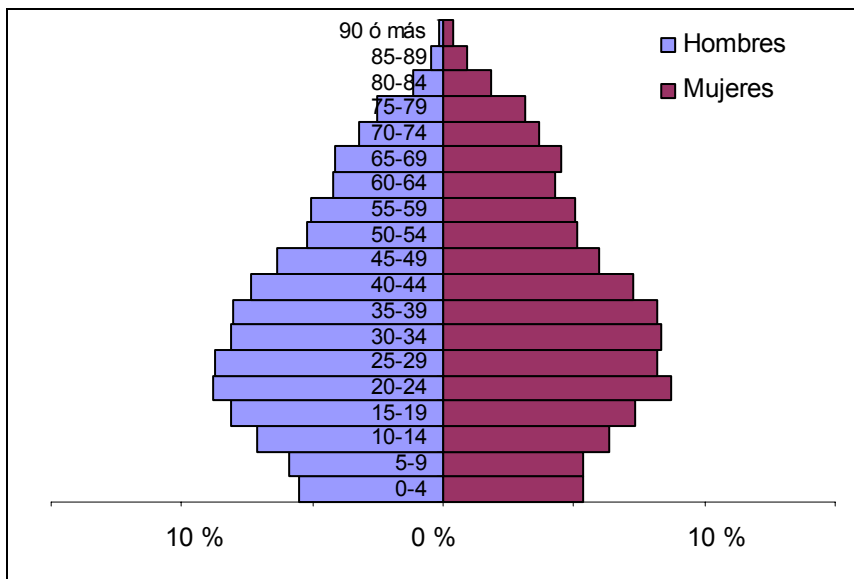


Figura 10.11. Pirámide de la población dependiente de los recursos del acuífero del río Vélez para el año 2001.

La estructura por edad de los principales núcleos de población vinculados al acuífero, en algunos casos, presenta variaciones respecto a la tendencia general como se muestra en la figura 10.12. La población de Benamargosa muestra importantes variaciones respecto al conjunto de la población, a la vez que es la única localidad que utiliza los recursos del acuífero en la actualidad. Benamargosa tiene una población desestructurada con un elevado peso de población anciana y una fuerte entalladura en los grupos de edad entre 45 y 60 años como consecuencia de la importante crisis vivida tras la guerra civil. Desde finales de los años cincuenta, la población se encuentra en un proceso de retroceso aunque se pueden observar excepciones puntuales.

El resto de núcleos tiene una estructura de edad de la población similar a la analizada para el conjunto del acuífero, a excepción del núcleo urbano de El Tomillar, una zona urbanizada en los años sesenta que tiene muy poca población anciana.

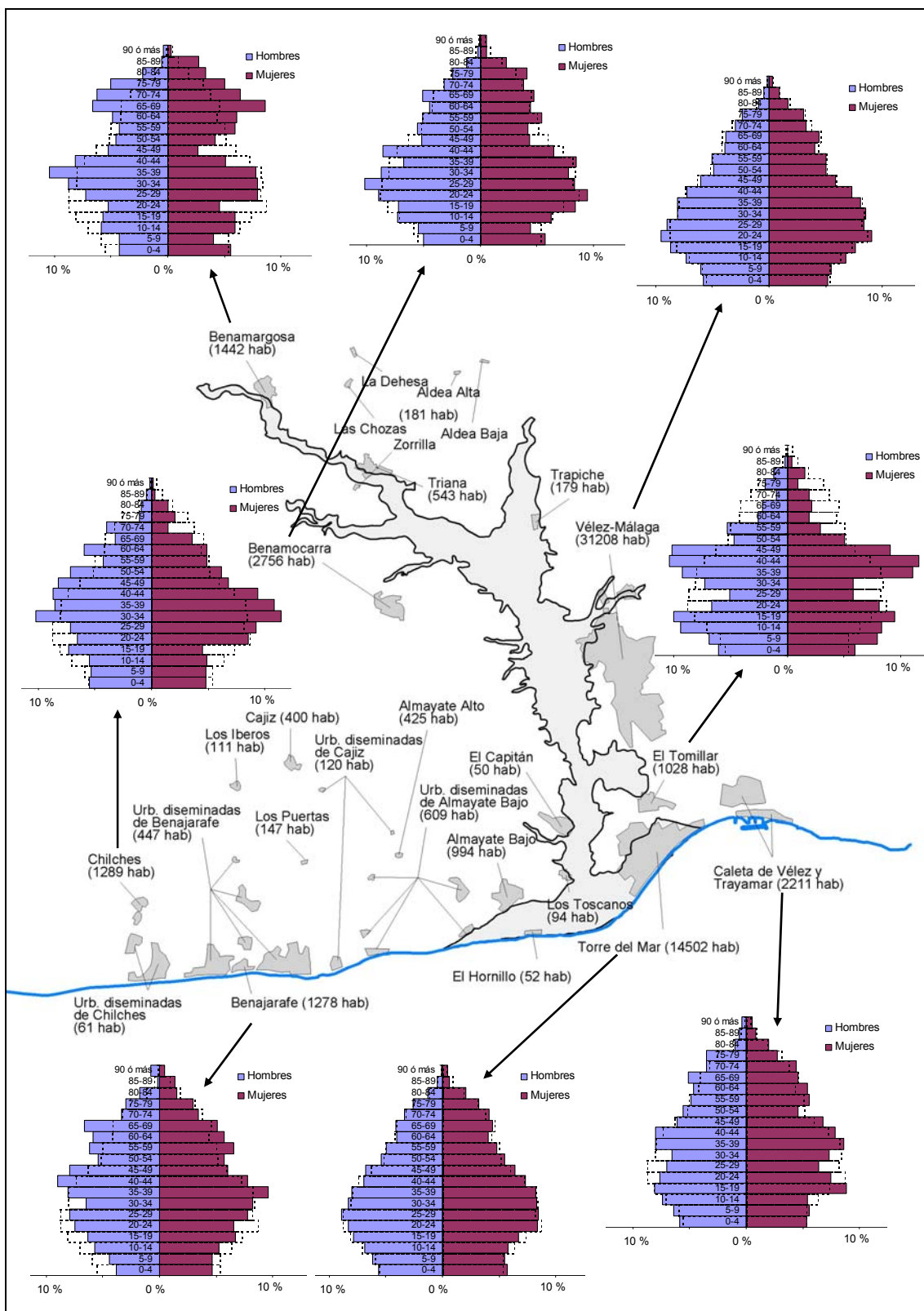


Figura 10.12. Pirámides de población de los núcleos más importantes del acuífero del río Vélez. En trazo discontinuo se ha representado la estructura por edad del conjunto de población dependiente.

Un hecho similar se puede observar en el caso de Caleta de Vélez, que muestra un crecimiento de población en la década de los ochenta, lo cual coincide con un desarrollo urbanístico importante, aunque a diferencia de El Tomillar, se desarrolló sobre un núcleo previamente establecido y consolidado.

Las pirámides de población de Benajárfé y Chilches se encuentran más alejados de la tendencia genérica antes apuntada, con una estructura por edad más envejecida, a favor de los grupos de edad en torno a los 60 y a los 40 años, respectivamente. Benamocarra, Torre del Mar y Vélez-Málaga muestran pirámides muy similares entre sí, con un retroceso en el crecimiento de la población progresivo desde los años setenta. Estos tres núcleos de población, junto con Caleta de Vélez, son los más poblados de la zona de estudio, de ahí que la similitud con la pirámide del conjunto de la población sea mayor.

10.1.9.2. POBLACIÓN OCUPADA

En los núcleos analizados en el epígrafe anterior, la población ocupada es de 20908 personas, principalmente en el sector servicios, donde se emplea más de la mitad del total. A diferencia del resto de acuíferos, la agricultura es un sector muy importante, en cuanto a población ocupada. La buena aptitud agrícola de los suelos del acuífero ha propiciado su uso para este fin desde antaño y, hoy en día, sigue siendo un importante sector de la economía local. El sector secundario está basado en la construcción, actividad que representa casi el 75 % de los ocupados en el mismo. El auge urbanístico que está teniendo lugar en los últimos años en toda la costa de la provincia de Málaga, también tiene su reflejo en esta zona, donde se están llevando a cabo importantes actuaciones urbanísticas.

Las principales actividades económicas son la agricultura, la construcción y el comercio, que aglutinan a más de la mitad de la población ocupada (figura 10.13). El comercio es la actividad que más población ocupa, debido en cierta medida a que Vélez-Málaga es la capital de la comarca de la Axarquía y en ella concurren los principales mercados de negocios. El sector inmobiliario es la octava actividad en importancia que emplea trabajadores.

La industria manufacturera, la hostelería, la educación y la administración pública son importantes referentes del volumen de población ocupada en la zona de estudio y, en menor medida, las actividades relacionadas con el transporte y la sanidad. El resto de actividades económicas tienen muy poco peso, en especial, las relacionadas con la industria extractiva, producción y distribución de energía, agua y electricidad, la pesca y empleados de organismos extraterritoriales.

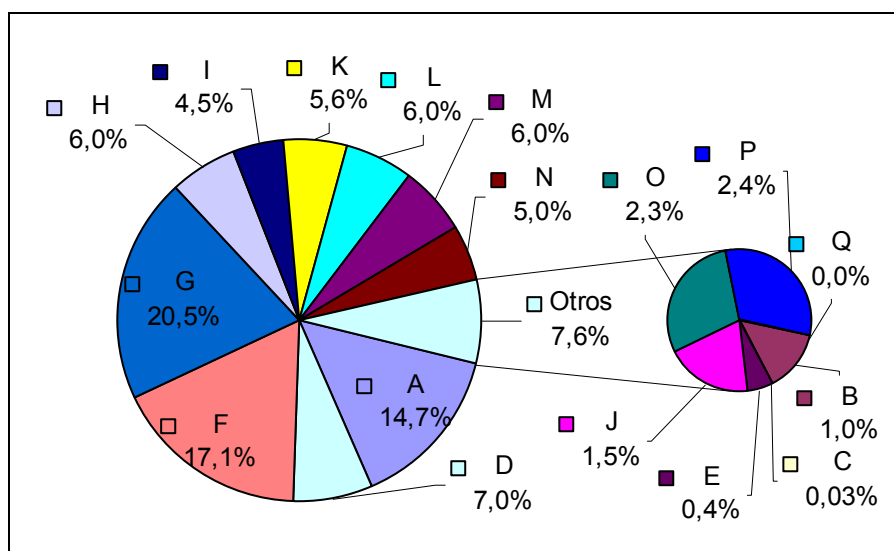


Figura 10.13. Porcentaje de población ocupada en los sectores productivos de los núcleos relacionados con el acuífero del río Vélez en el año 2001. Leyenda: A - Agricultura, ganadería, caza y silvicultura; B - Pesca; C - Industrias extractivas; D - Industria manufacturera; E - Producción y distribución de energía eléctrica, gas y agua; F - Construcción; G - Comercio; reparación de vehículos y aparatos de uso doméstico; H - Hostelería; I - Transporte, almacenamiento y comunicaciones; J - Intermediación financiera; K - Actividades inmobiliarias y de alquiler; servicios empresariales; L - Administración pública, defensa y seguridad social obligatoria; M - Educación; N - Actividades sanitarias y veterinarias; asistencia social; O - Otras actividades sociales y servicios personales, P - Actividades de los hogares y Q - Organismos extraterritoriales.

Este panorama genérico sobre las actividades que ocupan a la población del acuífero del río Vélez, presenta marcadas diferencias según la localidad que se analice (figura 10.14). Se observa una clara diferencia entre las localidades del interior y las del litoral. Benamocarra y Benamargosa son dos núcleos del interior que emplean casi a la mitad de su población en la agricultura (56 y 42 % respectivamente). Esta actividad, junto con el comercio y la construcción, absorbe la gran mayoría de la población ocupada en estas localidades. En cambio, los núcleos de la costa basan su economía en el comercio y la construcción, de modo que la agricultura pierde peso conforme se acerca a la costa.

Dentro de la similitud observada en las localidades costeras se pueden diferenciar tres tendencias. Los núcleos de Vélez-Málaga y Torre del Mar son los que emplean a un mayor porcentaje de población en el comercio y la construcción, casi una cuarta parte.

Chilches y El Tomillar tienen una distribución muy similar de la población ocupada y destacan por el elevado peso que tienen las actividades inmobiliarias y la educación.

Benajafé y Caleta de Vélez muestran un reparto más equitativo de la población ocupada. Ninguno de los principales sectores económicos destaca, en comparación con el resto de poblaciones y se observa un mayor peso de la categoría "Otros", donde se incluyen el resto de actividades económicas (sanidad, el transporte, finanzas, servicios sociales, pesca, minería etc).

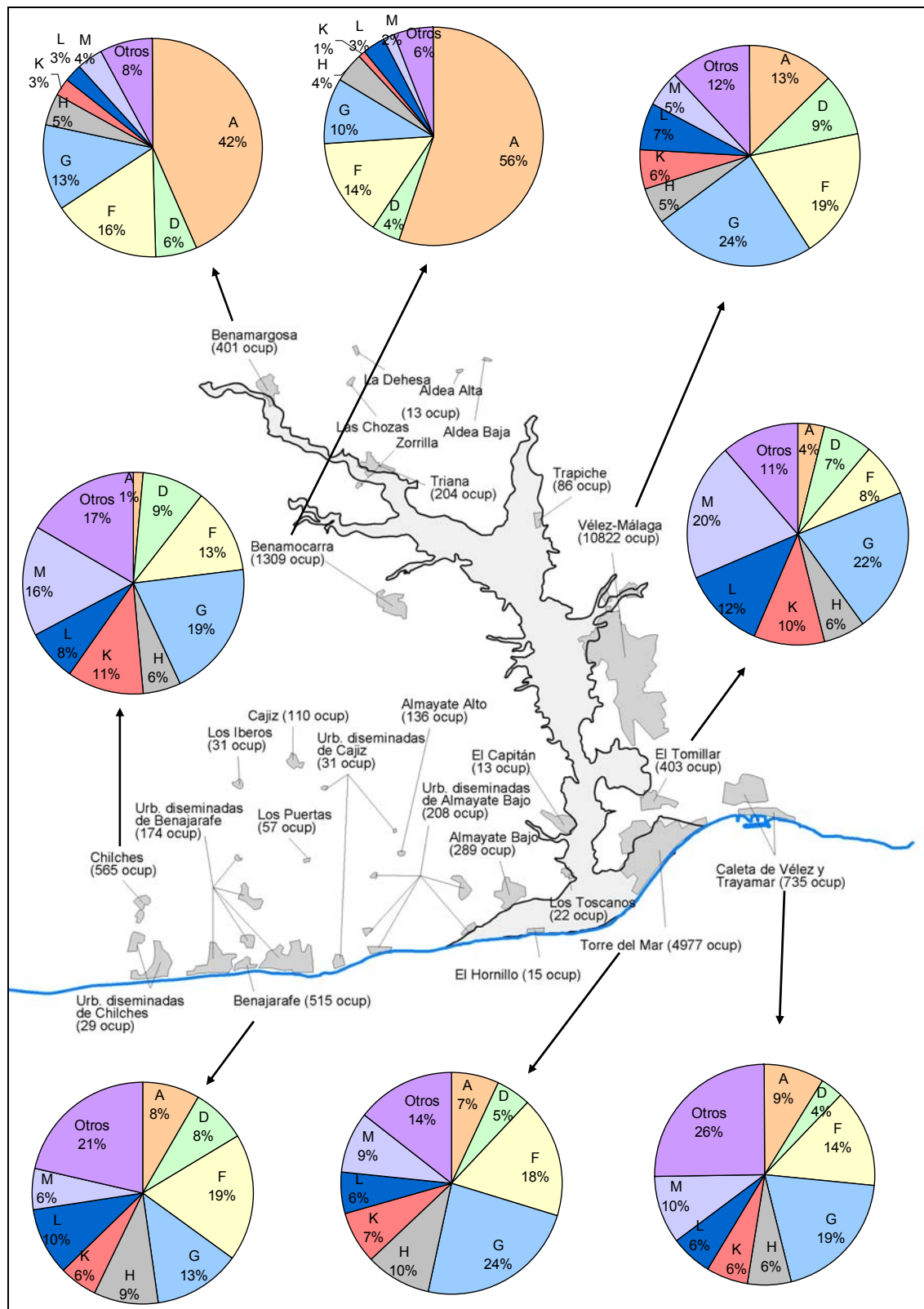


Figura 10.14. Distribución porcentual de la población ocupada durante el año 2001 en los principales sectores económicos de los núcleos más importantes del acuífero del río Vélez. Agricultura (A), Manufactura (D), Construcción (F), Comercio (G), Hostelería (H), Actividad Inmobiliaria (K), Administración Pública (L) y Educación (M).

10.1.10. ACTIVIDAD AGRÍCOLA

10.1.10.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES

La agricultura en el acuífero del río Vélez ha estado basada, históricamente, en el cultivo de productos hortícolas y sobre todo en la caña de azúcar. El retroceso en la actividad agrícola tras la crisis del cultivo de la caña, se frenó en la década de los setenta cuando tuvieron lugar una serie de condicionantes que hicieron resurgir la economía local basada en la agricultura. Langlade (2004) cita el retorno de los emigrantes, el progreso técnico en los sistemas de producción y la resolución del problema de la falta de agua para regar, como las causas de un cambio progresivo en la actividad agrícola de algunos valles costeros de la Axarquía.

El valle del río Vélez se localiza en una zona de típico clima mediterráneo, donde la pronunciada sequía estival reduce a mínimos la utilización de las aguas superficiales. La implantación generalizada en la llanura aluvial de sondeos y pozos para la extracción de las aguas subterráneas, eliminó la falta de recursos en los periodos de bajas precipitaciones. La limitación que tenía la expansión del regadío a partir de los recursos del acuífero se solucionó en la década de los noventa con la entrada en funcionamiento del embalse de La Viñuela, una obra perteneciente al Plan Guaro, según es cual la Confederación Hidrográfica del Sur abastecería agua a las tierras situadas hasta la cota 140 m s.n.m.

La actividad agrícola en la llanura aluvial del río Vélez está en retroceso por la fuerte competencia con la actividad urbanística. La expansión de la ciudad de Vélez-Málaga y Torre del Mar hacia el río, es un proceso creciente que va en detrimento de la agricultura. Los menores beneficios que genera esta actividad económica, frente al uso urbanístico del suelo, lleva aparejado el abandono de la tierra. Los sistemas de producción de la vega hacen que no sean cultivos competitivos en los mercados nacionales e internacionales, por lo que la renovación de los propietarios o la integración de jóvenes agricultores es prácticamente nula. La gran mayoría de los agricultores de la vega trabajan a tiempo completo, de manera que su principal entrada de ingresos es la horticultura, muy poco competitiva por la escasa tecnificación, menores rendimientos y lejanía de los principales mercados que incrementa los costes de producción. Paralelamente, hay que tener en cuenta que el principal sistema de producción es la medianera, por la cual los beneficios de la producción se reparten entre el propietario de la tierra y el agricultor. Esto implica una desvinculación muy fuerte de la tierra por parte del propietario, que unido a la falta de rentabilidad económica, hace que la oferta inmobiliaria sea un importante motivo de cambio en el uso de la tierra.

10.1.10.2. DISTRIBUCIÓN Y TIPOS DE CULTIVO

En la figura 10.15 se representa la distribución de los cultivos que dependen, en alguna medida, de los recursos hídricos del acuífero de Vélez, es decir, explotaciones agrícolas que utilizan el agua subterránea como complemento para el riego de los cultivos o como única fuente de abastecimiento.

En este mapa se pueden delimitar tres sectores según el tipo de cultivo: la llanura aluvial del río Vélez, las laderas del valle del río Vélez y el valle de Benamargosa. La llanura aluvial de los ríos Vélez y Benamargosa (tramo final en la confluencia con el Vélez) muestra una dedicación

exclusiva en el cultivo de productos hortícolas, tanto en invernaderos (principalmente en el sector norte del acuífero), como al aire libre. En las laderas de la margen derecha del río Vélez se observa, prácticamente, un monocultivo de subtropicales (en un 90 % aguacate) y en el valle de Benamargosa se solapa el cultivo de subtropicales con el de cítricos (limón), aunque este último toma mayor importancia aguas arriba de dicha localidad.

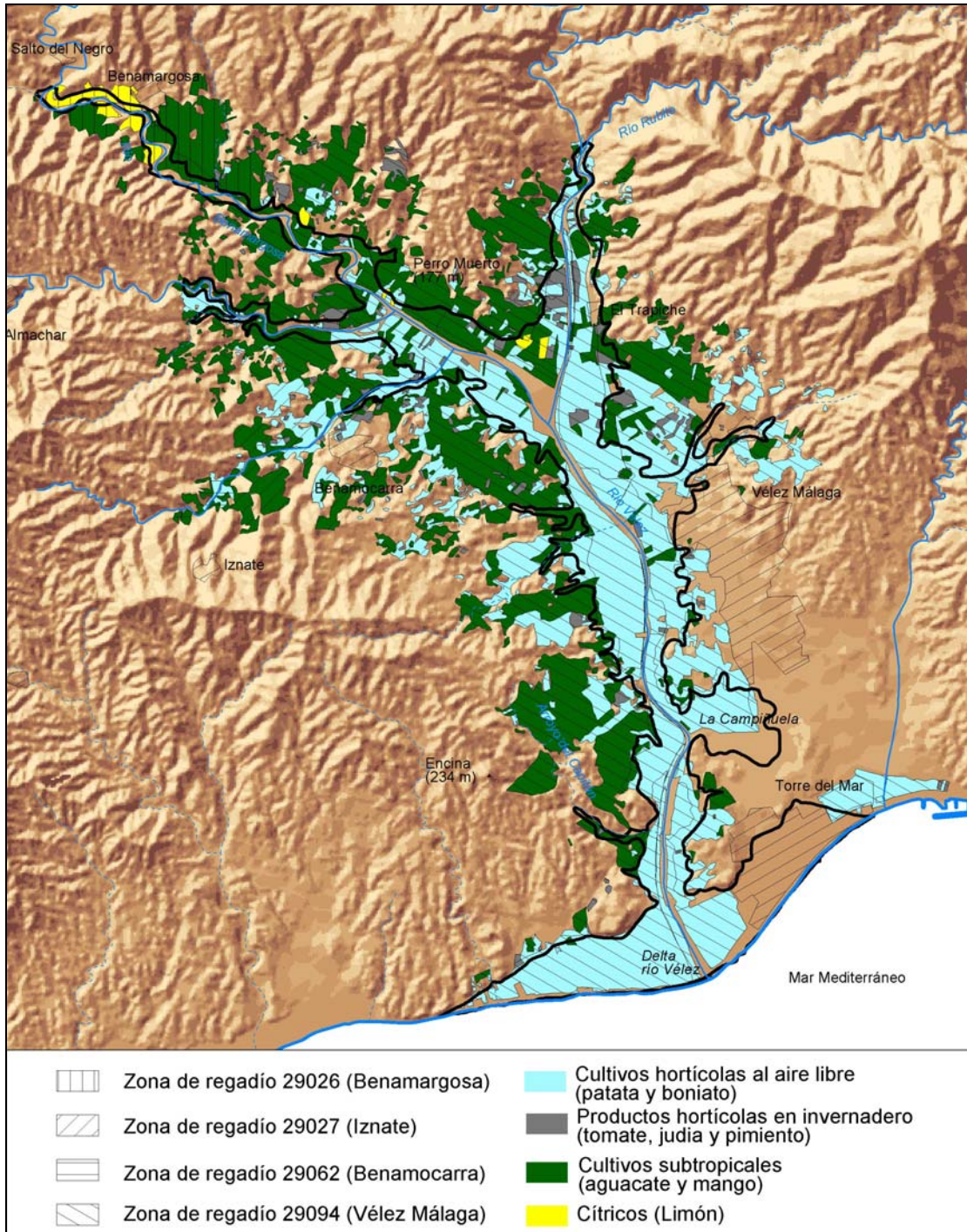


Figura 10.15. Distribución de los cultivos regados con aguas del acuífero y zona de riego a la que pertenece según DAP (1997).

Los principales productos hortícolas cultivados al aire libre son la patata y el boniato, mientras que los de invernadero son tomate, pimiento y judía. El cultivo que ha tomado el relevo de la horticultura como valuarte de la producción agrícola en el valle del Vélez es el subtropical: mango y, sobre todo, aguacate. Los subtropicales, que representan una quinta parte de la superficie regada, se cultivan preferentemente en las laderas de la llanura debido al tipo de suelo y a las condiciones climáticas. El aguacate es un cultivo que no se adapta bien a los suelos donde la componente arcillosa sea importante, como ocurre en la vega frente a los suelos más arenosos de las laderas de esquistos. Por otra parte, la frecuencia de heladas en la vega limita el desarrollo del aguacate y su cultivo se traslada a cotas superiores, donde el riesgo de helada es menor. Un factor determinante es la disponibilidad de agua, al ser un cultivo que demanda un gran volumen, aproximadamente 6000 m³/ha, en comparación con los otros cultivos de la zona. El agua se obtiene por bombeo a través de los sondeos en el acuífero de Vélez o con agua de la presa de La Viñuela. El cultivo del aguacate se desarrolla hasta la cota 200 m s.n.m., aproximadamente. Por encima de esta cota se cultiva, en mayor medida, el mango, una especie que necesita menos cantidad de agua y que se complementa bien con los aportes de agua de los sondeos en esquistos (caudales entorno a 1-3 l/s).

Al margen de los condicionantes físicos que determinan la implantación del aguacate en unas zonas u otras, las razones por las cuales se ha producido una eclosión del aguacate son varias, diferenciadas entre económicas, profesionales y técnicas.

Desde un punto de vista económico, la expansión del aguacate está determinada por la elevada rentabilidad que conlleva la puesta en explotación de este producto. La elevada productividad, escasos insumos y poca mano de obra o jornal necesario para sacar adelante la producción, hace que sea un cultivo muy rentable. El principal coste de la puesta en explotación de aguacates procede de la implantación del sistema de riego localizado y la bomba de extracción, que en función de la altitud hasta la que se tenga que elevar el agua variará su precio entre 2000 y 6000 € (Langlade, 2004).

La escasa dedicación y cuidados que necesita una plantación de aguacates representa un gran atractivo para su puesta en explotación, pues permite solapar la actividad agrícola, de carácter secundario, con la principal actividad profesional de los propietarios, empresas del sector servicios.

Los condicionantes técnicos están referidos a la implantación del cultivo en las laderas y al sistema de riego utilizado. El problema de la falta de agua para un cultivo que demanda grandes cantidades se ha solucionado con la puesta en funcionamiento del riego localizado o riego "por goteo" con agua bombeada a partir de los sondeos situados en la vega. La entrada en funcionamiento del embalse de La Viñuela para abastecimiento de las poblaciones de la comarca y el riego de la margen izquierda del río Vélez, ha permitido que se recargue el acuífero y que la demanda de agua para riego quede satisfecha con los recursos hídricos del acuífero del río Vélez.

Los cítricos, concretamente el limón, son el tercer tipo cultivo en este acuífero, y se localizan sobre todo en el valle del río Benamargosa. En la actualidad es un producto que no ofrece grandes beneficios, debido a la entrada de mercados más competitivos que los reducen, pero la zona donde se cultiva permite obtener limones extratempranos, con lo cual su salida en el mercado siempre se ve favorecida. Aun así, una línea que se está promoviendo es la conversión de las explotaciones de cítricos tradicionales a cultivos ecológicos, con mejores

mercados y una salida más amplia. En el valle del Benamargosa la importancia que tiene el cultivo del limón en la economía local es muy elevada.

10.1.11. HOSTELERÍA Y OTRAS ACTIVIDADES PRODUCTIVAS

El sector hostelero en los municipios de Vélez-Málaga, Benamocarra y Benamargosa está concentrado en el primero, donde se localiza el 94% de los 368 establecimientos del área de estudio, según los datos del Instituto de Estadística de Andalucía para el año 2001.

En el municipio de Vélez-Málaga hay 346 locales dedicados a la hostelería, repartidos entre establecimientos dedicados a la restauración y apartamentos, los cuales aglutinan la mayoría de los establecimientos hosteleros, casi un 90% (figura 10.16). Destaca el elevado número de restaurantes, 113, una cifra muy similar a la de municipios con una clara vocación turística, como son Torremolinos y Benalmádena. Los restaurantes tienen una elevada importancia en la economía del municipio de Vélez-Málaga, dado que la hostelería es el tercer sector económico en cuanto a número de locales y los restaurantes representan la mayor parte de ellos.

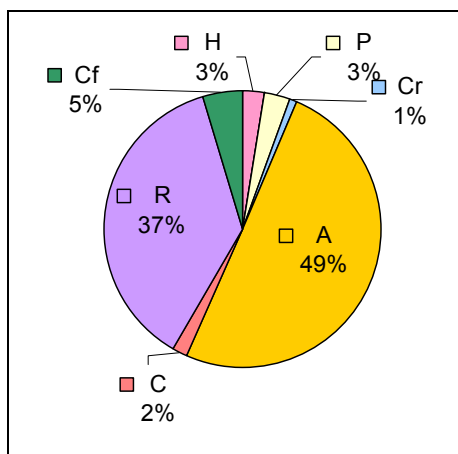


Figura 10.16. Distribución porcentual de los establecimientos hosteleros en el municipio de Vélez-Málaga. Leyenda: H = hotel, A = Apartamento, P = pensión, C = campamento, Cr = casa rural, R = restaurante y Cf = cafetería.

En los municipios de Benamocarra y Benamargosa, el número de establecimientos hosteleros es muy bajo, sólo 22, de los cuales tres cuartas partes están localizados en Benamocarra, principalmente, restaurantes y hoteles.

Por último, se ha localizado una empresa dependiente de los recursos del agua subterránea, al margen de la hostelería, como es el parque de atracciones acuático de Vélez-Málaga. Esta empresa se fundó en 1988 y tiene su principal periodo de actividad en los meses de verano (de junio a septiembre), época en la cual se llegan a contratar de forma temporal alrededor de 50 trabajadores, mientras que durante el resto del año son ocho los empleados fijos. El personal empleado de forma temporal es muy variado, la mayor proporción se concentra en el puesto de socorrista, que puede llegar a representar el 45 % de la plantilla, mientras que el resto se ocupa de tareas relacionadas con la limpieza, administración, hostelería, mantenimiento y servicio médico.

10.2. EVALUACIÓN Y CARTOGRAFÍA DE LOS PELIGROS DE CONTAMINACIÓN SOBRE EL ACUÍFERO DEL RÍO VÉLEZ

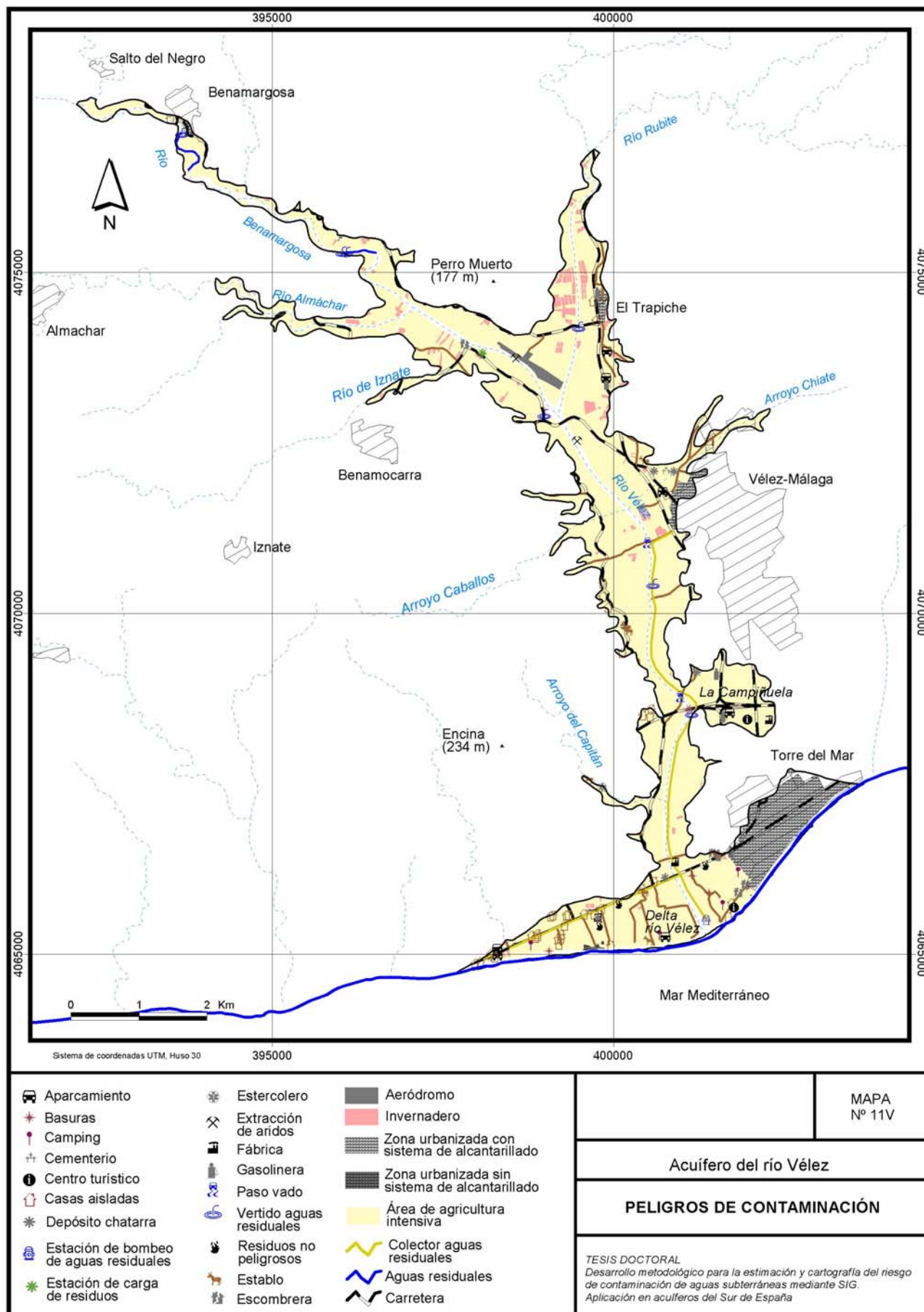
10.2.1. INVENTARIO DE PELIGROS DE CONTAMINACIÓN

El acuífero del río Vélez es un espacio con una calidad ambiental ampliamente deteriorada por el hombre. La presencia de residuos, tanto de origen agrícola como procedente de la actividad urbana, es manifiesta en gran parte de la superficie del acuífero. Sobre éste se han detectado un total de 22 tipos de peligros potenciales de contaminación. La gran mayoría de los peligros están ligados a infraestructuras urbanas (cuadro 10.8), de los cuales la mitad son actualmente causa de deterioro ambiental del acuífero. Entre ellos cabe destacar el vertido de aguas residuales en las localidades situadas en el valle de Benamargosa y los cultivos de la vega del río Vélez que causan problemas de contaminación de las aguas subterráneas.

	Tipos de peligros	Entidad cartográfica
INFRAESTRUCTURAS URBANAS	Zonas urbanizadas con red de alcantarillado	Polígono
	Zonas urbanizadas sin red de alcantarillado	Polígono
	Casas aisladas	Punto
	Descarga de aguas residuales en cursos de agua superficial	Punto
	Depósitos de basuras	Punto
	Estación de carga de residuos y/o depósito de chatarra	Punto
	Depósito de escombros	Punto
	Gasolineras	Punto
	Carretera sin garantía	Línea
	Área de aparcamiento sin garantía	Punto
	Pista de aterrizaje	Polígono
	Centro turístico	Punto
	Camping	Punto
Cementerio	Punto	
ACTIVIDADES INDUSTRIALES	Extracción de áridos	Punto
	Fundición en talleres y fábricas	Punto
	Zona de residuos no peligrosos	Punto
	Conductos de aguas residuales	Línea
GANADERÍA Y AGRICULTURA	Establos	Punto
	Estercolero	Punto
	Áreas de agricultura intensiva	Polígono
	Invernadero	Polígono

Cuadro 10.8. Peligros potenciales de contaminación de las aguas subterráneas localizados en el acuífero del río Vélez.

La mayor presencia de peligros tiene lugar en el delta y en la margen izquierda del río Vélez (mapa 11V). En ambas zonas se concentra la población y las principales vías de comunicación de la zona de estudio.



Hacia el norte, aguas arriba de la confluencia de los ríos Benamargosa y Vélez, disminuye la presencia de peligros sobre el acuífero. No obstante, se han localizado puntos de vertido de aguas residuales que constituyen los focos de mayor impacto, dado que dejan de ser peligros potenciales para convertirse en peligros reales.

Dada la fertilidad de las tierras de la vega del río Vélez y a la tradición agrícola de los habitantes de esta zona, la actividad que mayor repercusión potencial tiene sobre el acuífero es la agricultura. Toda su superficie está ocupada por cultivos hortícolas de regadío, a excepción del cauce y de los terrenos dedicados a otras actividades humanas. El empleo de fertilizantes y pesticidas es una práctica normal en los modos de producción agrícola de la zona, e incluso el riego con aguas residuales que obtienen del colector general de Vélez-Málaga en épocas de sequía. La actividad agrícola ha provocado el deterioro no sólo de las aguas superficiales (foto 10.1) que posteriormente repercute en la calidad de las aguas infiltradas, sino también del paisaje por el masivo empleo de plásticos que a veces se acumulan en las lindes de las parcelas (foto 10.1). Los invernaderos son un modo particular de producción comparado con los cultivos hortícolas de regadío, cuya característica radica en la intensificación de la producción mediante el empleo, entre otros elementos, de una mayor cantidad de sustancias nocivas, básicamente pesticidas y fertilizantes.



Foto 10.1. Proceso de eutrofización de las aguas del río Vélez (izquierda) y acumulación de plásticos en invernaderos (derecha).

Otras actividades agropecuarias, que potencialmente pueden convertirse en un foco de contaminación, son las granjas de animales situadas aguas abajo de la confluencia de los ríos Vélez y Benamargosa. Se ha localizado una perrera de grandes dimensiones en el arroyo del Capitán donde se concentra una gran cantidad de animales y diversas cuadras donde se cobija al ganado equino. La acumulación de residuos orgánicos de las caballerizas puede ser objeto de lixiviado por el agua de lluvia en el acuífero, arrastrando incluso componentes microbiológicos (foto 10.2). Por otra parte, el estiércol es utilizado como abono orgánico en los cultivos de la vega, hecho que ha propiciado la aparición de empresas dedicadas a su almacenamiento y distribución. Ello ha originado la aparición de estercoleros que constituye focos de contaminación, como el localizado en la margen derecha del arroyo El Capitán cerca de su desembocadura en el río Vélez (foto 10.2). Además, la acumulación de residuos orgánicos en cualquier punto del río es una práctica habitual junto con basuras de origen agrícola y urbano.



Foto 10.2. Cuadras en el río Vélez (izquierda) y estercolero en el arroyo El Capitán (derecha).

En cuanto al grupo de actividades industriales destaca la presencia de peligros relacionados con la conducción de aguas residuales. En esta categoría se han incluido los principales colectores de aguas residuales que conducen el agua hasta la depuradora del municipio. Dichos colectores transcurren paralelos a la antigua carretera N-340 y a la margen izquierda del río Vélez desde la localidad de Vélez-Málaga hasta el delta, donde se encuentra la estación de bombeo de aguas residuales de Torre del Mar.

La actividad industrial dedicada a la extracción de áridos se ha desarrollado en la confluencia de los ríos Benamargosa y Vélez, si bien los motivos de dicha actividad no son mineros, puesto que responde a las obras de acondicionamiento del cauce del río Vélez y Benamargosa, como medida de prevención del riesgo de avenidas e inundaciones. En cualquier caso, se ha realizado la extracción de un gran volumen de sedimentos que disminuye la capa protectora del acuífero y, además, el empleo de maquinaria pesada sobre el mismo cauce aumenta la probabilidad de contaminación (foto 10.3). Sí se ha detectado actividad extractiva, con fines económicos, en la zona de la Campiñuela donde se lleva a cabo la explotación de arcillas y limos para la fabricación de material de construcción.



Foto 10.3. Extracción de áridos en la zona de la Campiñuela (izquierda) y extracción de áridos del cauce del río Vélez (derecha).

En la categoría de residuos no peligrosos se han incluido aquellas actividades en las que se acumulan productos relacionados con el mantenimiento de vehículos (neumáticos, aceites o baterías) todas ellas ubicadas en el delta del río.

También se han tenido en cuenta fábricas o talleres donde se lleva a cabo la transformación de materiales de hierro y arcillas. En cualquier caso, la incineración necesita de hidrocarburos cuyos residuos se emiten posteriormente al medio, pero en el delta del río Vélez se ha localizado un taller donde se incineran restos procedentes de la transformación de desechos metálicos.

Respecto a los peligros derivados de la actividad urbana se ha observado una amplia variedad de casos. En primer lugar, las zonas urbanizadas son las que mayor superficie abarcan, caso de Torre del Mar y El Hornillo en el delta del río Vélez, o la barriada de Trapiche al norte de Vélez-Málaga (foto 10.4). Otras zonas urbanizadas se localizan justo en el límite del acuífero como ocurre con Almayate, Monte Azul, Triana, Benamargosa; estos núcleos poseen sistemas de alcantarillado, pero en algunos casos no tienen sistemas de depuración de aguas. En el delta del río Vélez se han localizado áreas urbanizadas donde no existen sistemas de alcantarillado (foto 10.4) y en el valle del río Almáchar, afluente del río Benamargosa, en una zona conocida como Atalayas Bajas.

En el área deltaica al sur de la carretera N-340, las áreas urbanizadas no tienen sistema de alcantarillado, a pesar de la cercanía del colector de aguas residuales, por el coste que supone bombear el agua hasta el colector principal. En cambio, sí se está llevando a cabo el saneamiento integral de las áreas urbanizadas al norte de la carretera N-340, dado que el agua es conducida hasta el colector principal por gravedad.

Otro tipo de urbanización del acuífero se corresponde con la categoría de casas aisladas sin sistema de alcantarillado, muy presente en el sector deltaico y en el borde occidental del acuífero junto a la antigua carretera Vélez-Málaga - Málaga.



Foto 10.4. Localidad de Trapiche incluida como área urbanizada con alcantarillado (izquierda) y núcleo de chabolas sin sistema de alcantarillado cerca de Torre del Mar (derecha).

Puntos de vertido de aguas residuales urbanas se han detectado en cinco localidades: Benamargosa (foto 10.5), Benamocarra, Triana (foto 10.5), Trapiche y Vélez-Málaga. Las cuatro primeras vierten sus aguas directamente al cauce del río Benamargosa y Vélez, mientras que Vélez-Málaga vierte aguas residuales en zonas conocidas como Camino de Remanentes y Parque María Zambrano, puntos que en la actualidad están denunciados en la Delegación Provincial de Medio Ambiente.



Foto 10.5. Vertido de aguas residuales en la localidad de Benamargosa (arriba izquierda) y barriada de Triana (arriba derecha). Abajo detalle del vertido de las aguas residuales urbanas de Benamargosa.

Un peligro que no se puede llegar a considerar como vertido, pero que afecta directamente a la calidad de las aguas superficiales y en consecuencia a las aguas subterráneas es la presencia de una alberca donde se acumulan aguas contaminadas a escasos metros de la depuradora de aguas de Vélez-Málaga, sita en una zona conocida como “La Barraca”, junto al cauce del río Vélez. En la base hay un aliviadero que vierte hacia el cauce del río (foto 10.6).



Foto 10.6. Alberca de aguas contaminadas junto al cauce del río Vélez. En la imagen de la derecha se ha marcado en color rojo la posición del aliviadero y la dirección del vertido.

En estrecha relación con la actividad urbana y agrícola, también se han localizado numerosos puntos donde se acumulan basuras de todo tipo como plásticos, restos orgánicos,

maderas, textiles, materiales de construcción e incluso coches abandonados en pleno cauce del río Vélez (foto 10.7 arriba izquierda). La presencia de este tipo de residuos se hace más patente en las zonas aledañas a las carreteras y caminos (foto 10.7 arriba derecha) y en el cauce del río (foto 10.7 abajo), un lugar donde tradicionalmente se han arrojado todos los desechos procedentes de la actividad humana, puesto que tarde o temprano el agua del río arrastra la basura acumulada.



Foto 10.7. Residuos procedentes de la actividad urbana y agrícola.

Otra categoría de peligros relacionados con la acumulación de residuos procedentes de la actividad urbana es la presencia de escombreras y depósitos de chatarra. Los primeros están distribuidos a lo largo de toda la superficie del acuífero, aunque tienen mayor repercusión en la confluencia de los ríos Vélez y Benamargosa, donde se ha localizado una antigua estación de carga de residuos (foto 10.8), en la cual se han acumulado multitud de escombros. Los depósitos de chatarra también son visibles en el propio cauce del río Vélez, sobre todo uno localizado en la zona de la Campiñuela y un desguace al norte de la localidad Vélez-Málaga.



Foto 10.8. Acumulación de escombros en el cauce del río Vélez (izquierda) y de depósito chatarra en la Campiñuela (derecha).

Dentro de los residuos procedentes de la actividad urbana, también cabe hacer referencia a otros peligros que potencialmente generan contaminación, como son los relacionados con las infraestructuras de comunicación. Las carreteras se han considerado como peligro de contaminación cuando no posean medidas de evacuación de líquidos, y en el caso de tener canales de desagüe, cuando estos viertan directamente al acuífero (foto 10.9 derecha).



Foto 10.9. Carretera sin canal de desagüe (izquierda) y con canal de evacuación de líquidos hacia el acuífero (derecha).

Un caso particular en el que el tránsito de vehículos afecta directamente sobre el medio son los vados por los cuales se cruza el río. Algunos como el de la foto 10.10, son especialmente transitados, pues suponen un enlace entre la carretera de la costa, la zona de la Campiñuela y Vélez-Málaga.

Dos elementos ligados directamente a las carreteras son las gasolineras y áreas de aparcamiento. En el caso de las gasolineras se han localizado seis: dos en el delta cerca de Torre del Mar y cuatro en el valle del río Vélez entre la Campiñuela y Trapiche (foto 10.10). Zonas de aparcamiento se han detectado ocho en total, relacionadas con áreas de descanso en gasolineras, centros comerciales o campamentos.



Foto 10.10. Paso de vehículos por un vado (izquierda) y gasolinera en Trapiche (derecha).

Un peligro similar a las carreteras, en cuanto a su concepción son las pistas de aterrizaje. En el caso del acuífero del río Vélez se ha localizado un aeródromo en la confluencia de los ríos Benamargosa y Vélez (foto 10.11).



Foto 10.11. Pista de aterrizaje del aeródromo de Vélez-Málaga.

Otros peligros, de menor entidad, pero potencialmente contaminantes son los cuatro campings situados en el delta del río Vélez, un centro comercial en la zona de la Campiñuela (catalogado como centro turístico en el cuadro 10.8) y el cementerio de Vélez-Málaga al norte de la localidad del mismo nombre. Éstos terminan por cubrir el amplio espectro de peligros de contaminación detectados sobre el acuífero.

10.2.2. NOCIDIDAD DE LOS PELIGROS: FACTOR H

Las actividades humanas con mayor nocividad que se han detectado sobre el acuífero, proceden tanto de la actividad industrial como urbana y, en ambos casos, se encuentran ligadas, principalmente, a las aguas residuales. En este sentido, la presencia de zonas urbanizadas desconectadas de la red integral de saneamiento, la conducción de aguas residuales y, en algunos casos, la descarga directa a los cauces de los ríos sobre el acuífero

son los peligros de mayor impacto, que han sido evaluadas con una nocividad de clase Moderada (cuadro 10.9).

Tipos de peligros		Factor H (nocividad)
INFRAESTRUCTURAS URBANAS	Zonas urbanizadas con red de alcantarillado	35
	Zonas urbanizadas sin red de alcantarillado	70
	Casas aisladas	45
	Descarga de aguas residuales sobre aguas superficiales	60*
	Depósitos de basuras	40
	Estación de carga de residuos y/o depósito de chatarra	40
	Depósito de escombros	35
	Gasolineras	60
	Carretera sin garantía	40
	Área de aparcamiento sin garantía	35
	Pista de aterrizaje	35
	Centro turístico	30
	Camping	30
Cementerio	25	
ACTIVIDADES INDUSTRIALES	Extracción de áridos	30
	Fundición	40
	Zona de residuos no peligrosos	45
	Conductos de aguas residuales	65
GANADERÍA Y AGRICULTURA	Establos de animales	30
	Estercolero	45
	Área de agricultura intensiva	25
	Invernadero	30

Cuadro 10.9. Factor H para los peligros detectados en el acuífero del río Vélez, según los criterios de De Keteleare *et al.* (2004). El valor de “descarga en aguas superficiales” ha sido modificado por el de “superficie para aguas residuales urbanas”.

Junto a los peligros relacionados con las aguas residuales, otros de nocividad Moderada son las gasolineras. El resto de los peligros de contaminación tienen una nocividad de clase Baja.

La distribución de los peligros según la clase de nocividad (mapa 1V de anexo), muestra una dispersión regular por todo el acuífero y no se han detectado zonas donde se concentren peligros de una determinada clase de nocividad. Peligros evaluados con una clase de nocividad Moderada se han localizado desde el punto más septentrional (valle del río Benamargosa) hasta la desembocadura del río Vélez.

10.2.3. INTENSIDAD DE LA CONTAMINACIÓN: FACTOR Q_n

La mayor cantidad de sustancias potencialmente contaminantes empleadas sobre el acuífero del río Vélez tiene lugar en las zonas de cultivo. El empleo del riego a manta en la llanura aluvial, para el cultivo de los productos hortícolas, lleva aparejado un aumento de la cantidad de fertilizantes y pesticidas necesarios para compensar la dilución que se produce por este tipo de técnica de riego. Por ello se ha asignado un valor del factor Q_n superior al promedio, concretamente 1,2, a toda la zona cultivada de la llanura aluvial.

Con una intensidad mayor que 1 también se ha evaluado una gasolinera en la cual se puede almacenar una cantidad de combustible por encima de la media más una desviación estándar, mientras que el resto de gasolineras con un valor 1.

Con un valor menor que 1 se han evaluado aquellas actividades que no utilizan una gran cantidad de contaminantes en su proceso productivo. En este grupo se han incluido peligros relacionados con residuos urbanos y el cementerio de Vélez-Málaga, los cuales bien por la magnitud del peligro (cementerio, escombreras, depósitos de chatarra o acumulación de residuos no peligrosos) o bien por el abandono de la actividad (caso de una antigua estación de carga de residuos) reducen la cantidad de contaminantes que potencialmente pueden ser introducidos en el medio.

Al resto de peligros se le ha asignado un valor 1 de intensidad, es decir, un valor neutro debido a la falta de datos con los que depurar las características de cada tipo de peligro.

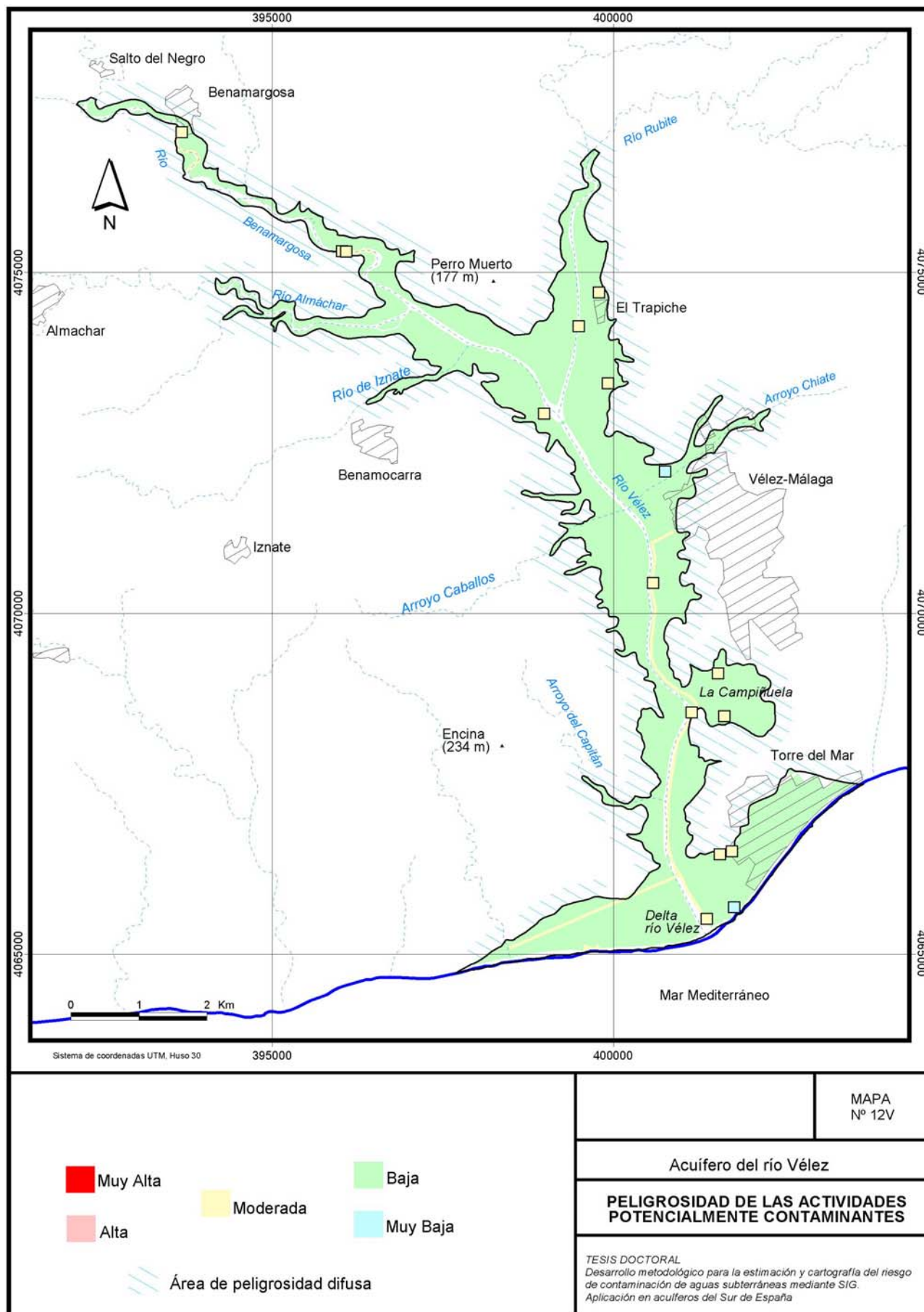
Al igual que ocurre con el factor H, no se puede asignar un patrón concreto a la distribución de los peligros en función del factor Q_n (mapa 1V del anexo cartográfico). Los valores de intensidad asignados a los distintos peligros sobre el acuífero tienen lugar en cualquier punto del mismo, aunque se observa que los de clase Muy Baja (valor 0,8) predominan en el Sur.

10.2.4. PROBABILIDAD DE CONTAMINACIÓN: FACTOR R_f

La probabilidad de vertido de sustancias nocivas procedentes de las distintas fuentes potencialmente contaminantes es máxima en todo el acuífero y para todos los tipos de peligro a excepción de las gasolineras (mapa 1V del anexo cartográfico). Las gasolineras localizadas sobre el acuífero tienen medidas de protección contra los incendios y recogida de residuos según la normativa vigente del Ministerio de Industria y Energía. Estas medidas permiten reducir la probabilidad de vertido sobre el acuífero y estimar el factor R_f con un valor 0'85. El resto de peligros han sido evaluados con un valor 1, por la falta de un criterio taxativo para su valoración, puesto que se trata de un factor con un elevado peso en la valoración final de la peligrosidad.

10.2.5. ÍNDICE DE PELIGROSIDAD: HI

La peligrosidad de las distintas actividades humanas sobre el acuífero de Vélez (mapa 12V y 1V del anexo) es, en general, Baja y sólo se han localizado puntualmente peligros con un grado de peligrosidad de clase Moderada (vertidos de aguas residuales y gasolineras) y con una peligrosidad de clase Muy Baja. Con este menor grado de peligrosidad ha sido evaluado el cementerio de Vélez-Málaga situado en el sector central del acuífero. La presencia de enterramientos de tipo nicho y su pequeña dimensión son aspectos que reducen la nocividad inicial de clase Baja a una peligrosidad de clase Muy Baja.



En el caso de las aguas residuales no se han obtenido diferencias en la peligrosidad independientemente de que se trate de un vertido o de una canalización. En ambos casos se ha obtenido la misma categoría, cuando en la actualidad los vertidos conllevan un impacto sobre el medio. Este ejemplo muestra que el factor Q_n establecido por De Keteleare *et al.* (2004) debería de recoger, en mayor medida, variaciones en el grado final de peligrosidad.

El resto de actividades y fuentes de contaminación tienen una peligrosidad de clase Baja. La catalogación obtenida para las explotaciones agrícolas ofrece ciertas dudas sobre su correcta valoración, no por los criterios utilizados en su evaluación sino por los criterios de partida que ofrece el método HI. Los pozos de abastecimiento situados en la parte sur han sido clausurados por la empresa gestora del abastecimiento de agua a Vélez-Málaga, debido al elevado contenido en nitratos del agua subterránea, como consecuencia de los fertilizantes y pesticidas utilizados en los cultivos, lo que en cierta medida contradice la baja peligrosidad que el método ha asignado a esta actividad. La peligrosidad obtenida para la agricultura, hay que analizarla en un contexto más amplio y relativizarla con respecto a otros tipos de peligros, puesto que la contaminación por nitratos es más susceptible de ser atenuada por dilución.

La situación geográfica del acuífero en un lugar deprimido topográficamente, respecto a su entorno más cercano, es un hecho que aumenta la probabilidad de contaminación del mismo desde fuentes situadas en sectores próximos a su superficie. En este sentido, la presencia de peligros de contaminación en los bordes del acuífero puede ser considerado como una fuente de contaminación más, puesto que la topografía del medio favorece la circulación de los flujos de agua, tanto superficiales como subterráneos, hacia el acuífero.

El análisis de los peligros que pueden influir en la calidad de las aguas subterráneas, desde sectores ajenos a la superficie del mismo, necesita del cálculo de procesos complejos en cuanto a transporte de contaminantes, puesto que el movimiento se produce no sólo en la vertical del acuífero, sino también en horizontal. La elevada complejidad que se cierne sobre este tipo de análisis, como por ejemplo la estimación de la distancia máxima con la que un contaminante alcanza un punto determinado, tipo de sustancia que potencialmente puede ser vertida o la combinación de flujos superficiales y subterráneos son aspectos que aumentan la complejidad del análisis de los peligros y que el método HI (De Keteleare *et al.*, 2004) no tiene en cuenta. El método utilizado evalúa la peligrosidad de que un contaminante sea vertido sobre el acuífero, pero no de cómo el contaminante se moviliza desde un punto a otro.

Con el propósito de completar la presencia de peligros que podrían afectar al acuífero, se ha delimitado una franja potencial de entrada de contaminantes, entre el acuífero y aquellas zonas en las que se han observado peligros de contaminación colindantes. Los cultivos en las laderas del valle, el casco urbano de la localidad de Vélez-Málaga son peligros adyacentes al límite superficial del acuífero. La franja así delimitada es indicativa, simplemente, de la presencia de peligros de contaminación cercanos al acuífero, pero en ningún caso es resultado de un análisis más profundo, donde se tengan en cuenta los procesos antes comentados que pueden influir en el transporte de contaminantes desde un punto hasta el acuífero. Dicha franja, denominada área de peligrosidad difusa (Mapa 12V y 1V del anexo), rodea el borde del acuífero casi en su totalidad. Los únicos puntos donde no se han observado peligros adyacentes al acuífero son: una pequeña zona en el extremo norte del valle del Benamargosa y, al norte del delta, en la margen derecha del río Vélez. En ambas zonas los terrenos están ocupados por vegetación natural o cultivos abandonados.

10.3. EVALUACIÓN Y CARTOGRAFÍA DE VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DEL ACUÍFERO DEL RÍO VÉLEZ

Los métodos COP y EPIK no han sido aplicados en el acuífero aluvial de Vélez porque son específicos para evaluar la vulnerabilidad de acuíferos carbonáticos. Así, los métodos aplicados en el acuífero de Vélez son: DRASTIC, GOD y AVI.

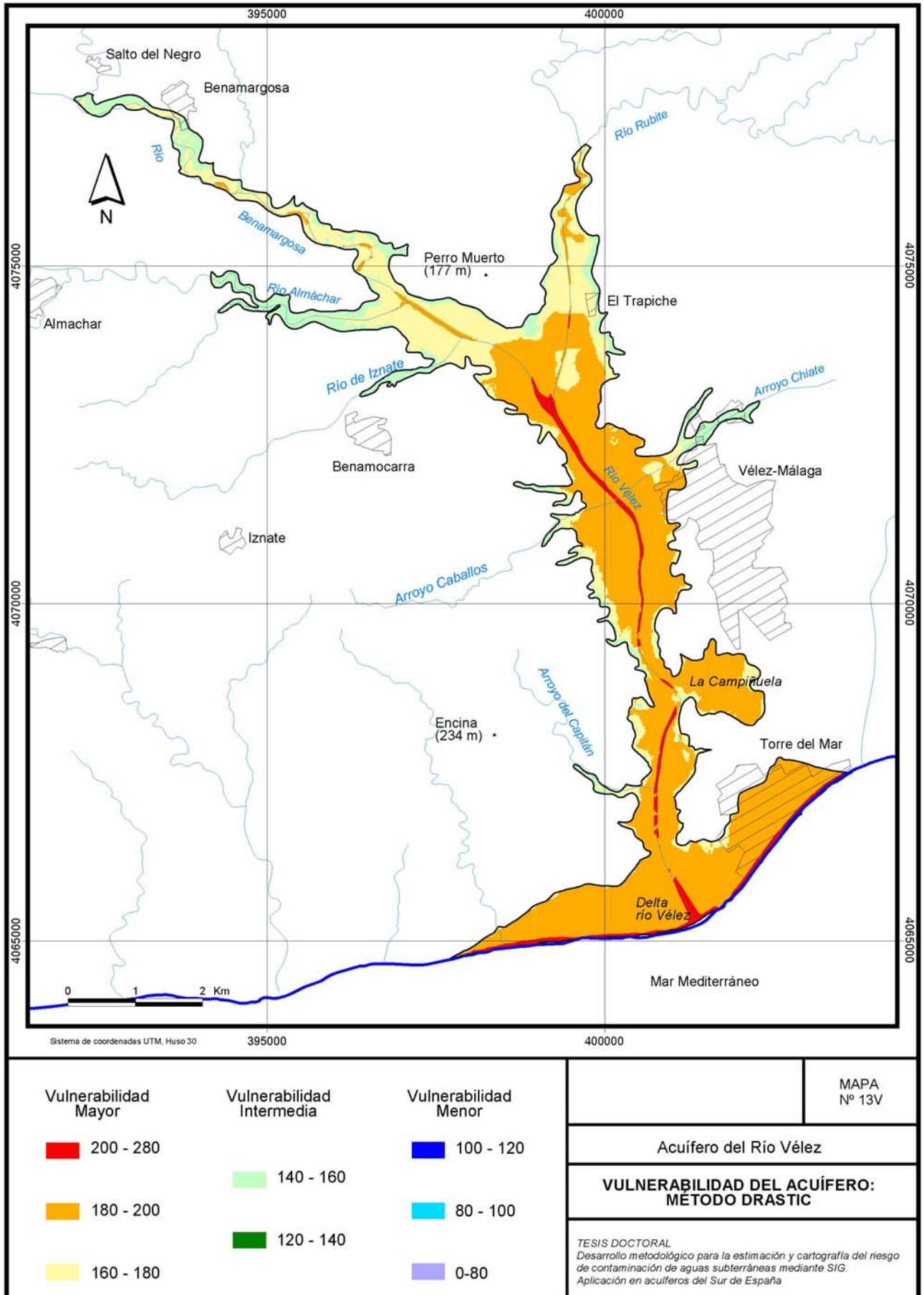
10.3.1. MÉTODO DRASTIC

El método DRASTIC (esquema 1 del anexo) ha sido aplicado en el acuífero aluvial del río Vélez según las puntuaciones del cuadro 10.10.

Variable, unidad de medida y valores							Puntuación (R)
D (m)	R (mm)	A	S	T (%)	I	C (m/día)	
≤ 1			Delgado o ausente (lecho)	0 - 2		> 80	10
1 - 5	> 254			2 - 6	Arenas de playa		9
		Arenas y gravas aluviales					8
5 - 10			Asociación de Fluvisoles, Regosoles y Antrosoles		Arenas y gravas aluviales con intercalaciones arcillo-limosas		7
							6
10 - 15				6 - 12	Areniscas, conglomerados, limos y arcillas		5
							4
15 - 25				12 - 18			3
25 - 30					Esquistos biotíticos		2
> 30				>18			1

Cuadro 10.10. Puntuación de los parámetros del método DRASTIC en el acuífero aluvial del río Vélez.

Con las puntuaciones del cuadro 10.10 se obtiene el mapa 13V (ver también mapa 2V del anexo cartográfico) de vulnerabilidad del acuífero aluvial del río Vélez. En general, se observa una susceptibilidad elevada en todo el acuífero. La escasa profundidad a la que se encuentra el agua subterránea y la elevada permeabilidad de los materiales aluviales, se traduce en una baja capacidad de atenuación de los contaminantes y, por tanto, en una clase de vulnerabilidad elevada.



Dentro de la elevada vulnerabilidad que caracteriza al acuífero según el método DRASTIC (casi el 90 % de su superficie tiene un índice de grado mayor, figura 10.17), se pueden diferenciar tres zonas. Las áreas de mayor vulnerabilidad (índice superior a 200) tienen lugar donde no hay suelos como es el caso del cauce del río Vélez (aguas abajo de la confluencia de los ríos Vélez y Benamargosa) y las playas del tramo costero. Otro sector de vulnerabilidad mayor, con un índice entre 180 y 200, se corresponde con la mayor parte del valle aguas abajo de la confluencia de los ríos Vélez y Benamargosa (mapa 13V). Este sector representa el 60 % de la superficie del acuífero (figura 10.17) y se caracteriza porque el espesor de zona no saturada no supera los 10 m. Una tercera zona de elevada vulnerabilidad (índice entre 160 y 180) se puede diferenciar del resto en función del parámetro D. En este sector, la profundidad del agua subterránea se encuentra entre 10 y 25 m de profundidad y representa casi una cuarta parte de la superficie del acuífero. Este tercer sector se localiza en los tramos más estrechos de los ríos Vélez y Benamargosa, así como en los bordes del acuífero, los cuales tienen una mayor pendiente y una mayor profundidad del nivel piezométrico. También hay dos zonas con un valor del índice entre 160 y 180. Una hacia el este del aeródromo de Vélez (situado al norte de la confluencia de los ríos Vélez y Benamargosa), que se corresponde con un área donde el nivel piezométrico está a mayor profundidad que en su entorno más inmediato, debido a la intensa explotación que se produce en pozos. La otra hacia el noroeste de la localidad de Vélez-Málaga donde un afloramiento de areniscas del Plioceno aumenta la protección del acuífero al reducir la conductividad hidráulica y con ello el tiempo de paso de los contaminantes hasta el agua subterránea.

En el resto del acuífero, la vulnerabilidad es de clase intermedia y está determinada, principalmente, por el parámetro D (profundidad del nivel piezométrico). Los sectores con un espesor de zona no saturada superior a 25 m tienen una vulnerabilidad intermedia como ocurre en los sectores más encajados de los ríos Benamargosa, Vélez y arroyos de Iznate, Almáchar, Chiate, Caballos y Capitán.

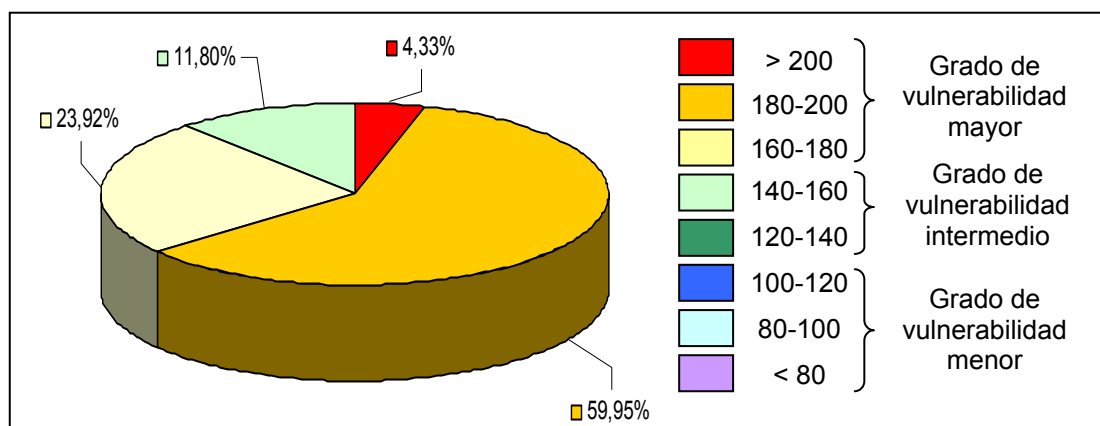


Figura 10.17. Porcentaje de superficie según intervalos de vulnerabilidad del método DRASTIC en el acuífero aluvial del río Vélez.

Los parámetros que mayor influencia ejercen en la distribución de las clases de vulnerabilidad son, principalmente, D y S. El parámetro S determina la vulnerabilidad de las zonas donde no hay suelo, mientras que, en el resto del acuífero, el parámetro D determina las

variaciones entre clases de vulnerabilidad. En cambio, el grado de vulnerabilidad de cada una de las categorías cartografiadas del índice DRASTIC depende en gran medida del tipo de litología, puesto que ha permitido evaluar hasta tres parámetros (A, I y C).

Los coeficientes de Pearson y de Determinación obtenidos mediante un análisis de regresión lineal, han permitido establecer el nivel de correlación existente entre los parámetros del método DRASTIC y su índice final (cuadro 10.11).

El parámetro D es el que presenta mayor correlación con el índice, dado que en el 72 % de los casos en que varía el espesor de zona no saturada varía la vulnerabilidad. El parámetro I también tiene una influencia importante en el índice de vulnerabilidad (0,53). En cambio, el parámetro S no muestra una elevada correlación con el índice, pero sí influye decisivamente en las zonas de mayor vulnerabilidad (índice mayor de 200). Se podría decir que el parámetro S influye de un modo cualitativo, porque determina la vulnerabilidad de una determinada zona sin incidir en un gran número de casos.

Parámetro	Coeficiente de Pearson ρ	Coeficiente de Determinación R^2
D	0,85	0,72
R	0	0
A	0	0
S	0,41	0,16
T	0,10	0,01
I	0,73	0,53
C	0	0

Cuadro 10.11. Coeficientes de Pearson y de Determinación entre las variables y el índice DRASTIC en el acuífero aluvial del río Vélez.

10.3.2. MÉTODO GOD

El método GOD (esquema 2 del anexo) se ha aplicado en el acuífero del río Vélez como se indica en el cuadro 10.12. Según el parámetro G, todo el acuífero tiene las mismas características, mientras que el parámetro O diferencia dos zonas: una formada por arenas y gravas aluviales y otra por gravas coluviales. Ésta última coincide con el lecho del río, lo que permite evaluar, en cierta medida, la presencia-ausencia de suelos en el acuífero, puesto que las únicas zonas del acuífero donde no hay suelo es el cauce del río.

Variable, unidad de medida y valores			Puntuación (R)
G	O	D (m)	
Libre		≤ 2	1
		2 – 5	0,9
	Gravas coluviales	5 – 10	0,8
	Arenas y gravas aluviales	10 – 20	0,7
		20 – 50	0,6
		50 – 100	0,5
		> 100	0,4

Cuadro 10.12. Puntuación de los parámetros del método GOD en el acuífero aluvial del río Vélez.

Respecto a las puntuaciones asignadas al parámetro D se han podido asignar todas las posibilidades que tiene en cuenta el método, al acuífero del río Vélez.

Los mapas 14V y 3V del anexo cartográfico muestran una vulnerabilidad predominante de clase Alta. En el resto del acuífero, la vulnerabilidad disminuye hasta un grado de clase Moderado. Las zonas de mayor vulnerabilidad (Muy Alta) se corresponden con el lecho del río donde la presencia de gravas aumenta la permeabilidad de la zona no saturada.

Las áreas con un grado de vulnerabilidad Alto se localizan en el delta y en la llanura aluvial desde la confluencia de los río Vélez y Benamargosa hasta el mar, a excepción de los bordes del valle, donde aumenta la profundidad del agua subterránea y disminuye la vulnerabilidad hasta un grado de clase Moderada. El sector del acuífero situado aguas arriba de la confluencia de los dos ríos Vélez y Benamargosa tiene una clase de vulnerabilidad Moderada, que aumenta hasta un grado de clase Alta en el lecho del río, donde la menor proporción de arenas aluviales y el mayor porcentaje de gravas aumenta la permeabilidad y con ello la vulnerabilidad. En el extremo norte del valle del río Vélez, la vulnerabilidad es de clase Alta debido a que en este punto la profundidad del agua subterránea es inferior a 20 m.

En función del porcentaje de superficie para las distintas clases de vulnerabilidad, se puede catalogar al acuífero del río Vélez como un acuífero de vulnerabilidad Alta, dado que casi el 70 % de su superficie es de esa clase (figura 10.18). Las zonas de mayor vulnerabilidad, clase Muy Alta, solo representan un 3 % de la superficie del acuífero, pero se localizan en el cauce del río Vélez, donde la actividad humana tiene un importante impacto por los vertidos y vados comentados en el epígrafe 10.2. El resto del acuífero tienen una vulnerabilidad de clase Moderada y no se han localizado zonas con un grado Bajo o Muy Bajo.

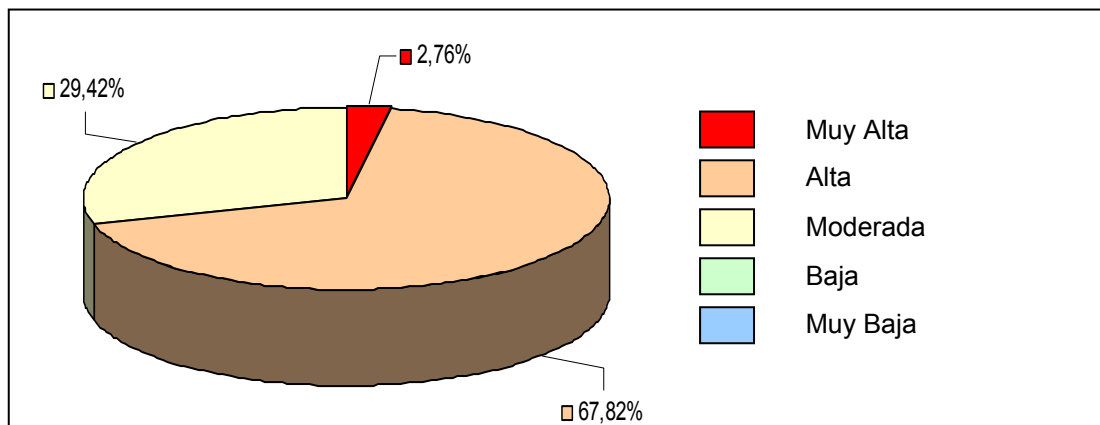
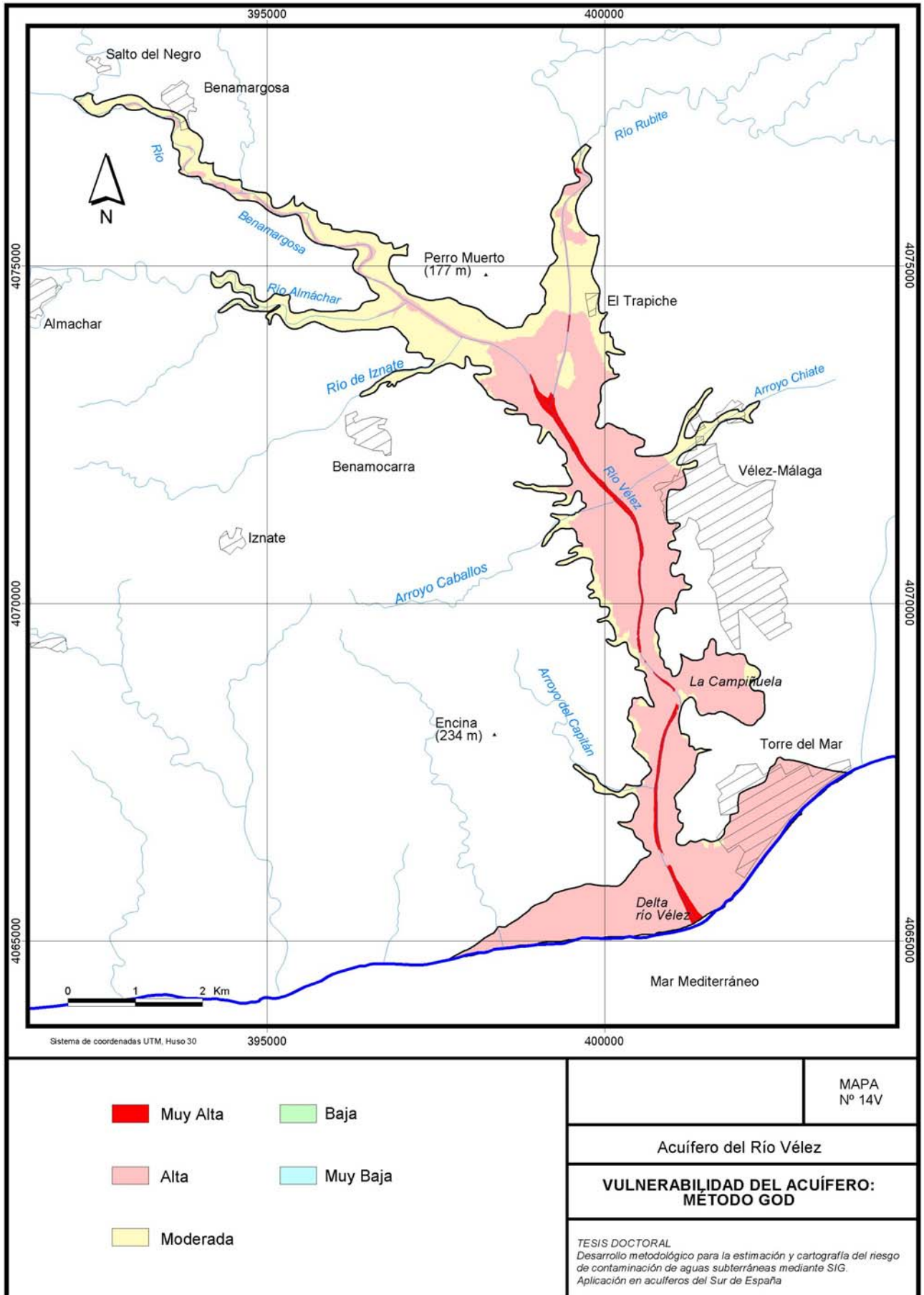


Figura 10.18. Porcentaje de superficie según clases de vulnerabilidad del método GOD en el acuífero aluvial del río Vélez.

En cuanto a la influencia que ejercen los distintos parámetros sobre el índice de vulnerabilidad GOD, según los coeficientes de correlación de Pearson y de Determinación (cuadro 10.13), hay una correlación muy elevada entre el parámetro D y el índice GOD con valores superiores a 0,9. Esto indica que las variaciones en la vulnerabilidad son consecuencia de la profundidad del agua subterránea, máxime si se tiene en cuenta que los otros parámetros o no tienen influencia (parámetro G) o está es prácticamente nula (parámetro O).



Parámetro	Coficiente de Pearson ρ	Coficiente de Determinación R^2
G	0	0
O	0,28	0,08
D	0,96	0,92

Cuadro 10.13: Coeficientes de Pearson y Determinación entre las variables y el índice GOD en el acuífero aluvial del río Vélez.

10.3.3. MÉTODO AVI

El método AVI no establece puntuación alguna de los parámetros y evalúa la vulnerabilidad directamente con los valores de cada uno mediante el algoritmo del esquema 3. Los valores de los parámetros d y k utilizados para evaluar la vulnerabilidad del acuífero de Vélez se muestran en el cuadro (10.14). En este cuadro se indican los valores máximo y mínimo de cada parámetro en el acuífero, a excepción del suelo, al que le ha sido asignado un valor constante allí donde está presente, debido a la falta de datos donde se muestren las variaciones de d y k para el suelo.

Capa de la zona no saturada		Parámetro	
		d (m)	k (m/día)
Roca	Arenas y gravas aluviales	0 - 90	50 - 300
Suelo	Asociación de Fluvisoles con Regosoles y antrosoles	> 1	10^{-1}

Cuadro 10.14. Valores de los parámetros del método AVI en el acuífero aluvial del río Vélez.

Los resultados obtenidos (mapa 15V y mapa 4V del anexo cartográfico) muestran una vulnerabilidad predominante de clase Alta en todo el acuífero, salvo en el cauce del río Vélez donde la ausencia de suelos eleva la vulnerabilidad hasta un grado de clase Muy Alto.

El 90 % de la superficie del acuífero tienen un grado de vulnerabilidad de clase Alta (figura 10.19), debido a la importancia que adquieren los suelos como capa de protección de las aguas subterráneas (cuadro 10.15).

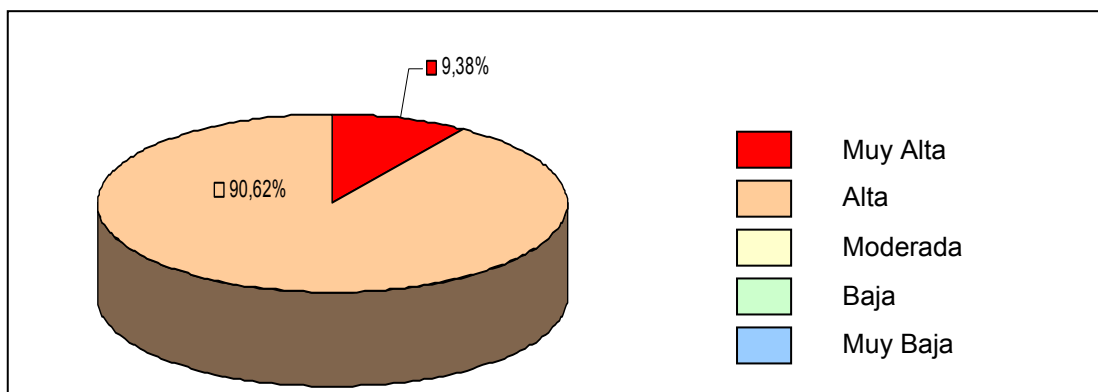
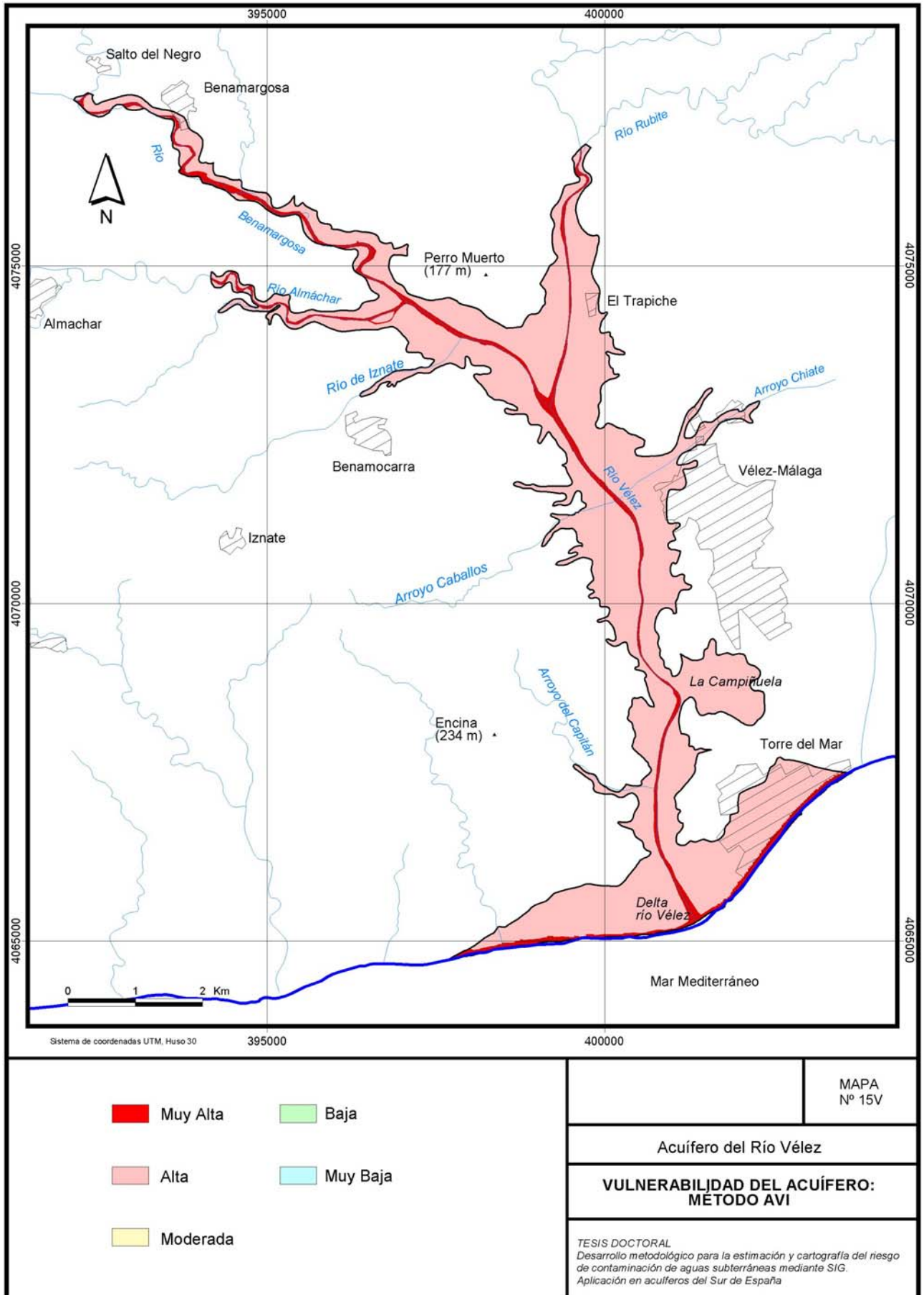


Figura 10.19. Porcentaje de superficie según clases de vulnerabilidad del método AVI en el acuífero aluvial del río Vélez.



Allí donde no hay suelo, la vulnerabilidad aumenta hasta un grado máximo, de manera que se puede interpretar que la capacidad de autodepuración del acuífero es mínima. El principal elemento que controla la vulnerabilidad del acuífero es el número de capas y, más concretamente, la presencia o ausencia de suelo (cuadro 10.15), mientras que el espesor y permeabilidad de los materiales aluviales apenas tiene significación.

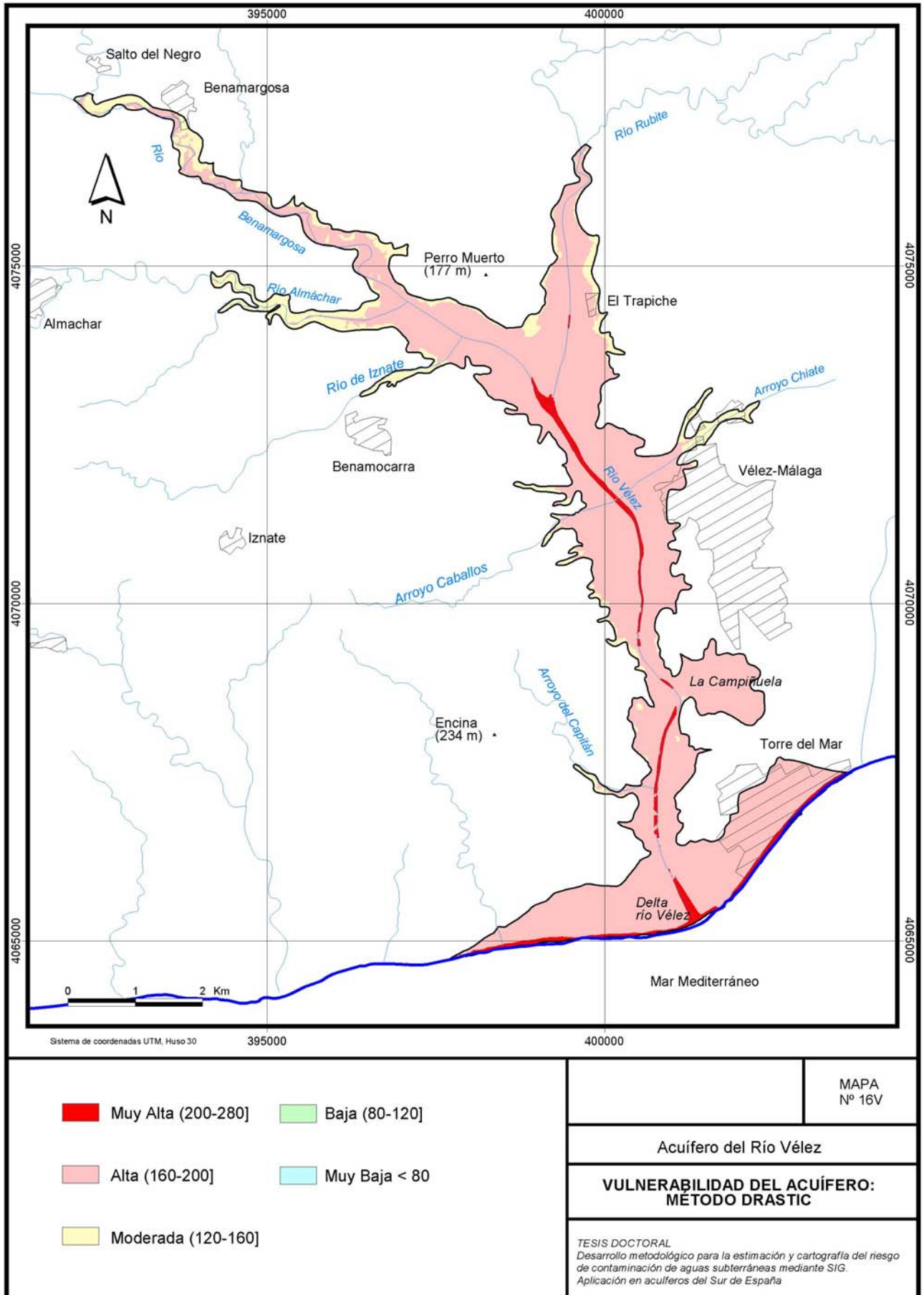
capa de la zona no saturada	Parámetro	Coeficiente de Pearson ρ	Coeficiente de Determinación R^2
Suelos	d	1	1
	k	1	1
Arenas y gravas aluviales	d	0,14	0,02
	k	-0,1	0,01
nº de capas en la zona no saturada		1	1

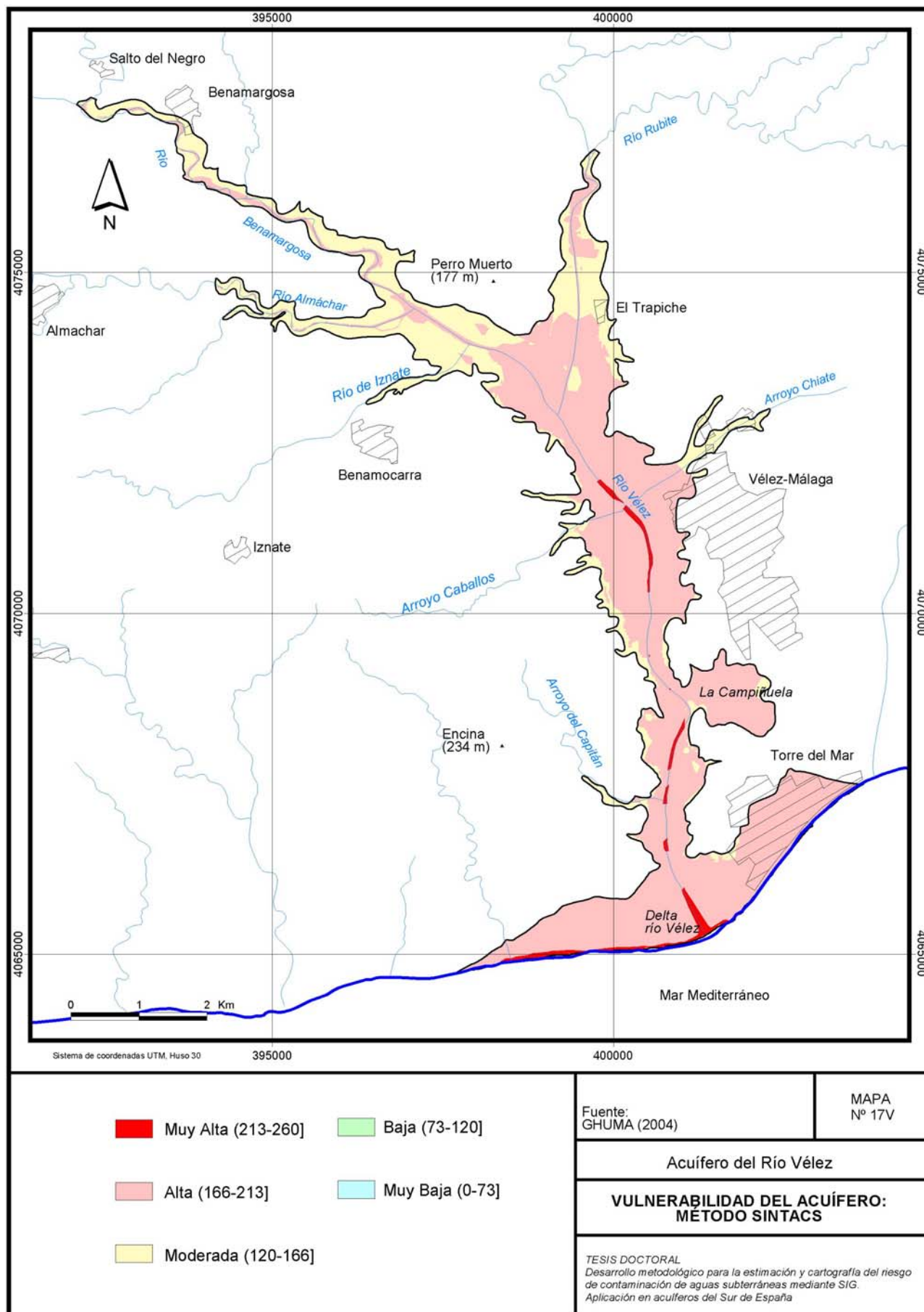
Cuadro 10.15: Coeficientes de Pearson y de Determinación entre las variables y el índice AVI en el acuífero aluvial del río Vélez.

10.3.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS EN EL ACUÍFERO DEL RÍO VÉLEZ

El análisis comparado de los distintos métodos y los mapas obtenidos se ha realizado utilizando cinco clases de vulnerabilidad, en la línea de las sugerencias apuntadas por Adams *et al.* (1994). Debido al mayor número de intervalos que utiliza el método DRASTIC respecto al resto de métodos que sí utilizan cinco clases, se ha modificado la leyenda y adaptado a cinco clases mediante una agrupación de los intervalos (cuadro 9.3.6), cuyo resultado se muestra en el mapa 16V. Por otra parte, se ha utilizado para el análisis comparado y elección de un método con el que posteriormente estimar el riesgo de contaminación, los resultados de aplicar el método SINTACS obtenidos por GHUMA (2004). A partir de SINTACS se ha obtenido el mapa de vulnerabilidad (17V).

Los mapas 16V y 17V son muy similares. En ambos casos se obtiene una vulnerabilidad predominante de clase Alta y la mayor vulnerabilidad (Muy Alta) tiene lugar en zonas donde no hay suelos como algunos sectores del cauce del río Vélez y las playas. La principal diferencia entre un mapa y otro de vulnerabilidad se produce aguas arriba de la confluencia de los ríos Vélez y Benamargosa. A partir de ese punto, la vulnerabilidad desciende hasta un grado de clase Moderado según el método SINTACS (mapa 17V), mientras que se mantiene con un grado de clase Alta según el método DRASTIC (mapa 16V).





Como un criterio más a la hora de realizar la comparación, se han utilizado los datos de porcentaje de superficie según las clases de vulnerabilidad obtenidas con cada método mediante una clasificación del índice en cinco intervalos (figura 10.20).

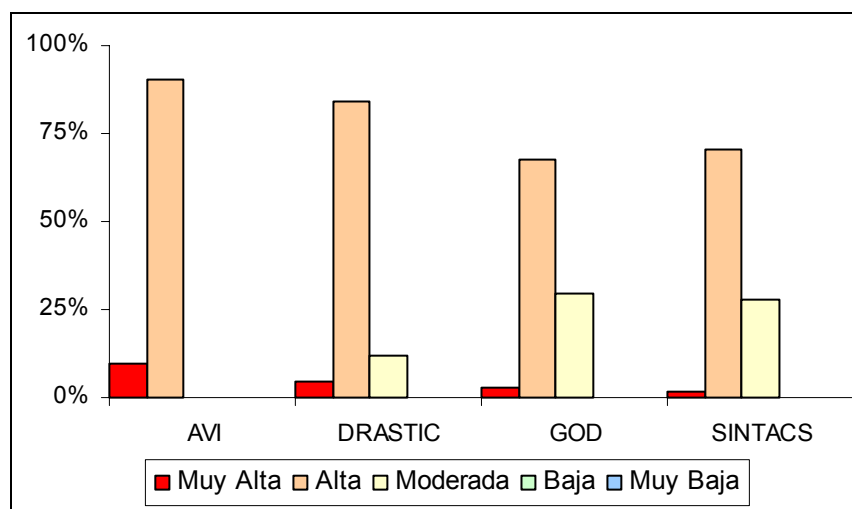


Figura 10.20. Porcentaje de superficie del acuífero aluvial del río Vélez según las clases de vulnerabilidad de los métodos AVI, DRASTIC, GOD y SINTACS.

La vulnerabilidad del acuífero del río Vélez es de clase Alta según los cuatro métodos empleados en el acuífero del río Vélez.

El método GOD es el que presenta una menor concentración de la superficie del acuífero en una única clase de vulnerabilidad, mientras que el método AVI es el que monopoliza en mayor proporción la vulnerabilidad del acuífero en una clase (figura 10.20).

El método AVI es el que ofrece una menor capacidad de discriminación, en cuanto que evalúa al acuífero con dos clases de vulnerabilidad a diferencia de los otros métodos que utilizan tres (figura 10.20).

Los métodos empleados no consideran sector alguno del acuífero con un grado de vulnerabilidad Bajo o Muy Bajo, debido principalmente al escaso espesor de zona no saturada. La presencia de suelo es un factor determinante en el mapa de vulnerabilidad, hecho que se hace más patente conforme disminuye el número de parámetros utilizados por los métodos para evaluar la vulnerabilidad.

Los métodos GOD y SINTACS diferencian como menos vulnerable que el resto, aquellas zonas del acuífero donde la profundidad del nivel piezométrico es superior a 20 m, concretamente, aguas arriba de la confluencia de los ríos Vélez y Benamargosa.

De los cuatro métodos analizados, GOD es el que necesita de un menor número de variables para evaluar la vulnerabilidad, a la vez que obtiene un resultado similar a los otros, sobre todo SINTACS, que utiliza más parámetros.

El método GOD se ha elegido para evaluar la vulnerabilidad del acuífero aluvial del río Vélez, debido a su capacidad para discriminar zonas con distinta clase de vulnerabilidad, por mostrar una gradación de la misma acorde con el conocimiento que se tiene del acuífero y por utilizar un sistema de evaluación de fácil y rápida ejecución.

10.4. EVALUACIÓN Y CARTOGRAFÍA DE VULNERABILIDAD DE LA POBLACIÓN Y SUS BIENES (MEDIO HUMANO) EN EL ACUÍFERO DEL RÍO VÉLEZ

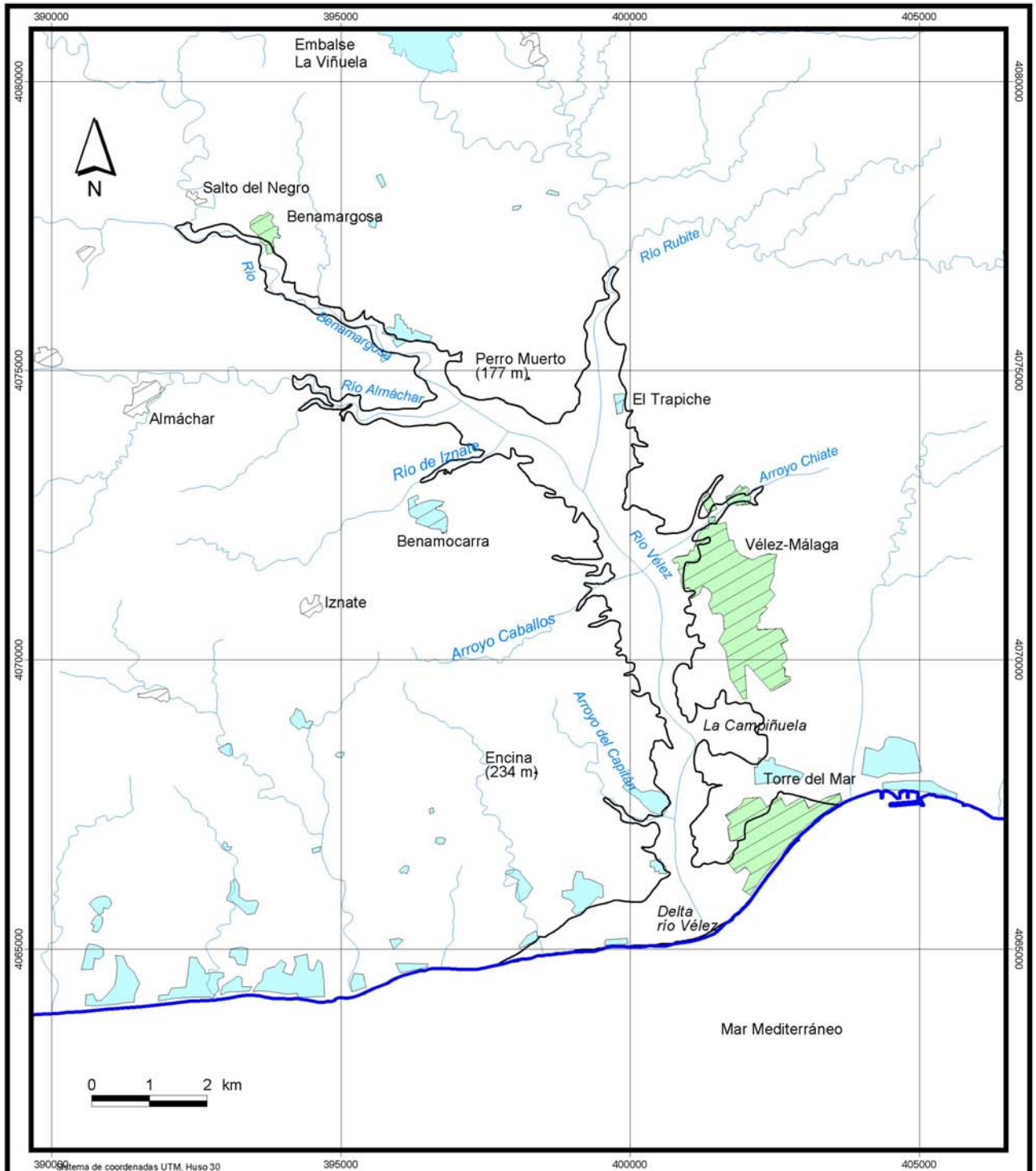
10.4.1. VULNERABILIDAD DE LA POBLACIÓN (V_P)

En la actualidad, el acuífero del río Vélez no se está utilizando para abastecimiento de la población de los municipios de Vélez-Málaga y Benamocarra. El agua de la presa de La Viñuela es la principal fuente de suministro a los municipios anteriores desde el año 1994, cuando entró en funcionamiento, por lo que el acuífero se transformó en una fuente alternativa de recursos, en épocas de sequía, después de haber sido la principal fuente de abastecimiento de estas localidades. El análisis de la vulnerabilidad se ha realizado para aquellas localidades que utilizan los recursos de la presa de La Viñuela y que disponen de sistemas de abastecimiento alternativos, en épocas de sequía, desde el acuífero. En cambio, los núcleos urbanos del municipio de Benamargosa siguen utilizando el agua del acuífero para abastecimiento de la población y el agua de la presa en momentos puntuales, cuando los recursos del acuífero no son suficientes.

El factor E_P (exposición de la población) tiene un valor bajo en el acuífero del río Vélez, en general, a excepción de las localidades de Vélez-Málaga y Torre del Mar donde el factor de exposición aumenta considerablemente (mapa 5V del anexo). El elevado volumen de población expuesta en esas localidades tiene su influencia posterior en la vulnerabilidad final. A pesar de no ser utilizado el acuífero para abastecimiento de la mayor parte de la población (a excepción de Benamargosa como se ha comentado anteriormente), el grado de vulnerabilidad no es mínimo en las localidades de Vélez-Málaga y Torre del Mar sino de clase Baja, a diferencia del resto de núcleos donde la vulnerabilidad es Muy Baja (mapa 18V y 5V del anexo). En el caso de Benamargosa, a pesar de utilizar el agua del acuífero y, de forma complementaria otros recursos, tiene un grado de vulnerabilidad Bajo, dado que el volumen de población expuesta no es elevado.

En general, la vulnerabilidad de la población dependiente de los recursos del acuífero es Baja, dado que se utiliza muy poca cantidad de agua subterránea. En función del uso que se realiza de los recursos del acuífero y del tipo de abastecimiento (factor R_{1P}) se pueden diferenciar dos situaciones (mapa 5V del anexo). Por un lado, localidades que utilizan los recursos del acuífero como una alternativa a los recursos hídricos del embalse de La Viñuela y, por otro lado, localidades que utilizan los recursos del acuífero y de forma complementaria otras fuentes de abastecimiento externas al mismo. Estas dos situaciones suponen un uso de las aguas subterráneas de menor importancia en comparación con otras localidades que dependieran exclusivamente de las aguas subterráneas.

Los valores del factor R_{2P} (resistencia según la edad de la población) en el acuífero del río Vélez son de clase Baja y Moderada (mapa 5V del anexo). Las localidades que tienen un volumen de población con edades más vulnerables a la contaminación de las aguas responden a dos patrones.



Sistema de coordenadas UTM, Huso 30



MAPA
Nº 18V

Acuífero del río Vélez

VULNERABILIDAD DE LA POBLACIÓN

TESIS DOCTORAL
Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España

Por un lado, los núcleos costeros del delta del río Vélez (Almayate Costa, Torre del Mar, Caleta de Vélez) que tienen un elevado atractivo para la población anciana de otras regiones de Europa para residir durante su jubilación y, por otro lado, los núcleos menos dinámicos del interior del valle (Benamocarra, Benamargosa, Triana) y de los Montes de Málaga (Almayate, Cajíz, Los Íberos) en donde el escaso desarrollo económico fuerza a la emigración de las personas jóvenes en busca de mejores ofertas de trabajo, con lo que aumenta la proporción de personas ancianas. En el resto de núcleos, los valores del factor R_{2P} son de clase Baja, y se corresponden, en unos casos, con los núcleos del litoral occidental del municipio de Vélez-Málaga (Benajárfate, Chilches) convertidos en núcleos segunda residencia para la población de las principales ciudades de la zona y, en otros casos, con Vélez-Málaga y los núcleos de alrededor donde el desarrollo económico funciona como una fuerza de atracción de las personas jóvenes que buscan trabajo.

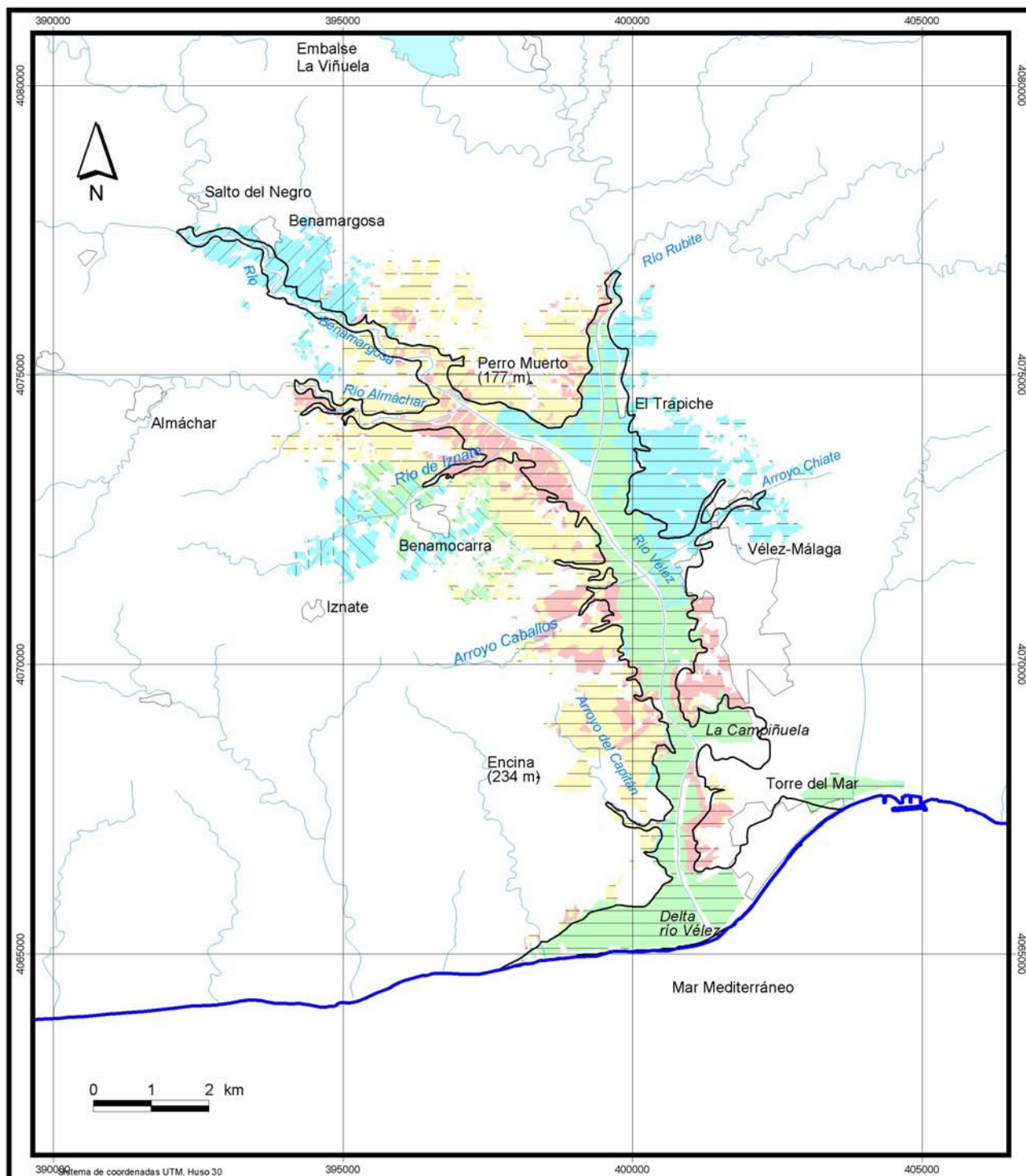
10.4.2. VULNERABILIDAD DE LA ACTIVIDAD PRODUCTIVA: AGRICULTURA (V_{AG})

La agricultura en el valle del río Vélez presenta una gran cantidad de variantes según la rentabilidad económica, social y tipo de abastecimiento, que repercuten en una elevada variedad de casos.

El mapa del factor E_{AG} (mapa 6V del anexo) muestra que la mayor exposición tiene lugar al oeste del acuífero, en relación con los cultivos de productos subtropicales (aguacate y mango) y los cultivos en invernaderos son los que tienen menor exposición. En cambio, los cultivos en invernaderos son los que presentan una mayor rentabilidad socioeconómica, concretamente de clase Muy Alta (mapa 6V del anexo) y los cultivos subtropicales una rentabilidad Muy Baja. Las zonas donde se cultivan productos hortícolas presentan una situación intermedia tanto en lo referente a exposición como a rentabilidad (mapa 6V del anexo).

Respecto al uso que se realiza de las aguas subterráneas y los sistemas de abastecimiento, en el mapa 6V (anexo cartográfico) se observa que las zonas de menor resistencia son las laderas de la margen derecha del valle del río Vélez donde se cultiva aguacate. Este cultivo utiliza el agua del acuífero como única fuente de abastecimiento, dado que los recursos que podrían proporcionar los esquistos sobre los que se asientan no son suficientes para mantener un cultivo que demanda mucha agua. En una situación contrapuesta se encuentran los cultivos de la vega y de la margen izquierda del río Vélez los cuales utilizan agua o bien del embalse de La Viñuela o bien del río Vélez.

El resultado final de la vulnerabilidad de la actividad agropecuaria (V_{AG}) (mapas 19V y 6V del anexo) muestran, en general, que las zonas de mayor vulnerabilidad son las relacionadas con los cultivos hortícolas de las laderas del valle del río Vélez. Estos cultivos presentan una vulnerabilidad de clase Alta como consecuencia de que tienen un sistema de abastecimiento muy dependiente del acuífero, en comparación con los productos hortícolas de la vega del valle donde la vulnerabilidad desciende hasta un grado de clase Baja. En la vega del río Vélez hay acequias que recogen el agua del río y del embalse, lo que elimina la dependencia exclusiva del agua subterránea.



390000 Sistema de coordenadas UTM, Huso 30 395000 400000 405000

Zona agrícola

 Benamargosa
 Benamocarra
 Iznate
 Vélez Málaga

Clase vulnerabilidad

 Muy Alta
 Alta
 Moderada
 Baja
 Muy Baja

MAPA
 Nº 19V

Acuífero del río Vélez

VULNERABILIDAD DE LA ACTIVIDAD PRODUCTIVA: AGRICULTURA

TESIS DOCTORAL
 Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG.
 Aplicación en acuíferos del Sur de España

Los cultivos de aguacate tienen un grado de vulnerabilidad Moderado, como consecuencia de la menor rentabilidad socioeconómica que generan en comparación con los hortícolas. Se cultivan en parcelas cuyos propietarios se ocupan de las tareas agrícolas de forma secundaria y como un complemento de la actividad principal. Este hecho unido a que se trata de un cultivo que no necesita mucha mano de obra en su producción termina por disminuir su importancia social. Aun así, la elevada exposición que hay en el valle del río Vélez de este tipo de cultivo implica que la vulnerabilidad sea Moderada.

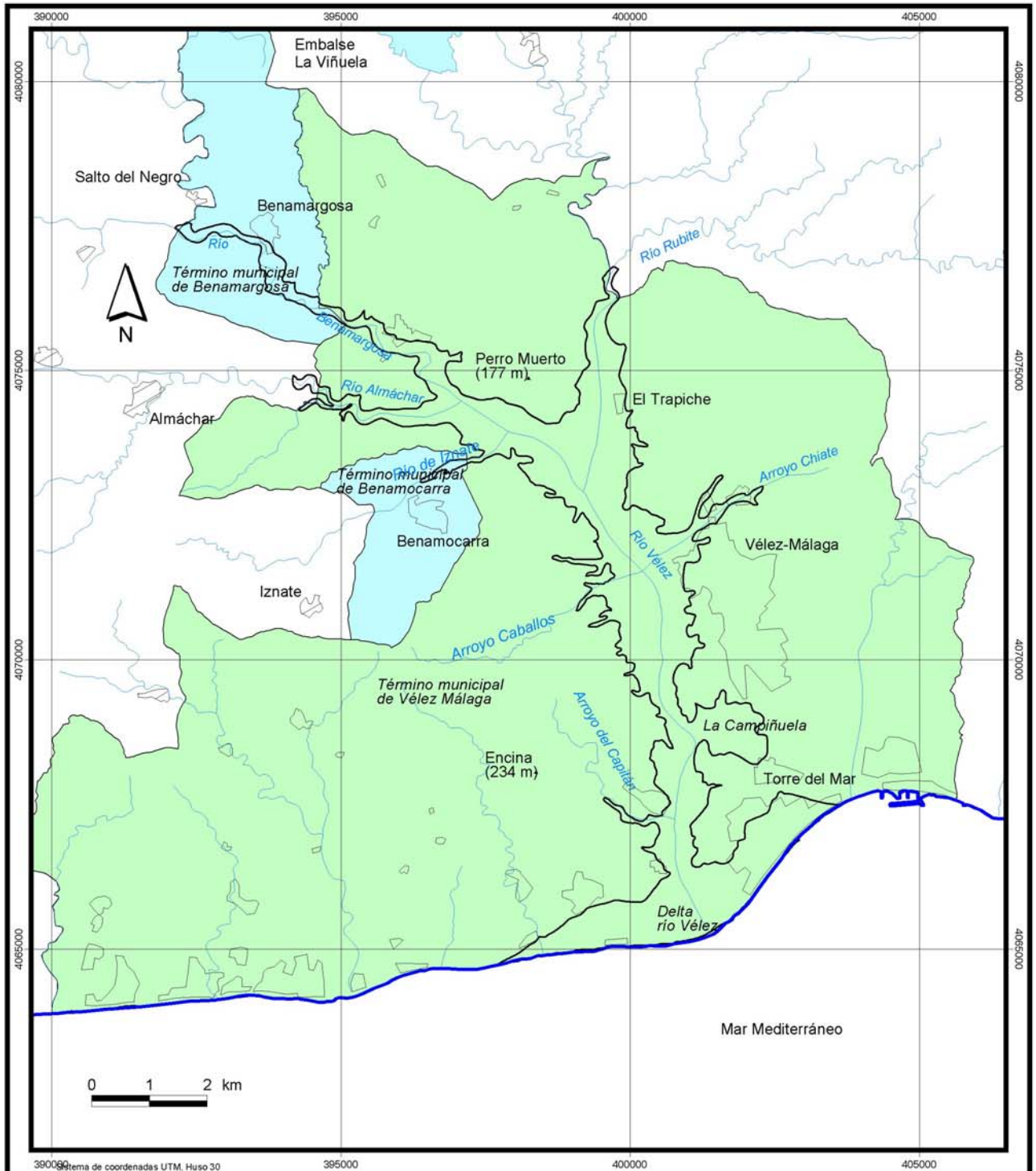
La vulnerabilidad de los cultivos en invernaderos es Muy Baja debido a que la exposición es muy baja y la rentabilidad socioeconómica no es lo suficientemente importante como para aumentar la vulnerabilidad más allá de la clase Muy Baja.

Frente a la tendencia genérica apuntada en los párrafos anteriores conviene precisar ciertas circunstancias particulares de cada zona de riego y cada cultivo. Así, por ejemplo, hay parcelas cultivadas con aguacates que tienen un grado de vulnerabilidad de clase Muy Bajo. Esto se debe a que la rentabilidad de esas parcelas no es equiparable a la de las zonas con una vulnerabilidad Moderada. Concretamente, la zona de riego correspondiente a Benamocarra o Benamargosa tiene un grado de vulnerabilidad inferior porque los cultivos en esta zona generan menos beneficios económicos que los de la zona de riego de Vélez-Málaga según los datos de DAP (1997). Por otra parte, hay zonas con cultivos de subtropicales en la margen izquierda del río Vélez que disponen de agua procedente del embalse de La Viñuela, por lo que la utilización del acuífero es mínima y la resistencia frente a la contaminación elevada, lo que termina generando un bajo grado de vulnerabilidad.

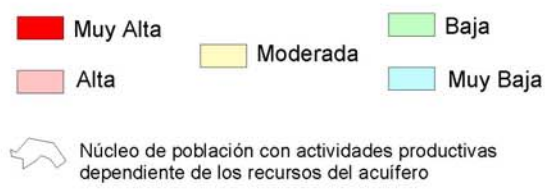
10.4.3. VULNERABILIDAD DE LA ACTIVIDAD PRODUCTIVA: HOSTELERÍA Y OTROS (V_{ST})

La vulnerabilidad de las actividades relacionadas con la hostelería, concretamente, hospedería y restauración, y una empresa de recreo o parque acuático son las que se han analizado en este epígrafe. La estimación sólo se ha realizado escala municipal, debido a la falta de datos a escala local o inframunicipal, lo que ha motivado que se utilice el municipio como entidad espacial para su representación y estimación, en detrimento de las localidades como se ha realizado en el apartado dedicado a la población.

En el municipio de Vélez-Málaga hay 347 establecimientos que podrían necesitar los recursos del acuífero del río Vélez, puesto que en la actualidad se abastecen de la presa de La Viñuela. El hecho de que no se utilice el agua del acuífero para abastecer a los establecimientos, cuya actividad productiva depende de la utilización del agua, reduce la vulnerabilidad de los elementos expuestos a un grado de clase Baja (mapa 20V y 7V del anexo). En el caso de Vélez-Málaga, la vulnerabilidad es Baja, aunque los valores obtenidos están muy próximos a la clase Muy Baja, debido sobre todo a que la utilización de agua del acuífero para abastecer a los establecimientos es nula y el acuífero solo toma el papel de alternativa para el abastecimiento. En los municipios de Benamocarra y Benamargosa hay muy pocos establecimientos dependientes de las aguas subterráneas y la vulnerabilidad es de clase Muy Baja.



Sistema de coordenadas UTM, Huso 30



Los datos de vulnerabilidad están referidos al municipio

MAPA
Nº 20V

Acuífero del río Vélez

VULNERABILIDAD DE LA ACTIVIDAD PRODUCTIVA: HOSTELERÍA Y OTROS

TESIS DOCTORAL
Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España

Benamargosa es el único municipio que, en la actualidad, utiliza los recursos del acuífero de forma complementaria a otros, pero el número de establecimientos hosteleros dependientes de los recursos del acuífero es muy bajo, debido a que es un municipio netamente agrícola (mapa 7V del anexo).

Hay un parque de atracciones acuático que realiza un uso complementario del acuífero en la medida que tiene pozos propios para el llenado de las piscinas y utiliza el agua del embalse de La Viñuela para el resto de servicios ofertados.

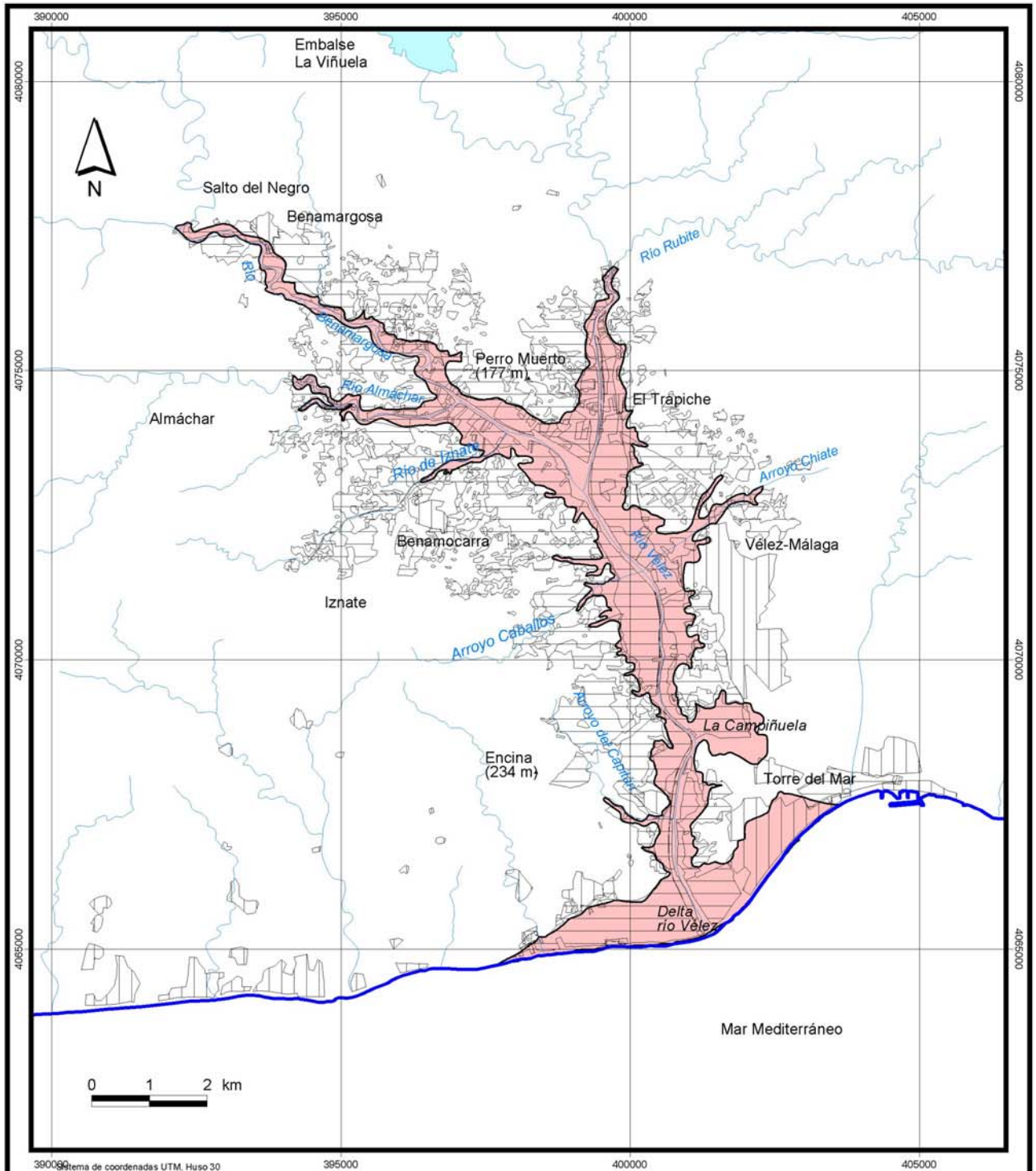
En cuanto a la rentabilidad socioeconómica que genera cada establecimiento analizado, en el caso de Vélez-Málaga es elevada y menor en Benamocarra y Benamargosa. El parque acuático de Vélez-Málaga es una de las empresas más rentables desde un punto de vista socioeconómico, sobre todo por el número de trabajadores que emplean, alrededor de 70 en la temporada alta.

10.4.4. VULNERABILIDAD DEL MEDIO HUMANO

El resultado final de vulnerabilidad de todos los elementos del medio humano dependientes de las aguas subterráneas del acuífero del río Vélez es de clase Alta (mapa 21V y 8V del anexo).

En la elevada vulnerabilidad de la población y sus bienes juega un papel fundamental la agricultura, que a pesar de tener un factor de ponderación inferior al de la población, tiene la suficiente importancia en el resultado final, como para reflejar las consecuencias que conllevaría en la economía de la comarca un evento de contaminación de las aguas subterráneas que limitara su uso.

En las condiciones actuales de utilización de los recursos hídricos del acuífero del río Vélez, el elevado grado de vulnerabilidad obtenido está directamente asociado a la agricultura, tal y como se deduce de la vulnerabilidad de cada uno de los elementos del medio humano. El hecho de que la zona de estudio se sitúe en un ámbito como el Mediterráneo, donde la irregularidad pluviométrica es un factor determinante del clima, supone una falta de garantía de poder abastecer a la población desde presa de La Viñuela. En el momento que los recursos de este embalse no fueran suficientes para abastecer a la población, se utilizarían los recursos del acuífero del río Vélez, dado que el nivel piezométrico del acuífero ha ascendido en los últimos años al no ser explotado masivamente para abastecimiento. Así, se deduce de las entrevistas realizadas a las comunidades de regantes del valle del río Vélez y a la empresa gestora del agua de Vélez-Málaga. Esto implicaría un aumento considerable del grado de vulnerabilidad, dado que la exposición, tanto del número de habitantes, como del número de establecimientos dependientes del agua es muy elevada. Concretamente la vulnerabilidad podría aumentar, bajo ese supuesto, hasta un grado de clase Muy Alta.



390000 Sistema de coordenadas UTM, Huso 30

Elementos del medio humano dependientes del acuífero

- ▨ Núcleos de población
- ▨ Espacios cultivados

Clases de vulnerabilidad

- Muy Alta
- Alta
- Moderada
- Baja
- Muy Baja

MAPA
Nº 21V

Acuífero del río Vélez

VULNERABILIDAD DEL MEDIO HUMANO

TESIS DOCTORAL
Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España

10.5. CARTOGRAFÍA DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL ACUÍFERO DEL RÍO VÉLEZ

Riesgo de contaminación de las aguas subterráneas hay en casi todo el acuífero del río Vélez, debido sobre todo a la actividad agrícola, la cual está muy extendida sobre el acuífero. El riesgo de contaminación es, mayoritariamente, de clase Moderada dado que el 99 % de las zonas de riesgo localizadas pertenecen a este grupo (figura 10.21).

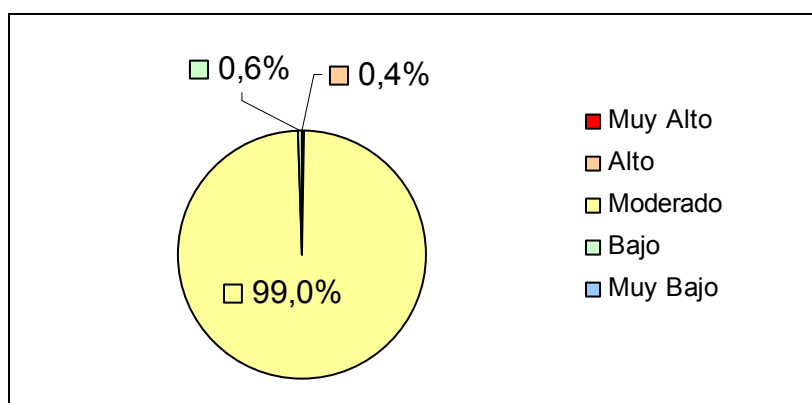


Figura 10.21. Superficie del acuífero del río Vélez según clase de riesgo.

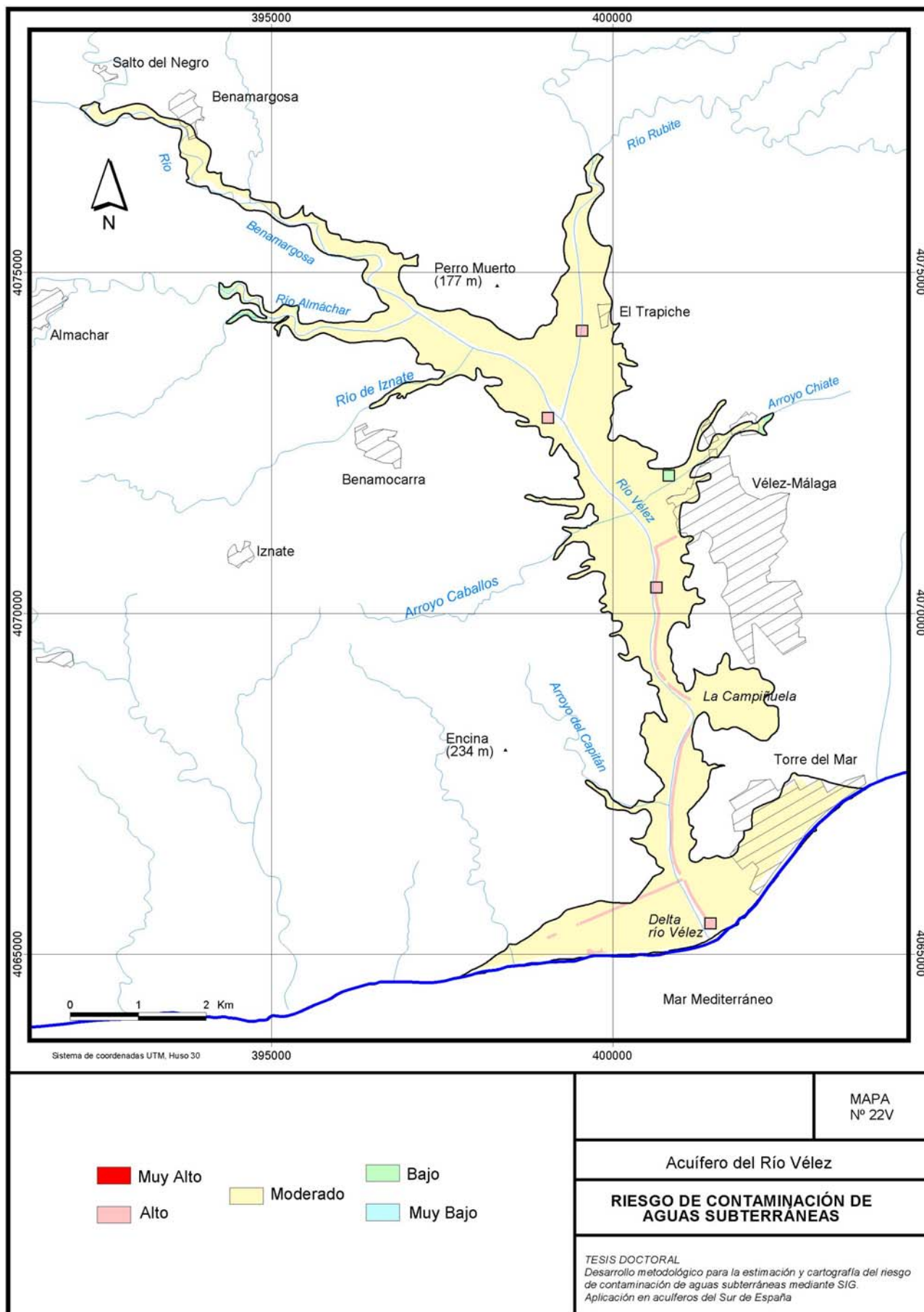
Todas las actividades humanas potencialmente contaminantes que se desarrollan sobre el acuífero tienen la misma importancia o clase de riesgo (mapa 22V). Sólo cuatro de estas actividades tienen un grado de riesgo distinto: un núcleo urbano en el delta del río Vélez, el colector general de aguas residuales, tres vertidos de aguas residuales, los tres con un grado de riesgo de clase Alto, y el cementerio situado al Norte de Vélez-Málaga cuyo riesgo es de clase Muy Bajo.

El núcleo urbano localizado en el delta del río Vélez supone un mayor riesgo para el agua subterránea, debido a la falta de un sistema integral de saneamiento en un medio de Muy Alta vulnerabilidad como es el acuífero detrítico.

El colector de aguas residuales y algunos vertidos de aguas residuales en el cauce del río Vélez son focos de contaminación potencial por la elevada cantidad de sustancias contaminantes que son introducidas en el acuífero (vertidos sobre el cauce) o que pueden ser vertidas por un accidente (colector general de aguas residuales).

El cementerio tiene un grado de riesgo de clase Bajo, porque el tipo de enterramiento predominante (nicho) minimiza la probabilidad de vertido, a lo que hay que añadirle el hecho de localizarse en un punto de baja vulnerabilidad intrínseca del acuífero.

La importancia que adquiere el agua subterránea del acuífero para los distintos elementos del medio humano, como la agricultura que tiene una dependencia máxima del mismo, implica que actividades potencialmente poco peligrosas tengan un grado de riesgo superior a la peligrosidad de las mismas.



En el caso del acuífero del río Vélez, la agricultura responde a este ejemplo, es decir, una actividad poco peligrosa según los criterios de De Keteleare *et al.* (2004), en comparación con otras muchas actividades humanas. Este dato resulta muy llamativo, porque la actividad agrícola sobre el acuífero se caracteriza por el empleo de una gran cantidad de fertilizantes nitrogenados, como consecuencia del tipo riego utilizado de forma mayoritaria en la vega del río Vélez: a manta. Esto ha propiciado que algunos sectores del acuífero queden contaminados por nitratos como se ha puesto de manifiesto en algunos pozos de abastecimiento urbano en el delta del río Vélez, según los datos aportados por la empresa de gestión del agua de Vélez-Málaga. García Aróstegui (1998) también apunta la excesiva aplicación de fertilizantes nitrogenados como una de las principales causas de la contaminación de origen agrícola en el río Vélez.

El riesgo de contaminación sobre el acuífero del río Vélez no es muy elevado, a pesar de que se han detectado problemas de contaminación, por el escaso uso que se realiza del mismo para el abastecimiento de la población y sus bienes. En la actualidad, el agua del acuífero solo se utiliza en la agricultura de regadío, mientras que para la población es solo una alternativa de suministro en caso de que se agoten los recursos del embalse de La Viñuela. En la agricultura, el hecho de que el agua no tenga una calidad muy buena, no impide para su empleo, como lo demuestra el hecho de que se utilicen aguas residuales para regar en épocas de sequía, según datos aportados por la policía de aguas de la Confederación Hidrográfica del Sur de España y García Aróstegui (1998).

Las únicas zonas agrícolas con un grado de riesgo de clase Bajo se han obtenido aguas arriba del arroyo Chiate, al norte de la localidad de Vélez-Málaga, y otro pequeño sector en el extremo más occidental del valle del río Almáchar. En ambos casos, el menor riesgo deriva de la mayor capacidad de autodepuración del acuífero en esas zonas, como consecuencia del mayor espesor de zona no saturada.

Por otra parte, también llama la atención el hecho de que los vertidos de aguas residuales que se están produciendo sobre el tramo más septentrional del acuífero, a la altura de Benamargosa y Triana, no generen un riesgo de contaminación de las aguas subterráneas similar al de otros puntos de vertido como el de Trapiche. Esto se debe a que esos vertidos se producen en zonas del acuífero donde la capacidad de autodepuración del mismo es mayor como consecuencia del mayor espesor de zona no saturada, lo que reduce el grado de riesgo hasta uno de clase Moderada similar al resto del acuífero.

Con anterioridad a la entrada en funcionamiento de la presa de La Viñuela, se registraron diversos casos de enfermedades infecciosas por la mala calidad de las aguas en distintas localidades del acuífero, según los datos aportados por el distrito sanitario de la Axarquía. Hay que tener en cuenta que el riesgo de contaminación de las aguas puede aumentar considerablemente en el momento que no se pueda disponer de agua de la presa de La Viñuela, por lo que la probabilidad de que vuelvan a producirse afecciones sobre la salud y brotes epidémicos a consecuencia de la mala calidad de las aguas subterráneas sería elevada.

11. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS TRES ACUÍFEROS. COMPARACIÓN Y VALORACIÓN

La comparación y valoración de los resultados obtenidos sobre el riesgo de contaminación de los acuíferos analizados se ha realizado para el resultado final del riesgo y para cada uno de los componentes, dada la importancia de los mismos en la estimación y gestión del riesgo.

11.1. FOCOS POTENCIALMENTE CONTAMINANTES Y SU PELIGROSIDAD

Los peligros de contaminación detectados sobre los acuíferos analizados en este trabajo, presentan una fuerte diferenciación desde un punto de vista cuantitativo aunque no desde un punto de vista cualitativo. La cantidad de peligros difiere en gran medida entre un acuífero y otro, aunque no así el tipo de peligros, puesto que están asociados, principalmente, a elementos del medio urbano. El número de peligros es muy variable entre un acuífero y otro. Sierra de Líbar es el acuífero en donde se han localizado menos peligros y el acuífero del río Vélez donde más, mientras que la sierra de Mijas ocupa una posición intermedia.

El acuífero de Líbar es un área de montaña con malas comunicaciones y escaso desarrollo económico, aspectos que, por un lado, han frenado un crecimiento desmesurado de sus localidades y con ello una proliferación excesiva de actividades potencialmente contaminantes y, por otro lado, han favorecido la conservación de la calidad ambiental de este espacio natural.

En el extremo contrario se sitúa el acuífero de Vélez, que ocupa una posición estratégica en las comunicaciones de la Axarquía y donde la actividad agrícola ha sido, tradicionalmente, el motor de la economía de la comarca. Vélez-Málaga ha sido y es un lugar de atracción socioeconómico y no de aislamiento como el caso de Líbar, lo que ha repercutido en un uso intensivo del territorio y en la degradación ambiental de su entorno, a pesar de la existencia de figuras de protección como establece el plan especial de protección del medio físico de la provincia de Málaga. Durante muchos años, Vélez-Málaga ha absorbido la población de las localidades próximas, circunstancia que ha favorecido el crecimiento de la ciudad sobre el acuífero, a su vez, que la proliferación de actividades potencialmente emisoras de sustancias contaminantes al medio natural.

El acuífero de la sierra de Mijas está situado en un espacio donde se está llevando a cabo un intenso proceso de ocupación del suelo para la creación de conjuntos residenciales, principalmente, en los bordes del acuífero. El carácter montañoso del mismo ha limitado, hasta la actualidad, el uso urbano de gran parte de la sierra donde se sitúa el acuífero, independientemente de que existan figuras de protección de la misma, como recoge el plan especial de protección del medio físico de la provincia de Málaga. Al igual que ocurre en la sierra de Líbar, la compleja orografía del terreno donde se asienta el acuífero ha permitido preservar esta zona del proceso urbanizador, aunque no de otras actividades humanas muy agresivas contra el medio ambiente como la extracción de áridos en canteras. En la actualidad, esta característica del relieve de la sierra de Mijas no impide que se estén urbanizando espacios que tradicionalmente no habían tenido interés urbanístico, como ocurre en Alhaurín de la Torre, Torremolinos y Benalmádena.

Desde un punto de vista cualitativo, en los tres acuíferos se ha observado un predominio de actividades ligadas al grupo infraestructuras urbanas (cuadros 8.11, 9.19, 10.9). En más de un 60 % de los casos, los peligros se relacionan con este grupo, lo que da idea de la importancia de los procesos urbanísticos en esta franja del arco mediterráneo. La presencia de áreas urbanizadas, carreteras, vertederos de residuos sólidos urbanos, depósitos incontrolados de escombros, chatarra y todo tipo de basuras, son elementos característicos de esta zona. El uso residencial y turístico de los espacios urbanos puede plantearse como un hecho contradictorio, en algunos casos, en la medida que la calidad ambiental de estos espacios debería ser un elemento primordial de la calidad de vida de sus habitantes.

De los peligros detectados en los tres acuíferos, solamente, el de Vélez implica una variación de la tendencia general, en cuanto a la tipología. La existencia de explotaciones agrícolas en su superficie, motivada por la fertilidad de sus tierras, deriva en problemas de contaminación por la utilización de fertilizantes y pesticidas sobre el acuífero, en mayor medida que por los peligros asociados a la ciudad. En el acuífero del río Vélez, a los problemas de contaminación potencial de la actividad urbana se suman los procedentes de la actividad agrícola.

Respecto a la peligrosidad de las distintas actividades potencialmente contaminantes, en general, se observa una baja capacidad de contaminación de los peligros detectados en los tres acuíferos. En ninguno de los casos se han analizado focos cuya peligrosidad potencial sea de clase Alta o Muy Alta, a lo sumo Moderada y no muy extendido (mapas 13L, 12M y 12V). En cambio, sí hay en los tres acuíferos actividades con una peligrosidad de clase Baja o Muy Baja.

La reducida peligrosidad de focos potencialmente contaminantes detectados en los tres acuíferos analizados, tienen una causa común. El predominio de actividades ligadas a espacios urbanos y agrícolas equivale, en general, a un escaso peligro de contaminación de las aguas subterráneas, en la medida que las sustancias procedentes de estas actividades tienen menor toxicidad y carga contaminante, que las derivadas de la actividad industrial. Los acuíferos analizados se localizan en ámbitos turísticos, agrícolas o forestales y, en ningún caso, la industria ocupa un papel destacado. En el acuífero de la sierra de Mijas, la actividad turística que desde hace décadas impera en el entorno del mismo, hace incompatible la actividad industrial, mucho más contaminante, con la turística y residencial que predominan hoy en día. En el caso del acuífero del río Vélez, la actividad turística y residencial está transformando poco a poco el espacio que, tradicionalmente, ha ocupado la agricultura, actividad productiva que se encuentra en retroceso. En el caso del acuífero de Líbar, la baja peligrosidad de los focos detectados es consecuencia del tipo de contaminante susceptible de ser vertido, en la mayor parte de los casos microbiológicos, cuyo tiempo de residencia en el medio es muy inferior a otro tipo de sustancias más persistentes y contaminantes, como por ejemplo, compuestos inorgánicos o hidrocarburos.

La baja peligrosidad asociada, en general, a los focos potencialmente contaminantes que han sido detectados en los tres acuíferos, es consecuencia de la baja persistencia de los contaminantes en el medio y de la capacidad de recuperación de la calidad de las aguas, mayor que por un potencial vertido con otro tipo de sustancias, como metales pesados o productos químicos tóxicos. La baja peligrosidad de las actividades humanas no significa que haya una baja probabilidad de que se contaminen las aguas subterráneas puesto que, en el caso del acuífero del río Vélez, es constatable el problema de contaminación por nitratos

derivados de la actividad agrícola o, en el caso del acuífero de la sierra Blanca, próximo al de la sierra de Mijas, con características hidrogeológicas y ambientales muy similares, se ha detectado contaminación por el lixiviado procedente de un vertedero de residuos sólidos urbanos (Vadillo, 2003).

Por otra parte, hay que tener en cuenta la manifestación de distintos eventos de contaminación que han afectado a parte de la población dependiente de los tres acuíferos, sobre todo en el caso de la sierra de Líbar, aunque no hayan llegado a provocar una catástrofe. Esto, en cierta medida, sí está en consonancia con la peligrosidad de las actividades potencialmente contaminantes. Una de las razones por la que las actividades potencialmente contaminantes con una peligrosidad baja han provocado eventos de contaminación es la escasa importancia del factor Q_n (intensidad de la contaminación) del método HI, utilizado para evaluar la peligrosidad.

Q_n es un factor que tiene muy poco peso en la cartografía final de peligrosidad. Este factor recoge variaciones en la peligrosidad de actividades humanas ligadas a una misma categoría, por ejemplo diferenciar la peligrosidad de una gasolinera respecto de otra o un vertedero de otro. El índice HI recoge cualquier variación del factor Q_n sobre el factor H (nocividad) pero, en la práctica, Q_n no determina variaciones importantes en el resultado final por dos razones. En primer lugar, el sistema de clases que utiliza del índice HI intenta recoger en mayor medida variaciones en el factor de nocividad que en el propio índice de peligrosidad. Las puntuaciones asignadas al factor nocividad están pensadas para que muestren una peligrosidad final acorde con las clases establecidas en el cuadro 11.1. En segundo lugar, el factor nocividad es la base de la peligrosidad de las fuentes potencialmente contaminantes y las variaciones que se derivan del factor intensidad son muy laxas. Del cuadro 11.1, que recoge el producto entre el máximo y mínimo valor de intensidad por la nocividad, se deduce que la influencia de la intensidad, en el índice HI, es muy baja. De los 96 tipos de peligros catalogados por De Keteleare *et al.* (2004) solo en 32 se produce variación de la peligrosidad al alza (suponiendo una probabilidad igual a uno, equivalente a mayor riesgo), es decir, en un 30 % de los casos. En cambio, en un 43% de los casos, como máximo, se produce una modificación de la peligrosidad a la baja, es decir, el cambio a una clase de peligrosidad menor.

En este análisis del cuadro 11.1, se puede precisar más si se tiene en cuenta el tipo de actividad (urbana, industrial o agropecuaria) sobre la cual son más habituales las variaciones de la peligrosidad, en función de la intensidad. Teniendo en cuenta que el número de actividades industriales y urbanas es muy similar (41 y 42, respectivamente), el valor máximo de intensidad (Q_n) ocasiona más cambios en la peligrosidad final de las actividades industriales que en la de las urbanas, es decir, se puede interpretar que la actividad industrial es más peligrosa cuando genera una gran cantidad de contaminantes, pero no ocurre lo mismo con la urbana. Por el contrario, un valor bajo de intensidad denota cambios en la peligrosidad, principalmente en las actividades urbanas, es decir, las actividades industriales mantienen su peligrosidad, aunque la actividad sea pequeña, mientras que las actividades urbanas pierden gran parte de su carga contaminante cuando generan poca cantidad de contaminantes.

Estos planteamientos indican que el método HI (De Keteleare *et al.*, 2004) establece la peligrosidad de la actividad humana, principalmente, en función de la nocividad y, en menor medida, en función de la importancia o de la magnitud de la actividad.

Clave	H	H·1'2	H·0'8	Clave	H	H·1'2	H·0'8	Clave	H	H·1'2	H·0'8
Infraestructuras urbanas				Actividades Industriales				Actividades Agropecuarias			
1.1.1.	35	42	28	2.1.1.	60	72	48	3.1.1.	30	36	24
1.1.2.	70	84	56	2.1.2.	70	84	56	3.1.2.	30	36	24
1.1.3.	45	54	36	2.1.3.	70	84	56	3.1.3.	30	36	24
1.1.4.	45	54	36	2.1.4.	70	84	56	3.1.4.	45	54	36
1.1.5.	55	66	44	2.1.5.	80	96	64	3.1.5.	45	54	36
1.1.6.	35	42	28	2.1.6.	85	102	68	3.1.6.	20	24	16
1.1.7.	60	72	48	2.1.7.	70	84	56	3.2.1.	25	30	20
1.1.8.	25	30	20	2.1.8.	70	84	56	3.2.2.	20	24	16
1.1.9.	45	54	36	2.1.9.	70	84	56	3.2.3.	40	48	32
1.1.10.	85	102	68	2.1.10.	65	78	52	3.2.4.	30	36	24
1.2.1.	40	48	32	2.1.11.	65	78	52	3.2.5.	15	18	12
1.2.2.	40	48	32	2.2.1.	10	12	8	3.2.6.	20	24	16
1.2.3.	50	60	40	2.2.2.	30	36	24	3.2.7.	60	72	48
1.2.4.	35	42	28	2.2.3.	25	30	20				
1.2.5.	35	42	28	2.3.1.	40	48	32				
1.3.1.	50	60	40	2.3.2.	70	84	56				
1.3.2.	55	66	44	2.3.3.	55	66	44				
1.3.3.	50	60	40	2.3.4.	55	66	44				
1.3.4.	50	60	40	2.4.1.	40	48	32				
1.3.5.	60	72	48	2.4.2.	40	48	32				
1.3.6.	60	72	48	2.4.3.	50	60	40				
1.3.7.	65	78	52	2.4.4.	55	66	44				
1.4.1.	40	48	32	2.4.5.	85	102	68				
1.4.2.	40	48	32	2.4.6.	65	78	52				
1.4.3.	35	42	28	2.4.7.	40	48	32				
1.4.4.	35	42	28	2.4.8.	40	48	32				
1.4.5.	30	36	24	2.4.9.	70	84	56				
1.4.6.	30	36	24	2.4.10.	45	54	36				
1.4.7.	35	42	28	2.5.1.	60	72	48				
1.4.8.	40	48	32	2.5.2.	50	60	40				
1.4.9.	35	42	28	2.5.3.	65	78	52				
1.4.10.	60	72	48	2.6.1.	60	72	48				
1.5.1.	30	36	24	2.6.2.	70	84	56				
1.5.2.	30	36	24	2.6.3.	70	84	56				
1.5.3.	25	30	20	2.6.4.	45	54	36				
1.5.4.	35	42	28	2.6.5.	90	108	72				
1.5.5.	25	30	20	2.6.6.	100	120	80				
1.6.1.	25	30	20	2.7.1.	65	78	52				
1.6.2.	35	42	28	2.7.2.	65	78	52				
1.6.3.	35	42	28	2.7.3.	40	48	32				
1.6.4.	30	36	24	2.7.4.	85	102	68				
1.6.5.	35	42	28								

Cuadro 11.1. Variación de la nocividad en función del valor máximo y mínimo de intensidad. Leyenda: en color se han marcado los valores que variarían de clase de peligrosidad.

11.2. VULNERABILIDAD DE LOS ACUÍFEROS: CAPACIDAD DE PROTECCIÓN Y AUTODEPURACIÓN

El análisis de los resultados de la vulnerabilidad de los acuíferos estudiados se ha centrado en dos aspectos. Por un lado, la distribución espacial obtenida en los distintos mapas de vulnerabilidad según el método utilizado y, por otro lado, la importancia que adquieren las distintas variables utilizadas en el resultado final del índice de vulnerabilidad intrínseca.

Respecto a los mapas de vulnerabilidad intrínseca obtenidos por los distintos métodos, no se ha observado un patrón común en la distribución de las clases de vulnerabilidad de los tres acuíferos, debido, en gran parte, a las importantes diferencias hidrogeológicas entre uno y otro. En el acuífero del río Vélez, la vulnerabilidad intrínseca es siempre mayor en las zonas centrales del valle y en la desembocadura del río; en el caso de la sierra de Mijas, la vulnerabilidad aumenta de forma centrífuga desde las partes más elevadas hacia los bordes; en el acuífero de la sierra de Líbar, las zonas de mayor vulnerabilidad son aquellas donde predominan las morfologías kársticas que anulan la función protectora de la zona no saturada.

En cuanto a la influencia de cada variable en el índice de vulnerabilidad intrínseca, se ha realizado una correlación estadística lineal entre las variables y el índice en cada método para los tres acuíferos (figura 11.1). A partir de este análisis estadístico se deduce que los parámetros de mayor incidencia en la vulnerabilidad son los relacionados, en general, con la capacidad de protección de la zona no saturada. El tipo de litología y el espesor de la zona no saturada son variables que influyen mucho en la vulnerabilidad intrínseca, aunque esta valoración tiene ciertos matices cuando se determina en qué acuífero y según qué método hay elevada correlación. Así, en el acuífero kárstico de la sierra de Líbar, la correlación obtenida entre las variables comentadas anteriormente y la vulnerabilidad intrínseca no tiene una gran importancia y es menor que en los otros dos acuíferos analizados con los métodos DRASTIC, GOD y AVI. Esto se debe a las características de este tipo de acuífero, donde la circulación del agua subterránea se concentra en los conductos kársticos, frente a otros como los del río Vélez y la sierra de Mijas, poroso y fisurado, respectivamente, donde dicha circulación del agua subterránea no es concentrada, sino difusa. El tiempo de tránsito del agua subterránea en acuíferos karstificados como el de la sierra de Líbar es muy inferior a otros de tipo fisurado como el de sierra de Mijas y, por tanto, el tipo de litología y el espesor de la zona no saturada no implican un aumento de la capacidad de autodepuración.

En el acuífero carbonático fisurado de la sierra de Mijas, los parámetros relacionados con la litología, permeabilidad y espesor de la zona no saturada tienen mayor correlación con el índice de vulnerabilidad, es decir, definen en mayor medida la vulnerabilidad del acuífero. En cambio, en el acuífero karstificado de la sierra de Líbar, la vulnerabilidad queda definida en mayor medida por la presencia de formas kársticas, elementos que neutralizan la capacidad de protección de la zona no saturada.

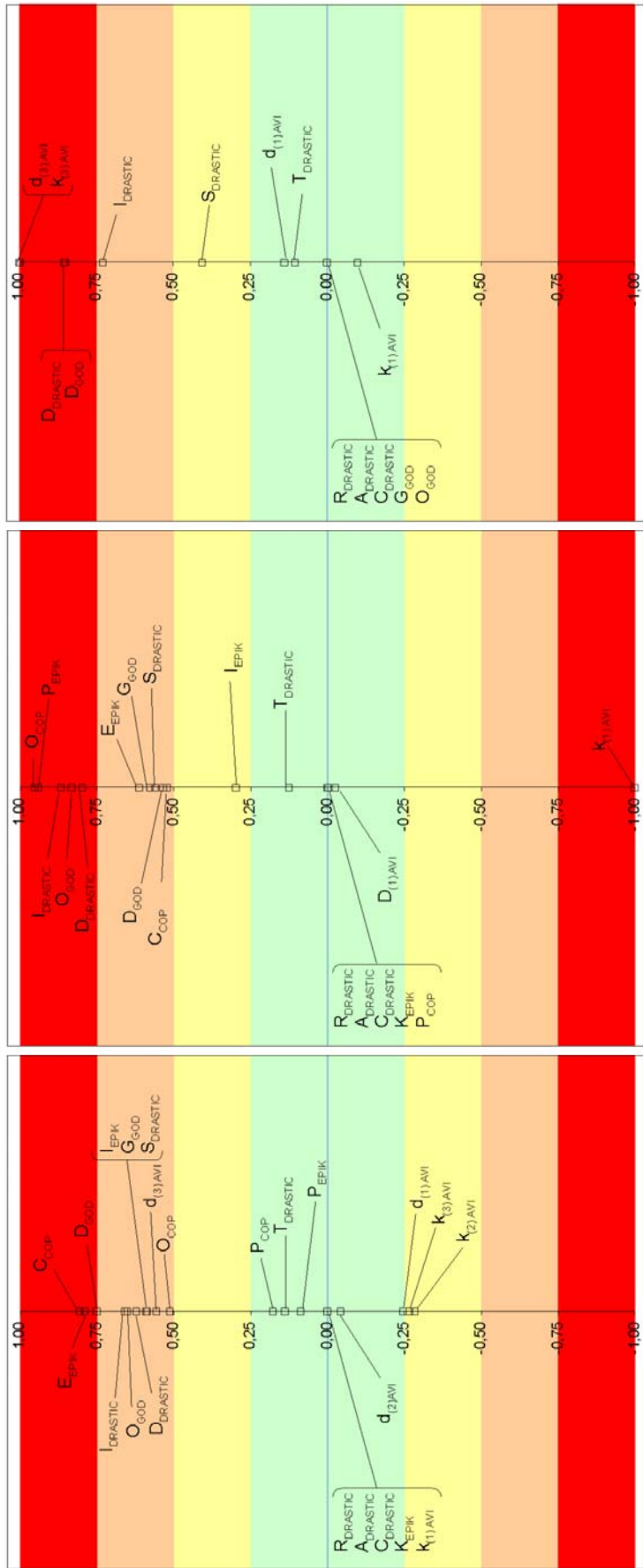


Figura 11.1. Representación del coeficiente de correlación de Pearson entre cada parámetro y el índice de vulnerabilidad de cada método aplicado en los acuíferos de la sierra de Líbar (izquierda), sierra de Mijas (centro) y río Vélez (derecha). La letra mayúscula corresponde al parámetro o factor. El subíndice numérico para el método AVI y la capa de la zona no saturada: 1 = material acuífero, 2 = material no acuífero de la zona no saturada y 3 = suelo.

En los dos acuíferos carbonáticos, sierra de Mijas y sierra de Líbar, se han obtenido resultados completamente opuestos mediante métodos específicos de evaluación de la vulnerabilidad intrínseca para este tipo de medio. El factor O del método COP, relacionado con la capacidad de protección de la zona no saturada, presenta una valoración antagónica en ambos acuíferos. En la sierra de Líbar, el elevado grado de karstificación de los materiales carbonáticos implica una mayor correlación del factor C con el índice COP, dada la influencia de las formas kársticas en la vulnerabilidad intrínseca, y una menor correlación del factor O. En el acuífero de la sierra de Mijas, donde el grado de karstificación de los materiales trásicos es mucho menor, el factor O es el que define en mayor medida la vulnerabilidad del acuífero respecto al resto de factores. Los parámetros del método EPIK muestran una situación similar a la del método COP, en la medida que el parámetro E tiene una elevada correlación en el acuífero de la sierra de Líbar y baja en la sierra de Mijas, y el parámetro P tiene una escasa incidencia en el primero y elevada en el segundo.

El suelo es una variable que, en general, tiene la misma función que la litología y espesor de la zona no saturada, es decir, sirve para evaluar la capacidad de protección de la zona no saturada y, como ocurre con las variables anteriores, el resultado de la correlación difiere en función del tipo de acuífero. En la sierra de Líbar, el suelo apenas tiene importancia según los métodos empleados, pero en la sierra de Mijas y el río Vélez influye notablemente, a excepción de los resultados obtenidos para el método DRASTIC, donde la correlación es poco representativa. Es decir, en los acuíferos del río Vélez y la sierra de Mijas, la zona no saturada y las variables derivadas de ella tienen mayor peso en la vulnerabilidad intrínseca que en el acuífero de la sierra de Líbar.

La pendiente es una variable que solo es tenida en cuenta por tres de los cinco métodos utilizados y, en dos de ellos, aparece como complemento de algún otro parámetro (I en EPIK) y (C en COP). En el método DRASTIC, la pendiente tiene una correlación prácticamente nula con el índice de vulnerabilidad. En los métodos COP y EPIK es difícil de valorar la influencia de esta variable en el índice, si bien se han observado variaciones en las clases de vulnerabilidad del mapa final obtenidos por ambos métodos que son consecuencia de variaciones en el porcentaje de pendiente.

La recarga es una variable que apenas tiene incidencia en la distribución de las clases de vulnerabilidad en los tres acuíferos estudiados, según los métodos COP (factor P) y DRASTIC (parámetro R). El método DRASTIC evalúa con mayor vulnerabilidad aquellas zonas de un acuífero cuya recarga es superior a 250 mm y, en los tres acuíferos analizados, la recarga es superior a ese umbral, por lo que el valor de R es constante. El método COP evalúa la recarga de forma indirecta mediante la precipitación y establece el umbral a partir del cual no hay variaciones en la vulnerabilidad intrínseca a partir de 1600 mm de precipitación según el factor (P_Q : cantidad de precipitación). Conviene tener en cuenta que la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca realizada en este trabajo se ha llevado a cabo para una situación previsora de máxima vulnerabilidad, correspondiente a un año húmedo, una situación pluviométrica que fácilmente supera los umbrales establecidos por los métodos.

Los valores de correlación obtenidos entre las variables y el índice AVI no son concluyentes a la hora de definir la vulnerabilidad, pues el algoritmo de cálculo deja la duda sobre cual es el parámetro que, en mayor medida, representa las variaciones de la vulnerabilidad. Además, otro

elemento que introduce incertidumbre en este análisis es el número de capas presentes en la zona no saturada, de manera que, en unos casos, el parámetro k (de una capa) tiene una correlación mayor con el índice de vulnerabilidad que el parámetro d , y, en otros casos, es el parámetro d referido a otra capa de la zona no saturada.

Los únicos parámetros que han mostrado, en alguna ocasión, una correlación negativa con el índice de vulnerabilidad son los del método AVI, igualmente como consecuencia del algoritmo de cálculo. No se puede establecer una norma general sobre cuando la correlación es negativa o positiva, pues dependerá de los valores que tenga cada parámetro en cada caso y tampoco si la correlación significa mayor o menor vulnerabilidad. Con el método AVI, no se puede determinar si la influencia de una variable es directa o inversamente proporcional al índice.

En otro orden de cosas, los resultados obtenidos son consecuencia de las particularidades de cada método. Con DRASTIC, la geología es una característica de los acuíferos que se utiliza para valorar dos parámetros: la zona no saturada (parámetro I) y la zona saturada (parámetro A). Esto puede repercutir en una redundancia de los datos de entrada, que se manifiesta en el mapa final por una elevada influencia de la geología en las variaciones de la vulnerabilidad. Además, en los acuíferos de la sierra de Líbar y sierra de Mijas, la geología ha sido utilizada para evaluar la conductividad hidráulica (parámetro C). En estos casos, no se ha realizado un mapa de la conductividad hidráulica a partir de los datos en sondeos, debido a la falta de una red de datos lo suficientemente densa para generar un modelo de conductividad hidráulica y, en su defecto, se ha asignado un valor representativo a aquellas litologías con un comportamiento hidrogeológico similar. Por lo tanto, los resultados obtenidos en los acuíferos de la sierra de Líbar y sierra de Mijas, con el método DRASTIC, tienen una marcada influencia de la geología en la evaluación final de la vulnerabilidad.

La puntuación de la variable D del método DRASTIC, profundidad del nivel piezométrico, diferencia nueve clases de vulnerabilidad entre 0 y 30 m y una clase solamente para los sectores del acuífero con más de 30 m. Esto quiere decir que está pensado para acuíferos donde las diferencias en la cota piezométrica se mueven en un margen muy cercano a la superficie topográfica caso de los acuíferos aluviales. Igualmente, el parámetro R (recarga) del método DRASTIC, permite diferenciar varias clases entre 0 y 250 mm y valores de recarga superiores en una sola, por lo que las variaciones espaciales apenas son perceptibles y, por ello, en la mayoría de los casos, predomina una puntuación máxima y una variabilidad de las puntuaciones en función de las diferencias de infiltración y no de la precipitación.

Respecto al método GOD, las clases del parámetro (O), tienen una única puntuación posible, lo cual no permite precisar la puntuación de la litología en función de criterios como, por ejemplo, el grado de meteorización. Sin embargo, el método DRASTIC sí tiene una mayor variabilidad de valores para los parámetros A (zona saturada) e I (zona no saturada) y, por tanto, una mayor posibilidad de adecuar la puntuación de estas variables a las características del área de estudio. Ahora bien, la variabilidad en las puntuaciones de un parámetro conlleva una cierta subjetividad en su elección, aspecto que en el método GOD no se puede dar.

El método GOD permite evaluar, con la mínima puntuación, profundidades del nivel piezométrico mayores de 100 m, mientras que DRASTIC, establece la puntuación más baja a partir de 30 metros. En los acuíferos aluviales, el nivel piezométrico está a escasos metros de la superficie topográfica y, generalmente, las variaciones del nivel piezométrico se producen a

poca profundidad, por lo que se adaptan bien (de cara a una mayor variabilidad espacial de la vulnerabilidad) los intervalos del parámetro D de los métodos DRASTIC y GOD (esquemas 1 y 2 del anexo). Sin embargo, en acuíferos montañosos, la profundidad del nivel piezométrico puede superar fácilmente la centena de metros y eso da lugar a una escasa variación del mapa correspondiente a este parámetro en el mapa final de vulnerabilidad intrínseca.

La puntuación del parámetro G (tipo de acuífero) del método GOD tiene un recorrido que va desde 0 a 1, mayor que los otros dos parámetros (O y D), lo que muestra la importancia de esta variable en determinadas situaciones que hacen muy poco vulnerable el acuífero. Por ejemplo la puntuación 0,2, para acuíferos confinados, es menor que la mínima puntuación con que se puede evaluar las características litológicas del acuífero (O) y la profundidad del nivel piezométrico (D). La clasificación de la vulnerabilidad a partir del método GOD se realiza mediante intervalos irregulares del índice. La clase denominada Extrema tiene una amplitud de intervalo superior al resto. Ello no implica una mayor probabilidad de mostrar zonas con vulnerabilidad máxima, pues la probabilidad de obtener un valor superior a 0,7 (vulnerabilidad Muy Alta) es sólo del 4 %.

En cuanto al método AVI, éste es el único de los empleados en la presente memoria que no establece puntuaciones ni ponderaciones de las variables. A priori, esta característica se plantea como positiva en la medida que la cartografía no queda influenciada por interpretaciones del investigador. El problema fundamental estriba en tener información detallada de los parámetros utilizados, particularmente de la conductividad hidráulica.

Por último, el método EPIK no tiene en cuenta la profundidad del nivel piezométrico, debido a la particularidad del medio kárstico. La entrada de agua en acuíferos kársticos se produce, principalmente, de manera concentrada o puntual a través de las geoformas exokársticas, en las cuales la capacidad de atenuación al contaminante es mínima por la elevada velocidad de flujo. Con el método EPIK se estiman como zonas más vulnerables, aquellas en las que hay grandes conductos kársticos y no se tiene en cuenta el espesor de zona no saturada, debido a la elevada heterogeneidad hidrogeológica de este tipo de acuíferos. Según el sistema de evaluación del método EPIK, la mayor importancia de una variable y/o del índice final en la vulnerabilidad intrínseca está asociada a un valor absoluto menor, a diferencia de DRASTIC y GOD en los que a mayor valor absoluto, mayor vulnerabilidad intrínseca, lo cual es en cierta medida contradictorio, puesto que el índice se obtiene mediante una relación proporcional.

11.3. VULNERABILIDAD DE LOS ELEMENTOS DEL MEDIO HUMANO DEPENDIENTES DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

La vulnerabilidad de los distintos elementos del medio humano dependientes de las aguas subterráneas, como puede ser la población, la agricultura, ganadería, hostelería y otras actividades productivas, ha sido analizada para cada uno de los tres acuíferos en su conjunto, dada la dificultad que entraña un análisis pormenorizado de esta componente, en particular la delimitación de las áreas de recarga de los puntos de agua.

El único acuífero para el que se dispone de información más detallada es el de la sierra de Mijas, donde se han diferenciado cuatro sistemas, por lo que indirectamente se han diferenciado cuatro áreas de recarga diferentes. Este hecho ha motivado que la vulnerabilidad

del acuífero sea inferior al dividirse la exposición de los elementos del medio humano dependientes de los recursos del acuífero. Por tanto, la vulnerabilidad de la población y sus bienes en la sierra de Líbar y del río Vélez está sobreestimada en la medida que se ha tenido en cuenta el conjunto de elementos expuestos. En el acuífero del río Vélez no existe una compartimentación del mismo en diferentes sistemas (como en la sierra de Mijas), no se han encontrado argumentos ni referencias bibliográficas que permitan establecer tal diferenciación. En cambio, en el acuífero de la sierra de Líbar sí hay argumentos para diferenciar varias áreas de recarga como se ha deducido a partir de ensayo de trazadores (Andreo *et al.*, 2005). Sin embargo, el hecho de que la vulnerabilidad del medio humano en la sierra de Líbar sea de clase Baja, no implica una acusada sobreestimación, ya que el simple hecho de que haya actividades productivas agropecuarias y hosteleras en una zona que abastezca a más de 500 personas implica una vulnerabilidad de clase Baja, lo cual ocurriría de todas formas en la sierra de Líbar, aunque se diferenciaran diferentes áreas de recarga de los puntos de abastecimiento a la población y sus bienes.

La utilización de áreas de recarga de los puntos de agua supone, por otra parte, un problema de delimitación, en el sentido de que dichas áreas son variables en función de la situación hidrogeológica (aguas altas o aguas bajas) y, en acuíferos cuyo funcionamiento está influenciado por los bombeos en sondeos, como es el caso de la sierra de Mijas, por la cantidad de agua que se explota. El primer problema, relacionado con la situación hidrodinámica, podría ser resuelto a partir de la definición de las áreas de recarga en una situación de aguas altas, como se ha llevado a cabo para el análisis de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero, por ser considerada como la situación más desfavorable, es decir, más vulnerable. En cambio, la variabilidad de las áreas de recarga, derivada de modificaciones en la intensidad de la explotación, es una situación menos controlable y con una mayor variabilidad temporal en comparación con las condiciones naturales del acuífero. Por tanto, es necesario utilizar un referente espacial para asignar la vulnerabilidad del medio humano de forma permanente, que puede estar definido por los sistemas de aguas subterráneas diferenciados dentro de un mismo acuífero.

Respecto a los datos necesarios para evaluar la vulnerabilidad del medio humano, hay que tener en cuenta que sólo se han utilizado los recogidos en los censos de población y locales, es decir, no se ha tenido en cuenta la población y los trabajadores temporales, que en determinadas épocas del año superan notablemente el número de habitantes y trabajadores censados. En verano, la población que depende de los recursos de la sierra de Mijas es muy superior por la llegada de turistas a la Costa del Sol y el volumen de trabajadores empleados en el sector hostelero también aumenta considerablemente, por lo que de manera proporcional aumenta la exposición de los elementos del medio humano y con ello la vulnerabilidad del mismo. En este sentido, una matización que se podría recoger en el análisis de la vulnerabilidad de la población y sus bienes es la variabilidad temporal en el número de elementos expuestos tal y como se ha hecho con la vulnerabilidad intrínseca del acuífero. La vulnerabilidad intrínseca se ha analizado para una situación más desfavorable (periodo de aguas altas) y, de forma análoga, se podría haber evaluado la vulnerabilidad del medio humano en una situación más desfavorable, por ejemplo en verano, una época en la que el número de elementos expuesto aumenta respecto a la media.

11.4. RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

El grado y la proporción de superficie de cada clase de riesgo ha sido el criterio que se ha utilizado para valorar la importancia del riesgo de contaminación en cada acuífero.

El acuífero con mayor riesgo de contaminación de las aguas subterráneas es el del río Vélez, donde la elevada presencia de peligros, aunque no sean de elevada toxicidad, supone que haya una elevada superficie del acuífero con riesgo de contaminación. En el acuífero del río Vélez se han detectado zonas de riesgo Alto, pero la mayor parte del acuífero tiene un riesgo de clase Moderado (figura 11.2). El acuífero de la sierra de Líbar es el que presenta menor riesgo de contaminación, dado casi toda su superficie tiene riesgo de clase Baja y las zonas de riesgo Moderado son muy pocas. El acuífero de la sierra de Mijas se sitúa en una posición intermedia, porque el porcentaje de superficie con riesgo Bajo es inferior al acuífero de Líbar y superior al del río Vélez y el porcentaje de riesgo Moderado es superior al de la sierra de Líbar pero inferior al del río Vélez.

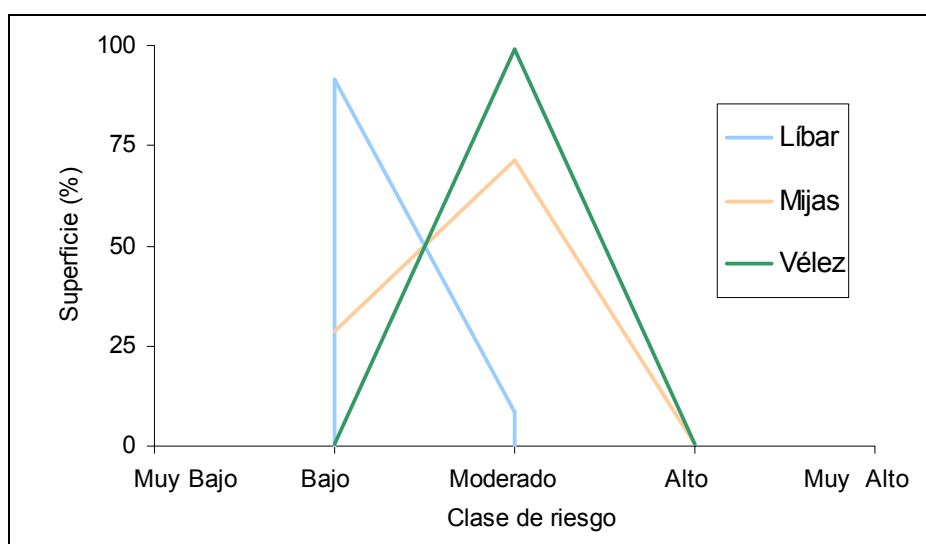


Figura 11.2. Superficie de los acuíferos analizados según clase de riesgo.

En la sierra de Líbar, el riesgo es menor como consecuencia de la poca presencia de peligros y del escaso uso que se realiza de los recursos del acuífero, lo que repercute en que haya poca población expuesta. En la sierra de Mijas, hay mayor riesgo debido a la mayor utilización del acuífero para abastecimiento de la población y de la actividad productiva. En el caso del río Vélez, la elevada vulnerabilidad del acuífero en la mayor parte del mismo, junto con la elevada presencia de peligros, hace que el riesgo sea de clase Moderado. En este acuífero la agricultura juega un papel muy importante, por ser el principal elemento que influye en que la vulnerabilidad del medio humano sea de clase Moderada, dado que la utilización del recurso para la población es escasa y la agricultura, como actividad productiva, todavía tiene un peso importante en la economía de la comarca.

CONSIDERACIONES FINALES

12. CONSIDERACIONES FINALES

La metodología que se ha planteado en este trabajo tiene como objetivo la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas, desde un punto de vista integrador de los principales componentes del mismo (peligro, exposición y vulnerabilidad) con objeto de que se convierta en un documento práctico para su posterior aplicación en la gestión del riesgo. Además de las aportaciones metodológicas conseguidas en esta línea, que a continuación se especificarán de forma más detallada, como conclusión de esta tesis doctoral pueden añadirse otras aportaciones novedosas de interés.

Se ha tratado de manera innovadora, especialmente en el campo de las aguas subterráneas, el contexto en el que se producen los riesgos a partir de factores de índole socioeconómica. Este aspecto del riesgo se ha concretado en el factor (V_H) referente a la vulnerabilidad de la población y sus bienes.

A partir del análisis comparado de los resultados obtenidos con diversas metodologías de evaluación y cartografía de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos (componente V_F), se han establecido las bases para diseñar un nuevo método (COP) que permite la evaluación y cartografía de la vulnerabilidad de acuíferos kársticos, cuyas características específicas no son tenidas en cuenta por la gran mayoría de los métodos.

Otras aportaciones se encuadran en la variabilidad de mapas que acompañan al resultado final del riesgo y que ayudan a comprender la estimación resultante en cada zona de estudio, así como la posterior gestión del mismo. También se aportan diversas formas de representación de los elementos expuestos al riesgo adaptadas a las particularidades espaciales de cada elemento: personas y actividades económicas. Por otra parte, el algoritmo de estimación del riesgo propuesto tiene cierta flexibilidad para la implementación de cualquier metodología de evaluación de los componentes P (peligrosidad) y V_F , dada variabilidad de métodos que se adaptan mejor en unos acuíferos que en otros.

Por el contrario, algunos aspectos a revisar tras la aplicación realizada en el marco de la presente tesis son: la mejora del índice de peligrosidad para adaptarlo al contexto mediterráneo y a casos de contaminación difusa e incluir en la evaluación de la vulnerabilidad del medio humano elementos relacionados con aspectos de valor medioambiental y cultural, además de valorar la estacionalidad de los elementos expuestos al riesgo en el ámbito mediterráneo.

12.1. ASPECTOS GENERALES DE LA CARTOGRAFÍA DE RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La gestión del riesgo se resuelve mediante el empleo de un compendio de distintos mapas con distinta funcionalidad, según el objetivo que se pretenda conseguir. Cada uno de los mapas de riesgo presenta referentes espaciales distintos que permiten obtener una perspectiva diferente del mismo problema. Estos ámbitos espaciales fueron definidos por Calvo (2001) como espacios de catástrofe (mapa de peligros), territorios de riesgo (mapa de vulnerabilidad intrínseca del acuífero) y contexto del riesgo (mapa de vulnerabilidad de la población y sus bienes).

El mapa de peligros de contaminación potencial está dirigido a delimitar cuáles son las áreas donde se puede producir un evento de contaminación. Allí, donde tenga lugar una actividad humana que pueda poner en peligro la calidad de las aguas, ésta será gradada en función del daño que pueda provocar. Estos espacios son denominados espacios de catástrofe, es decir, aquellas zonas donde se puede manifestar el riesgo.

El mapa de vulnerabilidad intrínseca del acuífero se relaciona con los llamados territorios en riesgo, áreas que incluyen a los anteriores espacios de catástrofe. El mapa de vulnerabilidad del acuífero ayuda a determinar la correcta ordenación del territorio frente al riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, en la medida que muestra la capacidad del acuífero para resistir un evento de contaminación. El mapa de vulnerabilidad del acuífero delimita todo el territorio donde se puede producir un evento de contaminación y la posibilidad de cada sector a ser afectado por la contaminación. Definir cuáles son los espacios menos vulnerables es una tarea primordial para que la actividad humana sea lo menos agresiva posible contra el medio natural, en este caso, las aguas subterráneas.

El mapa de vulnerabilidad de la población y sus bienes productivos determina el contexto social en el que se puede producir un evento de contaminación y la repercusión socioeconómica que podría ocasionar el fenómeno analizado. El contexto social es una de las líneas de estudio de los riesgos que mayor interés ha generado en los últimos tiempos, sobre todo al interpretarse las características de la población y sus bienes como el elemento receptor de las consecuencias del riesgo. El mapa de vulnerabilidad de la población y sus bienes permite identificar cuáles son los espacios donde el evento extremo ocasionaría las pérdidas y la importancia de las mismas. Esta circunstancia es fundamental a la hora de realizar una gestión del riesgo basada en la compensación, puesto que permitiría, por ejemplo, definir la cuantía de los seguros o en la prevención mediante la implantación de sistemas de alerta y emergencia.

El mapa de riesgo *sensu stricto* permite definir la magnitud del problema y establecer los espacios prioritarios para llevar a cabo las medidas de mitigación y reducción del riesgo, desde cualquier perspectiva (preventiva o compensatoria), desde la reordenación del territorio hasta la implantación de medidas estructurales para la protección del medio.

Cada uno de estos mapas, o la combinación de varios, responde a una pregunta del mismo problema: la contaminación de las aguas subterráneas. Para determinar los espacios donde se puede llevar a cabo el desarrollo de una actividad potencialmente contaminante, es necesario conocer los espacios vulnerables a esa actividad, es decir, se utilizaría el mapa de vulnerabilidad intrínseca del acuífero o territorio en riesgo. Para establecer las medidas de protección de los recursos hídricos es necesario conocer las zonas que presentan riesgo y su intensidad, con el fin de priorizar las actuaciones oportunas y diseñar diferentes estrategias. Para delimitar los espacios donde la repercusión del riesgo será mayor, y de forma directamente proporcional la cuantía de la pérdida, es necesario disponer de un mapa de vulnerabilidad del contexto social, es decir, un mapa de vulnerabilidad de la población y sus bienes.

12.2. COMPONENTES DEL RIESGO

12.2.1. PELIGROS DE CONTAMINACIÓN

El método aplicado en este trabajo para evaluar el peligro de contaminación potencial debido a las actividades humanas tiene un notable sesgo, como consecuencia de los valores de nocividad (factor H) asignados a cada tipo de actividad, los cuales varían considerablemente según el grupo de peligros: industrial, urbano o agropecuario. A partir de las clases del índice HI (peligrosidad) y de los valores del factor H (toxicidad o nocividad), se deduce que las actividades del sector industrial son más peligrosas que las relacionadas con los otros grupos. Los intervalos del índice HI con los que se elabora el mapa de peligrosidad de las actividades humanas (cuadro 5.2) muestran que solamente los peligros con una nocividad superior a 60 y 80 (valor H, cuadro 5.1) pueden alcanzar un grado de peligrosidad Alta o Muy Alta, respectivamente. Hay 25 actividades con un valor de nocividad superior a 60, todas ellas relacionadas con la actividad industrial excepto tres que se corresponden a actividades relacionadas con el ámbito urbano. En estas actividades urbanas no se incluyen, por ejemplo elementos, a priori peligrosos, como los vertederos de residuos sólidos urbanos, circunstancia que llama la atención cuando se ha comprobado que en acuíferos cercanos a la zona de estudio, como el de Marbella, la presencia de un vertedero RSU ha provocado la contaminación de los recursos hídricos del acuífero por el lixiviado procedente del mismo (Vadillo, 2003). Las actividades que potencialmente pueden tener una peligrosidad Muy Alta, están relacionadas con el manejo de residuos industriales muy peligrosos, por ejemplo centrales nucleares o aguas residuales de las minas y fábricas.

La metodología utilizada para estimar la peligrosidad (método HI) ha sido diseñada por De Keteleare *et al.* (2004) con el objeto de que pueda ser aplicada en todo el ámbito europeo. En Europa Central la actividad industrial está muy extendida y la presencia de peligros extremos relacionados con actividades de este tipo no es un hecho aislado. En cambio, el ámbito mediterráneo es un espacio netamente turístico, como la Costa del Sol, donde las actividades potenciales de contaminación tienen una toxicidad menor que la actividad industrial. Indirectamente, se asocia una baja peligrosidad a la actividad urbana que no está exenta de sucesos catastróficos como el del acuífero carbonático de Marbella (Vadillo, 2003).

Estas observaciones son indicativas de que el método HI evalúa al alza los accidentes por causa mayor, según la terminología de Pita (coord.) (1999), mientras que disminuye la importancia de aquellas fuentes que tienen un carácter difuso o penetrante como pudiera ser el caso de las urbanizaciones sin sistemas de alcantarillado, zonas agrícolas, estercoleros o vertederos RSU.

Q_n es un factor de intensidad de la contaminación utilizado por éste método, cuyo planteamiento de base es modificar la nocividad de las actividades humanas en función de la cantidad de contaminante susceptible de ser vertido, por lo que una actividad poco tóxica podrá ser muy peligrosa si vierte una gran cantidad de sustancias nocivas. Pero los valores utilizados para este factor, no permiten obtener una clase de peligrosidad Alta o Muy Alta en actividades de baja toxicidad, cuyo uso continuado e intensivo pueden provocar eventos de contaminación, como los que han ocurrido en los acuíferos del río Vélez (contaminación por nitratos, García Aróstegui, 1998) o el caso de Marbella (contaminación por lixiviado, Vadillo 2003). Por tanto, se deduce que este factor no representa correctamente la realidad de los fenómenos analizados,

al contrario que el factor R_f (probabilidad de contaminación) que permite incluso anular la peligrosidad de una actividad en función de las medidas de protección adoptadas.

Por otra parte, los factores de intensidad (Q_n) y probabilidad (R_f), se tienen en cuenta indirectamente en el factor nocividad (H). El hecho de diferenciar tipologías urbanísticas en función de la concentración de viviendas (urbanizaciones o casas aisladas) y del tipo de saneamiento de las mismas (si están conectadas o no a la red de alcantarillado) son aspectos relacionados con la intensidad y la probabilidad de vertidos contaminantes, respectivamente, y no atañen de forma directa al tipo de contaminante puesto que es el mismo.

Las edificaciones tienen un tratamiento diferencial respecto de otros elementos o actividades potencialmente contaminantes como las carreteras. Éstas no se diferencian en función de la tipología (autopistas o caminos secundarios) ni tampoco en función de las medidas de seguridad que tienen (presencia o ausencia de canales de desagüe) aspectos ambos relacionados con la intensidad y la probabilidad de contaminación.

Las observaciones indicadas con estos ejemplos muestran la necesidad de seguir profundizando en el desarrollo de una metodología para la evaluación de los peligros de contaminación de aguas subterráneas. Corregir los sesgos y aumentar la aplicabilidad son algunas de las tareas a desarrollar.

En cualquier caso, la concentración que se ha observado de diferentes peligros de contaminación sobre zonas de muy elevada vulnerabilidad lleva a pensar que no se está haciendo un correcto uso del territorio. En la medida que los recursos hídricos subterráneos, sobre todo en época de sequía, pueden marcar el devenir de acontecimientos medioambientales futuros, se hace indispensable la consideración del problema de la contaminación con planteamientos científicos que lo avalen.

12.2.2. VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DEL ACUÍFERO (MEDIO FÍSICO)

La vulnerabilidad de los acuíferos está determinada por las características del medio físico y, éstas a su vez, son consecuencia de las características ambientales del momento en que se analice el riesgo. Aspectos del acuífero como cantidad de agua que lo recarga, capacidad de autodepuración y capacidad de dilución son variables dependientes del tiempo, en función de las variaciones hidrogeológicas y, en consecuencia, de las variaciones meteorológicas. En regiones donde estas variaciones son poco apreciables y los valores de precipitación prácticamente estables, la utilización de un año medio para realizar la cartografía es un criterio válido para evaluar la vulnerabilidad intrínseca. En dominios como el mediterráneo, donde las variaciones pluviométricas interanuales son muy acusadas, el uso de valores medios encierra una gran diversidad de situaciones. Frente a este problema, se ha seleccionado un año tipo de alta recarga para evaluar la capacidad de autodepuración y la exposición del recurso. La implicación que tiene en la cartografía es la obtención de resultados de mayor vulnerabilidad del acuífero y, por tanto, de mayor riesgo. Si se tiene en cuenta que la cartografía de vulnerabilidad intrínseca es una herramienta preventiva que mide la protección natural que tiene el agua subterránea y, en su defecto, la necesidad de protección que debe hacer el hombre del recurso, el hecho de utilizar mapas de vulnerabilidad del acuífero en situaciones de mayor gravedad conlleva una mayor protección. Esto tiene repercusión sobre el medio ambiente, pero también sobre la población, dado que se protege la calidad del recurso. Este

tipo de actuación está en la línea que marca la Unión Europea en materia de protección de recursos hídricos en la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE del Parlamento y Consejo Europeo).

En cuanto a los resultados obtenidos, se han deducido varias conclusiones sobre los métodos de vulnerabilidad intrínseca. En primer lugar, el número de parámetros no influye en que los mapas de vulnerabilidad intrínseca muestren una mayor variabilidad espacial. Por ejemplo, el método DRASTIC utiliza más del doble de parámetros que el método GOD y los resultados obtenidos por uno y otro método son muy similares en todos los acuíferos analizados. Si se comparan los resultados de aplicar los métodos COP y PI en la sierra de Líbar, dos métodos que utilizan un número elevado de parámetros, se deduce que los resultados obtenidos difieren en gran medida. La variabilidad espacial de la vulnerabilidad intrínseca no es consecuencia del número de parámetros, sino de la heterogeneidad hidrogeológica del acuífero y de la capacidad del método para recoger esa variabilidad.

Las importantes diferencias hidrogeológicas entre los tres grandes tipos de acuíferos, karstificados, fisurados y porosos, marcan la metodología a utilizar en cada caso. Los métodos específicos de evaluación de la vulnerabilidad intrínseca en medio kársticos, como por ejemplo COP y EPIK, muestran, en general, una mayor variabilidad de la vulnerabilidad intrínseca que los métodos aplicados de forma genérica a cualquier tipo de acuífero. Esto es consecuencia de que los métodos específicos (en este caso para acuíferos kársticos) recogen aspectos que sólo están presentes en los ámbitos de aplicación para los que han sido diseñados.

Todos los métodos, a excepción de AVI, tienen un grado de subjetividad inherente a la propia metodología, debido a la asignación de puntuaciones, que en el caso del método DRASTIC se incrementa por el abanico de posibilidades que ofrecen algunas variables, como por ejemplo, la valoración que se realiza del tipo de litología de la zona saturada y de la zona no saturada. El método AVI utiliza un sistema de relaciones numéricas, que anula el sesgo sobre cómo se debe valorar un parámetro del método en un punto dado. El problema con este tipo de métodos puede ser la falta de datos con los que elaborar mapas precisos de cada parámetro analizado, lo que puede repercutir en una generalización de la zona de estudio, mayor cuanto más heterogénea sea.

12.2.3. VULNERABILIDAD DE LA POBLACIÓN Y SUS BIENES (MEDIO HUMANO)

La premisa que ha marcado el desarrollo del método de evaluación de la vulnerabilidad de la población y sus bienes ha sido la reducción, cuando no eliminación, de la subjetividad procedente de las puntuaciones asignadas a las variables de los métodos. En este sentido, se ha intentado evaluar la vulnerabilidad para todos los elementos del medio humano (población y actividades productivas) mediante un algoritmo matemático que combine valores de cada parámetro medibles en campo. Esta circunstancia ha derivado, en algunos casos, a un complejo sistema de estimación de la vulnerabilidad, lo que por otra parte, puede suponer un problema de versatilidad del método, que igualmente se debe tener en cuenta.

Una cuestión que se puede derivar del método propuesto para analizar la vulnerabilidad de la población y sus bienes es la elección de la entidad espacial de referencia. La unidad espacial que sirve de referencia para representar cartográficamente la exposición de los elementos dependientes del recurso y la vulnerabilidad de los mismos puede ser variable en función de la

disponibilidad de datos y, por tanto, hay que tener siempre presente la misma escala de referencia a la hora de comparar resultados.

En este trabajo, se ha utilizado como unidad espacial para representar la población, el conjunto de viviendas que forman un núcleo urbano cuantificado en el censo de población. Por tanto, la cartografía de vulnerabilidad sólo es válida si se utiliza estrictamente esta unidad espacial. Si para representar la vulnerabilidad de la población se utiliza, por ejemplo, los habitantes distribuidos por secciones censales, entonces los resultados son muy distintos y estarían sesgados por el hecho de que la sección censal es una distribución equitativa de la población en el territorio y el grado de vulnerabilidad o de exposición sería similar y presumiblemente bajo con la metodología diseñada en este trabajo.

Estas características sobre la unidad espacial de representación de la vulnerabilidad de la población tienen su repercusión en el análisis de la población, pero no influye en el índice de vulnerabilidad del medio humano asignado al acuífero para su posterior combinación con el resto de componentes del riesgo. Este índice recoge el total de elementos expuestos y su grado de vulnerabilidad, independientemente, de la distribución que presenten. Por tanto, el mapa de riesgo no sufre variaciones y los problemas surgirían a la hora de analizar la vulnerabilidad de la población y sus bienes para establecer las medidas reducción del riesgo, tanto preventivas, como compensatorias y coercitivas, aspecto que forma parte de la gestión del riesgo.

En los casos que no se puede discernir el volumen de elementos expuestos, sí puede suponer un problema el cambio de unidad espacial a la hora de estimar el riesgo. Por ejemplo, si un municipio utiliza los recursos hídricos de dos acuíferos para abastecer a la población, el hecho de no tener información detallada de cuáles son los núcleos que se abastecen de cada acuífero, impedirá evaluar correctamente la vulnerabilidad del medio humano.

Un rasgo esencial e inherente a la vulnerabilidad de los elementos del medio humano, es la componente dinámica. Los mapas de exposición de la población y sus bienes y, por tanto, de vulnerabilidad de los mismos, no son estáticos en el tiempo sino que varían continuamente. De esta manera, el grado de vulnerabilidad que se ha calculado para el medio humano dependiente de los recursos hídricos de los acuíferos, podría variar en el tiempo. La vulnerabilidad del medio humano, como componente del riesgo, implica que el rasgo dinámico de los mapas sea, igualmente, atribuible a la cartografía de riesgo de contaminación de las aguas subterráneas según la metodología planteada. En este trabajo, se ha realizado una evaluación de la vulnerabilidad del medio humano que tiene en cuenta el volumen censado de población expuesta en el año 2001, de forma que se ha obtenido un mapa de vulnerabilidad del medio humano que perfectamente podría ser distinto al que resultaría de analizarla para otro año o cualquier otro momento.

12.3. MÉTODO DE ESTIMACIÓN Y CARTOGRAFÍA DEL RIESGO

El riesgo de contaminación de aguas subterráneas se ha analizado en este trabajo como una función de la peligrosidad de las actividades humanas, de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero y de la vulnerabilidad de la población y los bienes dependientes de las aguas subterráneas. La estimación de cada uno de estos componentes necesita de una metodología propia, para lo cual es necesario establecer el método que mejor se adecue a cada caso.

Dada la disparidad de métodos de estimación de cada uno de los componentes del riesgo, mayor para unos componentes que en otros, el método de estimación del riesgo debe tener en cuenta todos los valores posibles de cada componente. De este modo, una tarea importante a la hora de plantear el método de estimación del riesgo es acotar los valores de entrada en el algoritmo de cálculo, con el objetivo de no forzar el método de estimación del riesgo a utilizar una metodología concreta para cada componente. Por ello, se ha realizado una propuesta de cálculo que permite utilizar cualquier método de evaluación de los componentes del riesgo, en función de la disponibilidad de datos, características de las zonas de estudio, adecuación del método, etc.

El método propuesto para estimar y cartografiar el riesgo, normaliza los componentes de peligro y vulnerabilidad intrínseca del acuífero a una escala acotada, es decir, se conocen los valores máximos y mínimos de entrada en la fórmula, lo que permite conocer todos los casos posibles de riesgo. Por otra parte, no se ha propuesto una estandarización de los valores de vulnerabilidad del medio humano, sino que se utilizan los valores obtenidos por el método propuesto en este trabajo. En cualquier caso, conforme aparezcan en la literatura, más metodologías que avancen en la estimación de la vulnerabilidad del medio humano, siempre se podría utilizar el método de estimación del riesgo, previa estandarización de los valores a la escala empleada en este trabajo.

Esta estrategia sería necesaria para comparar mapas de riesgo de contaminación de aguas subterráneas, según el método planteado en esta tesis, aunque conviene tener presente que éste está basado en la fórmula general del riesgo, lo cual siempre facilita su comparación con otros métodos.

BIBLIOGRAFÍA

- Adams, B. y Foster, S. (1992). "Land-surface zoning for groundwater protection". *Journal Institution of water and environment management*, nº 6, pp 312-320.
- Adams, B.; Civita, M.; Gilbrich, W.; Vrba, J. y Van Waegeningh, H. (1994). Model legend for groundwater vulnerability maps. En J. Vrba y A. Zaporozec (Eds), *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*. International contributions to hydrogeology, Vol 16, Verlag Heinz Heise, Hannover, pp 87-99.
- Alfors, J.; Burnett, J.L. y Gay, T.E. (1973). "Urban geology, Master Plan of California: the nature, magnitude and cost of geological hazards in California and recommendations for their mitigation". *Bulletin of California Division of Mines and Geology*, nº 198.
- Aguilar, J.; Fernández, J.; Rodríguez, T.; Fernández, E. y Sánchez, J. (1992). *Memoria y mapa de suelos de la hoja 1054 (Vélez-Málaga)*. Universidad de Granada, Proyecto LUCDEME, ICONA. 122 p.
- Aguilar, J.; Fernández, J.; Rodríguez, T.; Fernández, E., Sánchez, J. y Roca, A. (1993). *Memoria y mapa de suelos de la hoja 1066 (Cóin)*. Universidad de Granada, Proyecto LUCDEME, ICONA. 151 p.
- Aguilar, J.; Fernández, J.; Sánchez, J.; Dorronsoro, C.; Rodríguez, T.; Fernández, E. y de Haro, S. (1995). *Memoria de suelos de la Hoja 1051 (Ronda)*. Universidad de Granada, proyecto LUCDEME, ICONA. 108 p.
- Albinet, M. y Margat. J. (1970). "Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine". *Bull BRGM*, 2º series 3(4), Orleáns, France, pp 13-22.
- Alexander, D. (1993). *Natural disaster*. Ed. Chapman and Hall, New York.
- Aller, L.; Bennett, T.; Leer, J.; Petty, J. y Hacket, G. (1987). *DRASTIC: A standardised system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings*. US Environmental Protection Agency. Ada. Oklahoma, 455 p.
- Almedia, C.; Biondic, B.; Hertelendy, E.; Hinic, V y Morel, I. (1995). Pollutants and pollutant transport in karst areas. En *Karst groundwater protection*. Informe final del programa europeo COST Action 65. Unión Europea, 371-380.
- Althaus, H., Jung, K.D., Matthess, G. y Pekdeger, A. (1982). *Lebensdauer von bakterien und viren in grundwasserleitern*. Schmidt, Umweltbundesamt, Materialien 1/82, Berlin, 190 p.
- Anderson, J. y Gosk, J. (1987). Applicability of vulnerability maps. En W. Van Duijvenbooden y H.G. Van Waegeningh (Eds), *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants*. Proceedings and information nº 38, TNO Committee on hydrological research. The Hague, pp 321-332.
- Andreo, B. y Sanz de Galdeano, C. (1994). "Structure of the Sierra de Mijas (Alpujárride complex, Betic Cordillera)". *Annales Tectonicae*, nº 3 (1), pp 23-35.
- Andreo, B. (1997). *Hidrogeología de acuíferos carbonatados en las sierras Blanca y Mijas, cordillera Bética, Sur de España*. Universidad de Málaga, 490 p.
- Andreo, B.; Carrasco, F. y Vadillo, I. (1997). "Evaluación de los recursos hídricos de las sierras Blanca y Mijas (Málaga)". *Estudios geológicos*, nº 53 (1-2), pp 33-44.

- Andreo, B.; Goldscheider N.; Vadillo, I.; Vías, J.M.; Neukum, C.; Brechenmacher, J.; Carrasco, F.; Hötzl, H.; Jiménez, P.; Perles, M.J. y Sinreich, M. (2004). Applications: Sierra de Líbar, Southern Spain. En F. Zwahlen (ed), *Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers*. Informe final de la Acción COST 620, EUR 20912, European Commission, Directorate General for Research, Luxembourg, pp 183-200.
- Andreo, B.; Vadillo, I.; Carrasco, F.; Neukum, C.; Jiménez, P.; Goldscheider, N.; Hötzl, H.; Vías, J.M. y Göppert, N. (2005). "Precisiones sobre el funcionamiento hidrodinámico y la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero kárstico de la Sierra de Líbar (Provincias de Málaga y Cádiz, sur de España) a partir de un ensayo de trazadores". *Revista de la Sociedad Geológica de España*. Volumen 17 N° 3-4. pp 187-197.
- Aneas de Castro (2000). "Riesgos y peligros: una visión desde la Geografía". *Scripta Nova*, n° 60, Barcelona, 15 p.
- Aronoff, S. (1989). *Geographic Information systems. A management perspective*. WDL publications, Ottawa, Canada, 294 p.
- Ayala, F.J. (1988). Introducción a los riesgos geológicos. *I curso riesgos geológicos*, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, pp 3-20.
- Ayala F.J. (1990). "Análisis de los conceptos fundamentales de riesgos y aplicación a la definición de tipos de mapas de riesgos geológicos" *Boletín Geológico y Minero*, ITGE, vol. 101-3, Madrid, pp 456-467.
- Ayala, F.J. (1993). Socioeconomic impacts and vulnerability in slope movements. En Georgakatos y Corominas (Eds), *Joint Spain-USA workshop on natural hazards*, Iowa Institute of Hydraulic Research, Iowa.
- Ayala, F.J. (2000). "La ordenación del territorio en la prevención de catástrofes naturales y tecnológicas. Bases para un procedimiento técnico-administrativo de evaluación de riesgos para la población". Monográfico sobre Riesgos Naturales, *Boletín de la AGE*, n° 30, pp 37-49.
- Ayala, F.J. (2002). Catástrofes naturales, mitos, religiones e historia. En F. J. Ayala y J. Olcina (Eds.), *Riesgos naturales*. Ariel, Barcelona, pp 103-123.
- Bachmat, Y. y Collins, M. (1987). Mapping to assess groundwater vulnerability to pollution. En W. Van Duijvenbooden and H.G. Van Waegeningh (Eds), *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants*. Proceedings and information n° 38, TNO Committee on hydrological research. The Hague, pp 297-307.
- Bailly, A. (1994). *Enseigner les risques naturels. Pour une géographie physique revisitée*. Ed. Anthropos. GIP Reclus. París.
- Barberi, F. (1995). Mitigación de riesgos volcánicos. *Reducción de riesgos geológicos en España*, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, pp 49-53.
- Barrows, H. (1923). "Geography as Human Ecology". *Annals of the Association of American Geographers*, 13, pp 1-14.
- Beck, U. (1992). *Risk Society. Towards a New Modernity*, Sage, Londres.

- Beck, U. (1993). "De la sociedad industrial a la sociedad del riesgo. Cuestiones de supervivencia, estructura social e ilustración ecológica". *Revista de Occidente* nº 150, pp 19-40.
- Beck, U. (2000). "Retorno a la Teoría de la Sociedad del Riesgo". Monográfico *Riesgos Naturales*, Boletín de la AGE, nº 30, pp 9-20.
- Blaikie, P. y Brookfield, H. (1987). *Land Degradation and Society*. Ed. Methuen, Londres.
- Blaikie, P., Cannon, T. Davis, I. y Wisner, B. (1994). *At risk: natural hazards, people's vulnerability, and disaster*. Ed. Routledge, Londres.
- Bohle, H. (2001). Vulnerability and criticality: perspectives from social geography. *IHPD Update*, 2/01, pp 1-5.
- Bohle, H., Downing, T. y Watts, M. (1994). "Climate change and social vulnerability: the sociology and geography of food insecurity". *Global environmental change*, 4, pp 37-48.
- Bosque, J. (1992). *Sistemas de información geográfica*. Ed Rialp. Madrid.
- Bracken, I. y Webster, C. (1990). *Information technology in Geography and planning. Including principles of Geographic Information Systems*. Routledge, Londres.
- Brechenmacher, J. (2002). *Application of the PI method for groundwater vulnerability mapping in the karst aquifer of Sierra de Líbar (Andalusia / Spain)*. Processing and analysis with GIS. Memoria de Licenciatura en Geoecología, Universidad de Karlsruhe. Sin publicar, Málaga, 109 p.
- Breeuwsma, A. y Duijvenbooden, W. (1987). Mapping of groundwater vulnerability to pollutants in the Netherlands. En W. Van Duijvenbooden y H.G. Van Waegeningh (Eds), *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants*. Proceedings and information nº 38, TNO Committee on hydrological research. The Hague, pp 309-320.
- Brown, K.W.; Evans, G.B.; Frentrop, B.D. (1983). *Hazardous waste land treatment*. Butterworth Publishers. 692 p.
- Buj, A. (1997): "Los desastres naturales y la Geografía contemporánea". *Estudios Geográficos*, nº 229, pp. 454-464.
- Burton, I. y Kates, R. (1964). "The Perception of natural hazards in resource management". *Natural Resources Journal*, 3, pp 412-441.
- Burton, I. y Kates, R. (1972). "The perception of natural hazards in resource management". *Man, space and environment*, English y Mayfield, Oxford University Press, pp 282-304.
- Burton, I.; Kates, R. y White, G. (1978). *The environment as hazard*. Oxford University Press, New York, 240 p.
- Calvo, F. (1984). "La Geografía de los Riesgos". *Geocrítica*, nº 54.
- Calvo, F. (2000). "Panorama de los estudios sobre riesgos naturales en la Geografía española". Monográfico *Riesgos Naturales*, Boletín de la AGE, nº 30, pp 21-35.
- Calvo, F. (2001). *Sociedades y territorios en riesgo*. Ediciones del Serbal. Barcelona.
- Cardona, O.D. (2001). *Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos*. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros, de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. 322 p.

- Cendrero, A. (1987). Riesgos geológicos, ordenación del territorio y protección del medio ambiente. *I Curso de riesgos geológicos*. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, pp 327-333.
- CHSE (1987). *Estudio hidrogeológico de los ríos Vélez y Benamargosa*. Proyecto 12/87. Dirección General de Obras Hidráulicas (Inédito).
- CHSE (1997). *Asistencia técnica para el seguimiento, conservación y explotación del estudio hidrogeológico de los ríos Vélez y Benamargosa (Málaga) y control de su calidad*. Comisaría de Aguas del Sur de España. Ministerio de Medio Ambiente (Inédito).
- Civita, M. (1988). *Difesa degli acquiferi dell Alta Pianura Veneta, stato di inquinamento e vulnerabilità delle acque sotterranee del Bacino del Branta*. CNR 207, Venecia. 21 pp
- Civita, M. (1993). Groundwater vulnerability maps: a review. En Biagini y Lucca (Eds), *Degradation and mobility of xenobiotics*, Proceedings IX Symposium on pesticide chemistry, Italy, pp 587-631.
- Civita, M. y De Maio, M. (1997a). Assessing groundwater contamination risk using Arcinfo via grid function. *Proceedings of ESRI conference*, San Diego, 33 p.
- Civita, M. y De Maio, M. (1997b). "Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Metodologia e automatizzazione". *Pitagora*, Bologna.
- Clark, G.E., Moser, S.C., Ratick, S.J., Dow, K., Meyer, W.B., Emani, S. Jin, W., Kasperson, J.X., Kasperson, R.E. y Schawrz, H.E. (1998). "Assessing the vulnerability of coastal communities to extreme storms: the case of Revere, MA, USA". *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 3, pp 59-82.
- Claver, I. (coord.) (1991). *Guía para la elaboración de estudios del medio físico*. Secretaria General Técnica, Centro de Publicaciones, Ministerio de Obras Públicas y Transportes. 3ª Edición, Madrid, 527 p.
- Comas, D. y Ruiz, E. (1993). *Fundamentos de los sistemas de información geográfica*. Ed. Ariel, Barcelona.
- Consejería de Salud (2001). Servicio de Vigilancia Epidemiológica de Andalucía. Informe semanal. Junta de Andalucía. Boletín 5, nº 17. 7p.
- Consejería de Salud (2002). Servicio de Vigilancia Epidemiológica de Andalucía. Informe semanal. Junta de Andalucía. Boletín 6, nº 22. 4p.
- Corniello, A. y Ducci, D. (1997). "La carta del rischio di inquinamento delle risorse idriche sotterranee: un esempio in Piana Campana". *Quaderni di Geologia Applicata*, Pitagora, 1 (3), pp 177-131.
- Coxon, C. (1999). Agriculturally induced impacts. En D. Drew y H. Hötzl (eds), *Karst Hydrogeology and human activities. Impacts consequences and implications*, International contributions to Hydrogeology nº 20. Balkema/Rotterdam/Brookfield. pp 37-80.
- Custodio, E. (1990). *Aquifer vulnerability to salinization and contamination: benefit from using environmental chemical and isotopic tracers in Spain*. IAEA, Viena, 28 p.
- Cutter, S. (1993). *Living with risk*. Ed. Edward Arnold, London.

- Cutter, S. (1996a). "Respuestas sociales a los riesgos ambientales", *Revista Internacional de Ciencias Sociales*, UNESCO, nº 150, 17 p.
- Cutter, S. (1996b). "Vulnerability to environmental hazards", *Progress in Human Geography*, 20, 4, pp 529-539.
- Cutter, S., Mitchell, J.T. y Scott, M. (2000). "Revealing the vulnerability of people and places: a case study of Georgetown county, South Carolina". *Annals of The Association American Geographers*, 90 (4), pp 713-737.
- Daly, D. y Warren, W.P. (1994). Vulnerability mapping. *Groundwater*, Newsletter nº 25. Groundwater Service Ireland (GSI), Dublín.
- Daly, D.; Delporte, C.; Hötzl, H.; Neale, S. y Stournaras, G. (1997). *Definitions. Report of working group 0*, meeting COST Action 620, Liege, Inédito, 7 p.
- Daly, D. Dassargues; A., Drew, D.; Dunne, S.; Goldscheider, N.; Neale, N.; Popescu, C. y Zwahlen, F. (2002). "Main concepts of the European Approach for (karst) groundwater vulnerability assessment and mapping". *Hydrogeological Journal*, 10, 2, Heidelberg, pp 340-345.
- DAP (1997). *Inventario y caracterización de los regadíos de Andalucía*. Dirección general de investigación y formación agraria. Servicio de publicaciones y divulgación. Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía. CD-ROM.
- Darmendrail, D. (2001). *The French approach to contaminated-land management*. BRGM/RP-51098-FR, 150 p.
- De Ketelaere, D.; Hötzl, H.; Neukum, C.; Civitta, M. y Sappa, G. (2004). Hazard analysis and mapping. En F. Zwahlen (ed), *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers*. Informe final de la Acción COST 620, EUR 20912, European Commission, Directorate General for Research, Luxembourg, pp 86-105.
- Delannoy, J.J. (1987). *Reconocimiento biofísico de espacios naturales de Andalucía*. AMA, Junta Andalucía, 50 p.
- Dinman, B.D. (1980). "The reality and acceptance of risk". *Journal of the American Medical Association*, 244, 1226-1228.
- Doerfliger, N. (1996). *Advances in karst groundwater protection strategy using artificial tracer tests analysis and multiattribute vulnerability mapping (EPIK method)*. PhD thesis, University of Neuchâtel, Switzerland, 308 p.
- Doerfliger, N. y Zwahlen, F. (1997). EPIK: a new method for outlining of protection areas in karstic environment. En Gunay y Jonshon (Eds), *Int. Symp. on Karst Waters and Environment Impacts*. Antalya, Turkey, 1997. Balkema: 117-123. Rotterdam.
- Domenico, P. y Schwartz, F. (1998). *Physical and chemical hydrogeology*. Ed John Wiley & Sons, Inc, pp 506.
- Dondis, D.A. (1976). *La sintaxis de la imagen*. Gustavo Gili, Barcelona.
- Dow, K. (1992). "Exploring differences in our common future(s). the meaning of vulnerability to global environmental change". *Geoforum* 23, pp 417-436.
- Dow, k. y Downing, T.E. (1995). "Vulnerability research: where things stand". *Human dimensions Quaterly* 1, pp 3-5.

- Drew y Hötzl (eds) (1999). *Karst Hydrogeology and human activities. Impacts consequences and implications*. International contributions to Hydrogeology nº 20. Balkema/Rotterdam/Brookfield. 322 p.
- Drysdale, R.; Pierotti, L.; Piccini, L y Baldacci. (2001). Particulate pollution of karst groundwaters from marble quarrying, Alpi Apuane, Italy. *Present state and future trends of karst studies*; Gunay, ford, Johnson & Johnson, UNESCO. pp 239-248.
- Dubreuil, G.H. (1997). Acceptability of risk: individual choice and social construction. Seminar on *the risk acceptability*, European Institut of Cyndiniques, 3rd of June 1997, Lyon. 10 p. Versión original en francés.
- Ducci, D. (1999). "GIS techniques for mapping groundwater contamination risk", *Natural Hazards*, 20, pp 279-294.
- Eliade, M. (1951). *Le mythe de l'éternel retour*. Archétypes et répétitions, Gallimard, París. Trad. en Ed. Altaya, Barcelona, 1997, 174 p.
- Escorza, F. (2001). *El turismo de golf en la Costa del Sol. Análisis geográfico*. Biblioteca Popular Malagueña, Servicio de publicaciones de la diputación de Málaga. 299 p.
- Ewald, F. (1986). *L'État Providence*. Ed. Grasser y Fasquell, París.
- Ewald, F. (2000). *A la Poursite du risque zero*. Lasfargues, A. (Dir.), La sept arte, Image & Compagne, documental, 55 min.
- Faugeres, L. (1995). "Risques naturels, risques urbains". *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, 1995-2, pp 111-120.
- Felicísimo, A. (1994). *Modelos Digitales del Terreno*. <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli>. 122 p.
- Ferreras, C. y Fidalgo, C. (1991). *Biogeografía y Edafogeografía*. Espacios y Sociedades, Ed Síntesis, Madrid, 262 p.
- Fetter, C.W. (1993). *Contaminant Hydrogeology*. Prentice may. New York, 458 pp.
- Foster, S. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. En W. Van Duijvenbooden and H.G. Van Waegeningh (Eds), *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants*. Proceedings and information nº 38, TNO Committee on hydrological research. The Hague, pp 69-86.
- Foster, S. y Hirata, R. (1988). *Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data*. WHO-PAHO-CEPIS Technical Report (Lima-Peru) 73 p.
- Foster, S.; Hirata, R.; Gomes, D.; D'Elia, M. y Paris, M. (2001). *Groundwater quiality protection: a guide for water service companies, municipal authorities and environment agencies*. World Bank, GWMATE. Washington. 101 p.
- Fournier, E. (1979). "Objectives of volcanic monitoring and prediction". *J. Geol. Soc. London*. Vol. 136, pp 321-326.
- Freeze, R.A. y Cherry, A.J. (1979). *Groundwater*. Prentic Hall, Inc. Englewood Cliffs, 604 p.
- Galacho, B. (1996). *Urbanismo y turismo en la Costa del Sol*. Departamento de Geografía, Universidad de Málaga. 251 p.
- García Aróstegui, J.L. (1998). *Estudio hidrogeológico y modelización del acuífero de los ríos Vélez y Benamargosa (Málaga)*. Tesis Doctoral, Instituto del agua, Universidad de Granada. Vol. 1, 377 p.

- Gerba, C.P. y Keswick, B.H. (1981). "Survival and transport of enteric bacteria and viruses in groundwater". Elsevier, *Studies in Env. Sci*, 17, Amsterdam, pp 511-515.
- GHUMA (2004). *Cartografía de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos del Sur de España. Acuífero aluvial del Río Vélez y acuífero carbonatado de las Alberquillas*. Proyecto A48/02 (M): Protección de recursos hídricos en acuíferos de Andalucía y Norte de Marruecos mediante cartografía de vulnerabilidad a la contaminación. Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga. 98 p. Inédito.
- Gogu, R. y Dassargues, A. (2000). "Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overly and index methods". *Environmental Geology*, Vol. 39, N° 6, pp. 549-559.
- Goldscheider, N. (1999). Critical remarks on the applicability of EPIK under special karst conditions. *5th Management Committee and joint Working Group Meetings of the Cost Action 620: (Vulnerability and risk mapping for the protection of karst aquifers)*. St. Veit/Glan, Austria. 16 p. Inédito.
- Goldscheider, N., Klute, M., Sturm, S and Hotzl, H. (2000). "The PI method – a GIS- based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers". *Z. angew. Geol.*, 46 3, pp 157-166.
- Golwer, A. (1983). "Underground purification capacity". *International Association Hydrogeologists*. 142 (2), pp 1063-1072.
- Golwer, A y Schneider, W. (1973). "Belastung des Bodens und des unterirdischen Wassers durch Strassenvenkehr". *Gas und Wasserfach*, 114, München, pp154-165.
- González, L. (1987). La importancia socioeconómica de los riesgos geológicos en España. *Curso de riesgos geológicos*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, pp 21-34.
- González, R. y Ramírez, F. (1998). Las grandes cavidades de Andalucía. Historia de sus exploraciones. En J.J. Durán y J. López (Eds), *El karst en Andalucía*. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid, pp 31-39.
- Gunn, J. y Hobbs, S. (1999). Limestone quarrying: hydrogeological impacts, consequences, implications. En D. Drew y H. Hötzl (eds), *Karst Hydrogeology and human activities. Impacts consequences and implications*. International contributions to Hydrogeology nº 20. Balkema/Rotterdam/Brookfield. pp 192-200.
- Helm, P. (1996). *Integrated risk management for natural and thecnological disasters*. Tephra 15, nº 1 Junio. Ministerio de Defensa Civil de Nueva Zelanda.
- Hess, J.W. y Slattery, L.D. (1999). Overview of extractive industries impact. En D. Drew y H. Hötzl (eds), *Karst Hydrogeology and human activities. Impacts consequences and implications*. International contributions to Hydrogeology nº 20. Balkema/Rotterdam/Brookfield. pp 187-192.
- Hoffmann, G. (1987). "Pliocene stratigraphy and coastlines at mediterranean coast of Andalucía (SE, Spain)". *Trabajos sobre Neógeno-Cuaternario*, 10, 153-158.
- Hötzl, H. (1999). General problems due to human settlements in karst areas. En D. Drew y H. Hötzl (eds), *Karst Hydrogeology and human activities. Impacts consequences and*

- implications. International contributions to Hydrogeology n° 20. Balkema/Rotterdam/Brookfield. pp 81-82.
- Hötzl, H. (2004). Assessment concept. En F. Zwahlen (ed), *Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers*. Informe final de la Acción COST 620, eur 20912, European Commission, Directorate General for Research, Luxembourg, pp 108-112.
- Hötzl, H.; Delporte, C.; Liesch, T.; Mailk, P.; Neukum, C. y Svasta, J. (2004). Risk mapping. En F. Zwahlen (ed) *Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers*. Informe final de la Acción COST 620, EUR 20912, European Commission, Directorate General for Research, Luxembourg, pp 113-120.
- Hötzl, H. y Neukum, C. (2004). Hazard mapping and risk assessment of karst aquifers – A Pan-European approach. En A.J. Witkowski, J. Vrba y A. Kowalczyk (Eds), *Groundwater vulnerability assessment and mapping*. Abstracts of International conference, University of Silesia, Ustron, Polonia, pp 68-70.
- Hewitt, K. (1997). *Regions at risk. A geographical introduction to disasters*. Londres, Longman.
- IGME (1984). *Estudios de investigación hidrogeológica para la regulación de los recursos hídricos subterráneos de la divisoria Guadalete-Guadiaro*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- INE (2004). *Censo de población del año 2001*. Escala inframunicipal. www.ine.es
- ITGE (1987). *Memoria del mapa geológico de España a escala 1/50.000. Hoja 1064, Cortes de la Frontera*. Instituto tecnológico y geominero de España, Madrid.
- ITGE (1991). *Memoria del mapa geológico de España a escala 1/50.000. Hoja 1050, Ubrique*. Instituto tecnológico y geominero de España, Madrid.
- Johansson, P y Hirata, R. (2002). Rating of groundwater contamination sources. En A. Zaporozec (Ed), *Groundwater contamination inventory. A methodological guide*. IHP-VI, series on groundwater, N° 2, UNESCO. pp 63-74.
- Jones, E. L. (1990). *El milagro europeo. Entorno, economía y geopolítica en la historia de Europa y Asia*. Ed. Alianza, Madrid.
- Justicia, A. (1988). *La Axarquía malagueña y la costa oriental: dos espacios agrarios contrapuestos*. Ed. Arguval, 362 pp.
- Kasperson, R. (1992). "The social amplification of risk: progress in developing an integrative framework". Krimsky y D. Golding (comps.), *Social Theories of Risk*. Praeger, Westport, CT, pp 153-178.
- Kates, R. (1979). *Risk assessment of environmental hazard*, John Wiley & Sons, New York, 122 p.
- Kates, R. (1985). The interaction of climate and society. En R. Kates, J.H. Ausubel y M. Berberian (Eds), *Climate impact assessment*, SCOPE 27, Wiley, New York, pp 3-36.
- Kervern, G. y Rubise, P. (1991). *L'archipel du danger. Introduction aux cindyniques*. Económica. París.
- Kirby, A. (comp.) (1990). *Nothing to Fear: Risks and Hazards in American Society*. University of Arizona Press, Tucson.

- Kresic, N.; Golubovic, R. y Papic, P. (1999). Effects of air pollution. En D. Drew y H. Hötzl (eds), *Karst Hydrogeology and human activities. Impacts consequences and implications*. International contributions to Hydrogeology nº 20. Balkema/Rotterdam/Brookfield. pp 83-87.
- Krimsky, S y Golding, D. (comps.) (1992). *Social Theories of Risk*. Westport, CT, Praeger.
- Langlade, J.R. (2004). *Analyse-diagnostic de l'agriculture de l'Axarquia (Andalousie)*. Memoria para la obtención del Diploma en Ingeniería Agrónoma. Institut National Agronomique Paris-Grignon, Université Paris X – Nanterre. 106 p.
- Larrubia, R. (1998). *La agricultura en Málaga a finales del siglo XX: nuevas orientaciones productivas*. Servicio de publicaciones e intercambio científico de la Universidad de Málaga. 237 p.
- Lavigne, F. (1999). "SIG et zonage des risques volcaniques: application au volcan Merapi, Java, Indonésie", *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, 199-4, pp. 371-382.
- Lhénaff, R. (1998). Los poljes de Andalucía. En J.J. Durán y J. López (Eds), *El karst en Andalucía*. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid, pp 55-58.
- Leone, F.; Aste, J.P. y Velasquez, E. (1995). "Contribution des constats d'endommagement au développement d'une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité appliquée aux phénomènes de mouvements de terrain", *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, 1995-4, pp. 350-371.
- Liesch, T. y Hötzl, H. (2004). Assessment of groundwater risk using neural networks. En A.J. Witkowski, J. Vrba y A. Kowalczyk, (Eds), *Groundwater vulnerability assessment and mapping*. Abstracts of International conference, University of Silesia, Ustron, Polonia, pp 85-88.
- Liverman, D. (1986). "The vulnerability of urban areas of technological risks". *Cities*, pp 142-147.
- Liverman, D. (1990). Vulnerability to global environmental change. En Kasperson, R.E., Dow, K., Golding, D. y Kasperson, J.X. (eds), *Understanding global environmental change: the contributions of risk analysis and management*. The Earth Transformed Program, Worcester, MA: Clark University, pp 27-44.
- Longo, C. A. (2000). *La vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero kárstico de la sierra de Líbar (Cordillera Bética-Sur de España)*. Proyecto fin de carrera, Universidad de Trieste. Inédito, Málaga, 85 p.
- Longo, A; Andreo, B; Carrasco, F; Cucchi, F; Vías, J. and Jiménez, P. (2001). Comparison of two contamination vulnerability maps obtained by the SINTACS method in two carbonate aquifers (S Spain). *7th Conference on limestone hydrology and fissured media*. Besançon, Francia. pp 233-236.
- Lozano, C.; Cigüenza, R.; García, T. y Montero, E. (1989). *Enfermedades infecciosas e intoxicaciones*. Luzan 5 S.A. Ediciones. 416 p.
- Lundgren, L. (1986). *Environmental Geology*. Prentice Hall, New York, 576 p.
- Machuca, L. (coord.) (1989). *Atlas hidrogeológico de la provincia de Málaga*. Diputación provincial de Málaga, Servicio de Arquitectura, urbanismo y Ordenación del Territorio. 152 p.

- Marcos, O. (2000). "El Niño 1997-98 en los medios de comunicación: realidades, deformaciones y exageraciones de un evento climático", *Investigaciones Geográficas*, 23, pp. 119-130.
- Margat, J. (1968). *Vulnerabilité des nappes d'eau souterraine á la pollution. Bases de la cartographie*. (Doc.) BRGM, 68 SGL 198 HYD, Orléans.
- Marston, S. (1983). "Natural hazards research: towards a political economy perspective". *Political Geography Quarterly*, 2, (1), pp 346-349.
- Martín, A. J. (1984). *Riesgo Sísmico en la Península Ibérica*. Instituto Geográfico Nacional, Madrid.
- Martín, A. (1987). *Evolución geológica alpina del contacto entre las Zonas Internas y Zonas Externas de la Cordillera Bética*. Tesis doctoral, Universidad de Granada.
- Mathess, G. (1974). "Heavy metals as trace constituents I natural and polluted groundwater". *Geologie en Mijnbouw*, 53, pp 145-155.
- Mathess, G y Harvey, J.C. (1982). *Properties of groundwater*. John Wiley & Sons.
- Mathess, G. y Miller, J. (1994). Chemical and biological contaminants and their subsurface behavior. En Vrba, J. y Zaporozec, A. (Eds), *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*. International contributions to hydrogeology, Vol 16, Verlag Heinz Heise. Hannover, pp 9-20.
- Máyer, P. (2000). *Riesgos asociados a episodios de lluvia intensa en la ciudad de Las Palmas de Gran Canaria (1869-1999)*. Tesis de Licenciatura. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Mitchell, J.K. (1989). Hazards research. En G.L. Gaile y C.J. Willmot (Eds), *Geography in American Columbus*. OH: Merrill, pp 410-424.
- Mitchell, J.K. (1990). Human dimensions of environmental hazards, complexity, disparity and the search for guidance. En A. Kirby (Ed), *Nothing to fear*. University of Arizona Press, Tucson. 131-175 pp.
- Mitchell, J.; Devine, N. y Jagger, K. (1989). "A contextual model of natural hazard" *Geographical Review*, 79 (4), pp 391-409.
- Monterde, M. (1999). *Cartografía de los riesgos, vulnerabilidad y protección de los sistemas kársticos de Uelhs deth Joéu y Aigüeira (Pirineos Centrales)*. Memoria de licenciatura, Universidad Autónoma de Barcelona, Inédita, 163 p.
- Morris, B. y Foster, S. (2000). "Cryptosporidium Contamination Hazard Assessment and Risk Management for British Groundwater Sources". *Water Science and Technology*, Vol 41 N° 7 pp 67-77.
- Mugerza, 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, Universidad del País Vasco, 406 p.
- Olcina, J. y Ayala, F. (2002). Riesgos naturales. Conceptos fundamentales y clasificación. En F.J. Ayala y J. Olcina (eds.), *Riesgos naturales*. Ariel, Barcelona, pp 41-73.

- Olcina, J., Ayala, F.J., Miró, J. y Pérez, A. (2002). Relación de catástrofes naturales más importantes acontecidas en el mundo desde 1900 hasta la actualidad. En F.J. Ayala y J. Olcina (eds.), *Riesgos naturales*. Ariel, Barcelona, pp 1431-1474.
- Olmer, M. y Rezac, B. (1974). Methodical principles of maps for protection of groundwater in Bohemia and Moravia, Scale 1:200.000. *Memories Congress de Montpellier*, International Association Hydrogeologists, Tome X, pp 105-107.
- O'riordan, T. (1986). Coping with environmental hazards. En R. Kates y I. Burton (Eds), *Geography, Resources, and Environment*. Vol. II, Themes from the work of Gilbert F. White, University of Chicago Press, Chicago, pp 272-309.
- Ortega, F. (1991). Incertidumbre y riesgos naturales. *Sociedad y Territorio*, Actas XII Congreso Nacional de Geografía, A.G.E., segunda ponencia, Valencia, pp 101-108.
- Ortega, J. (2000). *Los horizontes de la geografía. Teoría de la Geografía*. Ed. Ariel, Barcelona. 604 p.
- Palm, R. I. (1990). *Natural hazards. An integrative framework for research and planning*. The Johns Hopkins, University Press, Baltimore.
- Panizza, M. (1988). *Geomorfologia applicata. Metodi di applicazione alla pianificazione territoriale e alla valutazione d'impatto ambientale*. La nuova Italia Científica, Roma, 339 p.
- Peet, R. (1985). "The social origins of environmental determinism". *Annals of The Association of American Geographers*, 75, pp 309-333.
- Pellicer, F. (1997). El lenguaje cartográfico. En J.L. Peña (Ed). *Cartografía geomorfológica básica y aplicada*. Geoforma Ediciones, Logroño, pp 67-84.
- Pelling, M. (2001). Natural disaster? En N. Castree y B. Braun (eds), *Social nature. Theory, practice and politics*. Ed Blackwell, Oxford, pp 170-188.
- Perles, M.J. y Vías, J.M. (2001). Problemas asociados a la cartografía de riesgo como instrumento para la ordenación. *Forma y función del territorio en el nuevo siglo*. Actas del XVII Congreso de Geógrafos Españoles, Oviedo, España, pp 194-198.
- Perles (2002). Contexto y antecedentes del estudio de los riesgos y la evaluación de impacto ambiental. *Proyecto Docente*, Universidad de Málaga. Inédito, pp 125-163.
- Perles, M.J. (2004). "Evolución histórica de los estudios sobre riesgos. Propuestas temáticas y metodológicas para la mejora del análisis y gestión del riesgo desde una perspectiva geográfica". *Baetica*, Málaga, pp 103-127.
- Perles, M.J.; Vías, J.M. y Andreo, B. (2004). Cartografía de vulnerabilidad y riesgo de contaminación en acuíferos carbonáticos. En B. Andreo y J.J. Durán (eds), *investigaciones en sistemas kársticos españoles*. Contribución española al Proyecto 448 del PICG de la UNESCO, Correlación Mundial de Ecosistemas Kársticos. IGME, Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas nº 12. pp 247-273
- Phlipponneau, M. (2001). *Geografía Aplicada*. Ariel, Barcelona, 320 p.
- Piedrola, G. (coord.). (1992). *Medicina preventiva y salud pública*. Masson-Salvat, Ediciones científicas y técnicas S.A., 9ª edición, reimpresión. 1476 p.

- Piedrola, G. (1992). Salud en la tercera edad: problemas y soluciones. En G. Piedrola (coord.). *Medicina preventiva y salud pública*. Masson-Salvat, Ediciones científicas y técnicas S.A., 9ª edición, reimpresión. pp 1163-1175.
- Pita, M. F. (coord.) (1999). *Riesgos catastróficos y ordenación del territorio en Andalucía*. Consejería de Obras Públicas y Transportes, Junta de Andalucía, Sevilla, 225 p.
- PYCSA (1994). *Catálogo general de comunidades de regantes*. Centro de publicaciones de la Secretaría General Técnica. Ministerio de Obras Públicas y Transporte y Ministerio de Medio Ambiente. Serie monografías. 575 p.
- Rahn (1986). *Engineering Geology. An environmental approach*. Elsevier, New York, 589 p.
- Ramos, R. (2000). Prometeo y las flores del mal. El problema del riesgo en la sociología contemporánea. Perspectivas sociológicas y principio de precaución. Conferencia virtual sobre *Teoría y práctica de las Ciencias Sociales en situaciones de riesgos catastróficos*. Dirección General de Protección Civil de España. Centro Europeo de Investigación Social de Situaciones de Emergencia (CEISE). 12 pp.
- Raucher, R.L. (1983). "A conceptual framework for measuring the benefits of groundwater protection". *Water Resources Research*, 19, pp 320-326.
- Rey, J. (1992). Salud de la adolescencia. En G. Piedrola (coord.). *Medicina preventiva y salud pública*. Masson-Salvat, Ediciones científicas y técnicas S.A., 9ª edición, reimpresión. pp 1139-1147.
- Ribas, A. y Saurí, D. (1996). "El estudio de las inundaciones históricas desde un enfoque contextual. Una aplicación a la ciudad de Girona". *Papeles de Geografía*, nº 23-24, pp 229-244.
- Robins, N.; Adams, B.; Foster, S. y Palmer, R. (1994). "Groundwater vulnerability mapping: The British perspective". *Hydrogeologie*, nº 3, pp 35-42.
- Rowe, W. (1977). *An anatomy of risk*, John Wiley & Sons, New Jersey, 488 p.
- Sánchez, A.; Varela, M.; Arenillas, M. y Gutiérrez, F. (1998). *Las unidades hidrogeológicas de las sierras de Líbar (00.06) y Grazalema (05.64)*. Ministerio de Medio Ambiente, Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. 52 p.
- Saurí, D. (1988). "Cambio y continuidad en la Geografía de los Riesgos naturales: la aportación de la Geografía Radical". *Estudios Geográficos*, nº 191, pp 257-270.
- Saurí, D. y Ribas, A. (1994). "El análisis del riesgo de avenida en las escuelas geográficas anglosajona, francesa y española". *Estudios Geográficos*, Tomo LV, nº 216, pp 481-502.
- Saurí, D.; Duch, J.; Arbués, C. y Jiménez, C. (2002). *Estudi de la vulnerabilitat del patrimoni cultural a les inundacions de la conca del riu Llobregat*. Agencia catalana del agua. Barcelona.
- Saurí, D. (2004). Tendencias recientes en el análisis geográfico de los riesgos ambientales. En *los procesos de riesgo con origen natural: una constante en la relación hombre-medio*. Áreas, nº 23, monográfico Universidad de Murcia, Murcia.
- Senciales, J.M. (1995). *La cuenca del río Vélez. Estudio hidrográfico*. Tesis Doctoral, Universidad de Málaga. Málaga. 408 p.

- SET (2002). *Plan General de Aforos 2001*. Dirección General de Carreteras, Consejería de Obras Públicas y Transportes, Junta de Andalucía. CD-ROM.
- Shechter, M. (1987). "Economic aspects in the investigation of groundwater contamination episodes". *Groundwater*, 23, pp 190-197.
- Schubart, H. (1991). Investigaciones geológicas y arqueológicas sobre la relación costera entre los asentamientos fenicios en la Andalucía mediterránea. *Jornadas de Arqueología Fenicio-Púnica del museo Arqueológico de Ibiza*, 24, 59-64
- Sinreich, M.; Kozel, R. y Mudry, J. (2004). Principles of specific vulnerability assessment. En F. Zwahlen (ed), *Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers*. Informe final de la Acción COST 620, EUR 20912, European Commission, Directorate General for Research, Luxembourg, pp 25-29.
- Smith, N. (1984). *Uneven development*. Oxford, Basil Blackwell.
- Smith, K. (1992). *Environmental hazards: assessing risk and reducing disaster*. London and New York Routledge, 324 p.
- Sotornikova, R. y Vrba, J. (1987). Some remarks on the concept of vulnerability maps. En W. Van Duijvenbooden y H.G. Van Waegeningh (Eds), *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants*. Proceedings and information n° 38, TNO Committee on hydrological research. The Hague, pp 471-475.
- Susman, P.; O'keefe, P. y Wisner, B. (1983). Global disaster, a radical interpretation. En Hewitt, K. (Ed). *Interpretations of calamity from the viewpoint of human ecology*, Allen and Unwin, Boston, pp 263-283.
- Timmerman, P. (1981). *Vulnerability, resilience and the collapse of society*. Environmental monograph 1, Institute for environmental studies, Toronto.
- Tobin, G. y Montz, B. (1997). *Natural Hazards. Explanation and Integration*. The Guilford Press. New York. 388 p.
- Todd, D.K. (1980). *Groundwater Hydrology*. John Wiley & Sons.
- Tomlin, D. (1990). *Geographic Information Systems and Cartographic Modelling*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- Udias, A. y Mezcuá, J. (1986). *Introducción a la Geofísica*. Ed. Alhambra, Madrid.
- UNDRO (1982). *Natural disasters and vulnerability analysis*. Office of the United Nations Disasters Relief Co-ordinator, Geneva.
- USGS (1977). *Proposed procedures for dealing with warning and preparedness for geologic related hazards*. United States Federal Register, vol 42, n° 70, pp 19292-96
- Vadillo, I. (2003). *La contaminación por lixiviados de vertederos de residuos sólidos urbanos en acuíferos carbonatados. El vertedero de la Mina (Marbella, Málaga)*. Tesis Doctoral, Universidad de Málaga, Inédita, 120 p.
- Van Dissen, R. y Mcverry, G. (1994). Earthquake hazard and risk in New Zealand. En A.G. Hull y R. Coory (Eds), *Proceedings of the Natural Hazards Management Workshop*, Wellington. Institute of Geological and Nuclear Sciences Information Series 31, pp 67-71.

- Van Stempvoort, D.; Ewert, L. y Wassenaar, L. (1993). "Aquifer vulnerability index (AVI). A GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping". *Canadian water resources journal*, 18, pp 25-37.
- Varnes, D.J. (1984). "Landslide hazard zonation: a review of principles and practice". *Natural Hazards*, nº 3, UNESCO, 63 p.
- Vías, J.M.; Perles, M.J.; Andreo, B. y Carrasco, F. (1999). "Aplicación del método DRASTIC para la cartografía de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero carbonatado de Torremolinos (Málaga)". *Geogaceta* nº 27 pp 179-182.
- Vías, J.M. (2000). *Evaluación y cartografía de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero carbonatado de Torremolinos (Málaga)*. Memoria de licenciatura, Universidad de Málaga, 160 p.
- 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. En L. Ribeiro (Ed), *Future Groundwater Resources at Risk*. Proceedings 3rd International conference on groundwater. Lisboa, Portugal, pp 113-124.
- 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 F. Carrasco, J.J. Durán y B.Andreo (Eds.), *Karst and Environment*. Fundación Cueva de Nerja, Málaga, pp 75-83.
- Vías, J.M. y Galacho, F.B. (2003). Aportaciones de los Modelos Digitales del Terreno (MDT) a la cartografía de vulnerabilidad de acuíferos y riesgo de contaminación de aguas subterráneas. *De lo local a lo global. Nuevas tecnologías de la información geográfica para el desarrollo*, VII Congreso Nacional de la AESIG, Cáceres, 15 p.
- Vías, J.M.; Andreo, B. y Perles, M.J. (2005). "A comparative study of four schemes for groundwater vulnerability mapping in a diffuse flow carbonate aquifer under Mediterranean climatic conditions. *Environmental Geology*, Vol 47, Nº 4, pp 586-595.
- Villusem, A.; Jacobsen, O.S. y Sonderskov, C. (1983). Mapping the vulnerability of groundwater reservoirs with regard to surface pollution. *Geological Survey of Denmark, Yearbook 1982*, Copenhagen, pp17-38.
- Vladimirkij, V.J. (1960). "O zadachakh gidrogeologov v svyazi kontrolem za ispolzovaniyem i okhranoi podzemnykh vod". *Razvedka i okhrana* ndr 26/11, Moscow, pp 34-37.
- Voogd, H. (1983). *Multicriteria evaluation for urban and regional planning*. Pion, Londres.
- Vrba, J. y Civita, M. (1994). Assessment of groundwater vulnerability. En Vrba, J. y Zaporozec, A. (Eds), *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*. International contributions to hydrogeology, Vol 16, Verlag Heinz Heise, Hannover, pp 31-48.
- Watts, M. (1983). The poverty theory. Natural hazards research in context. En Hewitt (Ed), *Interpretations of calamity*. Allen and Unwin, Boston.
- White, G. (1975). "La investigación de los riesgos naturales". *Nuevas tendencias en Geografía*, Instituto de Estudios de Administración local, Madrid.
- Wicks, C. y Groves, C. (1993). "Acidic mines drainage in carbonate terrains: geochemical processes and rates of calcite dissolution". *Journal of Hydrogeology* 146, 13-27.

- Wrigley, J. y Tromp, F. (1995). Risk management of major hazards in Hong Kong. En Melcher y Stewart (eds), *Integrated Risk Management*. Balkema, Rotterdam, 37-41.
- Zaporožec, A. (1985). Hydrogeologic mapping for groundwater protection. En J.E. Moore (Ed), *Recent advances in groundwater hydrology*. American Institute of Hydrology, Minneapolis, MN, pp 588-597.
- Zaporožec, A. (1994). Concept of groundwater vulnerability. En Vrba, J. y Zaporožec, A. (Eds), *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*. International contributions to hydrogeology, Vol 16, Verlag Heinz Heise, Hannover, pp 3-8.
- Zaporožec, A. (1999). Advances in contamination studies and remediation of groundwater. En M. Fendeková y M. Fendek (Eds), *Hydrogeology and land use management*. Proceedings of XXIX IAH Congress, Bratislava, pp 581-586.
- Zojer, H. (1999). Impacts from tourism. En D. Drew y H. Hötzl (eds), *Karst Hydrogeology and human activities. Impacts consequences and implications*. International contributions to Hydrogeology n° 20. Balkema/Rotterdam/Brookfield. pp 124-135.

*DESARROLLO METODOLÓGICO PARA LA ESTIMACIÓN Y CARTOGRAFÍA DEL RIESGO DE
CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS MEDIANTE SIG
APLICACIÓN EN ACUÍFEROS DEL SUR DE ESPAÑA.*



JESÚS M^a VÍAS MARTÍNEZ

TESIS DOCTORAL

ANEXO METODOLÓGICO Y CARTOGRÁFICO



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

María Jesús Perles Roselló, Profesora Titular de Geografía Física en el Departamento de Geografía de la Universidad de Málaga, y Bartolomé Andreo Navarro, Profesor Titular de Geodinámica Externa en el Departamento de Ecología y Geología de la Universidad de Málaga, codirectores de la tesis doctoral presentada por Jesús M^a Vías Martínez para su defensa y lectura en la Universidad de Málaga con el título de “Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España”, HACEN CONSTAR, que dicha tesis reúne las condiciones necesarias para ser defendida por el tribunal que se designe.

En Málaga, a 29 de Marzo de 2005

Fdo. María Jesús Perles Roselló

Fdo. Bartolomé Andreo Navarro

- **Metodologías**

- **Esquema 1: método DRASTIC**
- **Esquema 2: método GOD**
- **Esquema 3: método AVI**
- **Esquema 4: método EPIK**
- **Esquema 5: método COP**

- **Cartografías**

- **Mapa 1L.** Peligro de contaminación de aguas subterráneas. Acuífero de la sierra de Líbar
- **Mapa 2L.** Vulnerabilidad intrínseca según el método DRASTIC. Acuífero de la sierra de Líbar
- **Mapa 3L.** Vulnerabilidad intrínseca según el método GOD. Acuífero de la sierra de Líbar
- **Mapa 4L.** Vulnerabilidad intrínseca según el método AVI. Acuífero de la sierra de Líbar
- **Mapa 5L.** Vulnerabilidad intrínseca según el método EPIK. Acuífero de la sierra de Líbar
- **Mapa 6L.** Vulnerabilidad intrínseca según el método COP. Acuífero de la sierra de Líbar
- **Mapa 7L.** Vulnerabilidad de la población. Acuífero de la sierra de Líbar
- **Mapa 8L.** Vulnerabilidad de la actividad productiva: ganadería. Acuífero de la sierra de Líbar
- **Mapa 9L.** Vulnerabilidad de la actividad productiva: hostelería y otros. Acuífero de la sierra de Líbar
- **Mapa 10L.** Riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Acuífero de la sierra de Líbar

- **Mapa 1M.** Peligro de contaminación de aguas subterráneas. Acuífero de la sierra de Mijas
- **Mapa 2M.** Vulnerabilidad intrínseca según el método DRASTIC. Acuífero de la sierra de Mijas
- **Mapa 3M.** Vulnerabilidad intrínseca según el método GOD. Acuífero de la sierra de Mijas
- **Mapa 4M.** Vulnerabilidad intrínseca según el método AVI. Acuífero de la sierra de Mijas
- **Mapa 5M.** Vulnerabilidad intrínseca según el método EPIK. Acuífero de la sierra de Mijas
- **Mapa 6M.** Vulnerabilidad intrínseca según el método COP. Acuífero de la sierra de Mijas
- **Mapa 7M.** Vulnerabilidad de la población. Acuífero de la sierra de Mijas
- **Mapa 8M.** Vulnerabilidad de la actividad productiva: agricultura. Acuífero de la sierra de Mijas
- **Mapa 9M.** Vulnerabilidad de la actividad productiva: hostelería y otros. Acuífero de la sierra de Mijas
- **Mapa 10M.** Riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Acuífero de la sierra de Mijas

- **Mapa 1V.** Peligro de contaminación de aguas subterráneas. Acuífero del río Vélez
- **Mapa 2V.** Vulnerabilidad intrínseca según el método DRASTIC. Acuífero del río Vélez
- **Mapa 3V.** Vulnerabilidad intrínseca según el método GOD. Acuífero del río Vélez
- **Mapa 4V.** Vulnerabilidad intrínseca según el método AVI. Acuífero del río Vélez
- **Mapa 5V.** Vulnerabilidad de la población. Acuífero del río Vélez
- **Mapa 6V.** Vulnerabilidad de la actividad productiva: agricultura. Acuífero del río Vélez
- **Mapa 7V.** Vulnerabilidad de la actividad productiva: hostelería y otros. Acuífero del río Vélez
- **Mapa 8V.** Riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Acuífero del río Vélez

Variable, coeficiente de ponderación (W), unidad de medida y valores							Puntuación o valor típico (R)
D Profundidad del agua subterránea (W: 5, 5) m*	R Recarga (W: 4, 4) mm*	A Zona saturada (W: 3, 3)	S Suelo (W: 2, 5)	T Pendiente (W: 1, 3) %	I Zona no saturada (W: 5, 4)	C Conductividad hidráulica (W: 3, 2) m/día*	
≤ 1		Caliza karstificada (9-10)	Delgado o ausente y gravas	0 - 2	Caliza karstificada (8-10)	> 80	10
1 - 5	> 250	Basalto (2-10)	Arena	2 - 6	Basalto (2-10)		9
	180 - 250	Arena y grava (4-9)	Turba		Arena y grava (6-9)	40 - 80	8
5 - 10			Arcilla con agregados				7
	100 - 180	Caliza y/o arenisca masiva (4-9) y alternancia de esquistos-calizas-areniscas (5-9)	Franco arenoso		Calizas (2-7), Areniscas (4-8), alternancia de esquistos-calizas-areniscas (4-8) y arena y grava con limo y arcilla (4-8)	25 - 40	6
10 - 15		Till Glaciar (4-6)	Franco	6 - 12			5
		Igneas y/o Metamórficas meteorizadas (3-5)	Franco limosa		Ígneas y/o Metamórficas (2-8)	10 - 25	4
15 - 25	50 - 100	Igneas y Metamórficas (2-5)	Franco arcilloso	12 - 18	Esquisto (2-5), Limo/Arcilla (2-6)		3
25 - 30		Esquistos masivos (1-3)	Fango			0.1 - 10	2
> 30	0 - 50		Arcilla sin agregados	>18	Capa confinante	0 - 0.1	1

$$\text{Índice} = \sum_{j=1}^7 W_j \times R_j$$

Intervalos del índice de vulnerabilidad DRASTIC	Grado de vulnerabilidad según DRASTIC
≥ 200	Mayor
180 - 200	
160 - 180	
140 - 160	Intermedio
120 - 140	
100 - 120	
80 - 100	Menor
< 80	

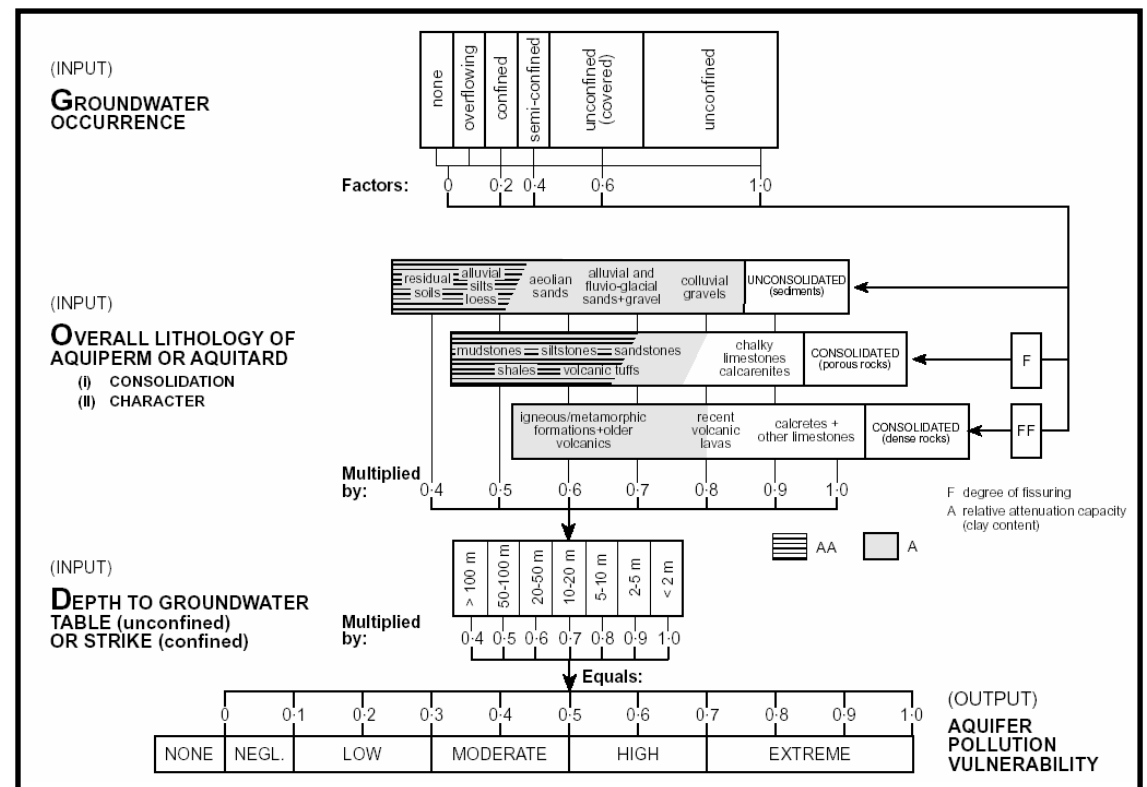
Esquema 1. Sistema de evaluación de la vulnerabilidad intrínseca mediante el método DRASTIC. Leyenda: * = valores expresados en unidades de medida normalmente utilizadas en Europa. Coeficientes de conversión tomados de Freeze y Cherry (1979).

$$\text{Índice} = \sum_{i=1}^n \frac{d_i(m)}{k_i(m/día)}$$

$i =$ cada una de las capas de la zona no saturada

Intervalos del índice de vulnerabilidad AVI	Clase de vulnerabilidad
< 10	Muy Alta
10 - 100	Alta
100 - 1000	Moderada
1000 - 10000	Baja
≥ 10000	Muy Baja

Esquema 3. Sistema de evaluación de la vulnerabilidad intrínseca mediante el método AVI.



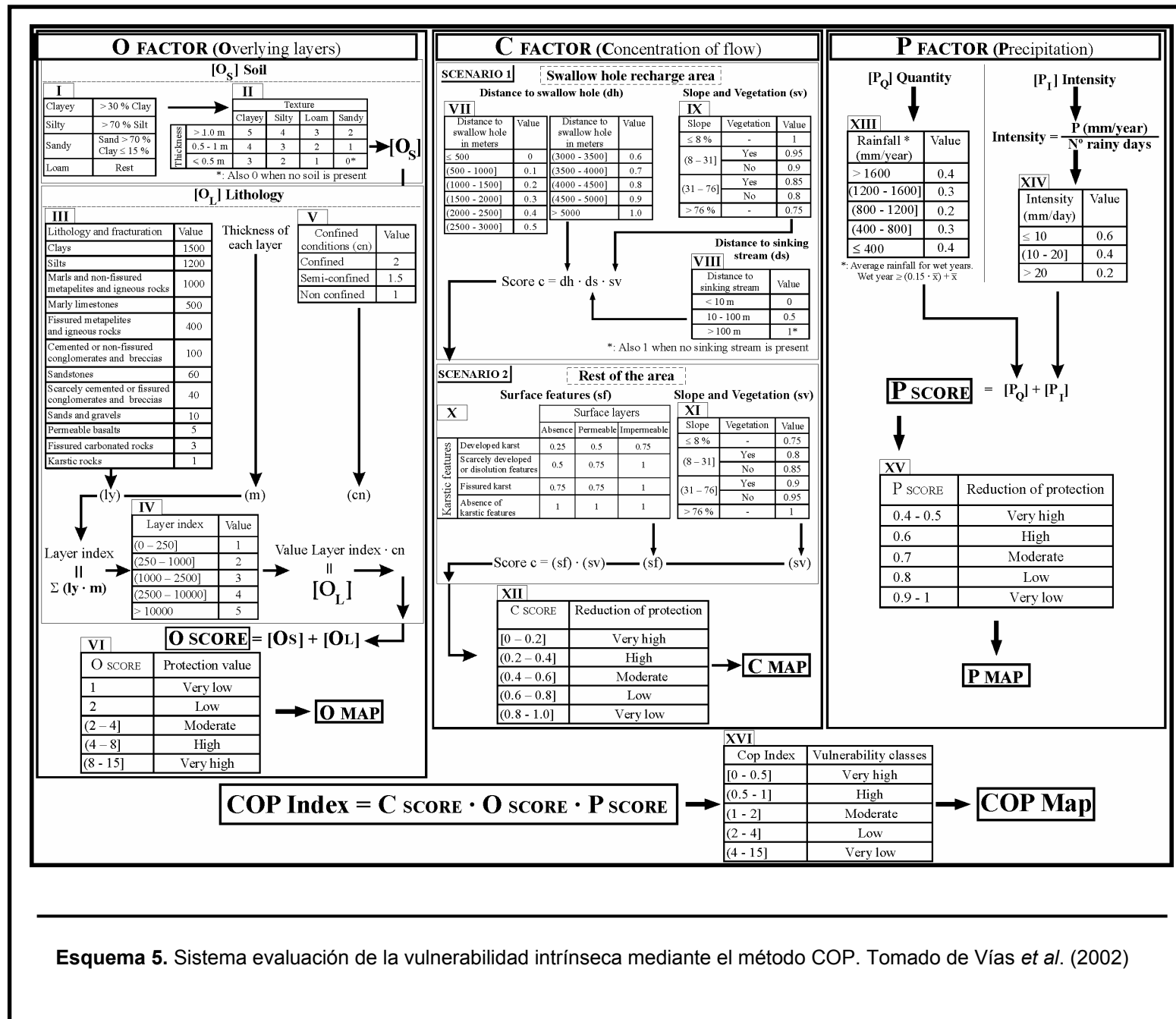
Esquema 2. Sistema evaluación de la vulnerabilidad intrínseca mediante el método GOD (Tomado de Foster y Hirata, 1988).

Variable, coeficiente de ponderación (W) y valores				Puntuación o valor típico (R)
E Epikarst (W: 3)	P Capa protectora (W: 1)	I Condiciones de infiltración (W: 3)	K Red kárstica (W: 1)	
Sumideros, dolinas, lapiazes, afloramientos con intensa fracturación	< 20 cm suelo	En el interior de la cuenca vertiente a un sumidero: arroyos perdedores (temporales o perennes), cauces y riberas de arroyos, curso de agua que alimenta un sumidero o una dolina, arroyos perdedores, drenes artificiales	Red kárstica bien desarrollada: conductos de tamaño decimétrico a métrico, bien conectados y raramente obstruidos	1
	20 - 100 cm suelo	En el interior de la cuenca vertiente a un sumidero: Sectores no drenados de la cuenca cuya pendiente es mayor de 10% para zonas cultivadas y mayor del 25% para praderas y pastizales	Red kárstica pobremente desarrollada: drenes decimétricos o de inferior tamaño, poco conectados u obstruidos	2
Zonas intermedias entre alineamientos de dolinas; valles secos	> 100 cm suelo	- En el interior de la cuenca vertiente a un sumidero: sectores no drenados de la cuenca cuya pendiente es menor del 10% para zonas de cultivos y menor de 25% para pastos y praderas. - Fuera de la cuenca vertiente a un sumidero: sectores no drenados de la cuenca cuya pendiente es superior al 10% para zonas cultivadas y mayores del 25% para praderas y pastizales	Acuífero fisurado, no karstificado	3
Resto de la cuenca de alimentación	> 100 cm de suelo con una formación geológica de baja permeabilidad	Resto de la cuenca no vertiente a un arroyo que alimenta un sumidero		4

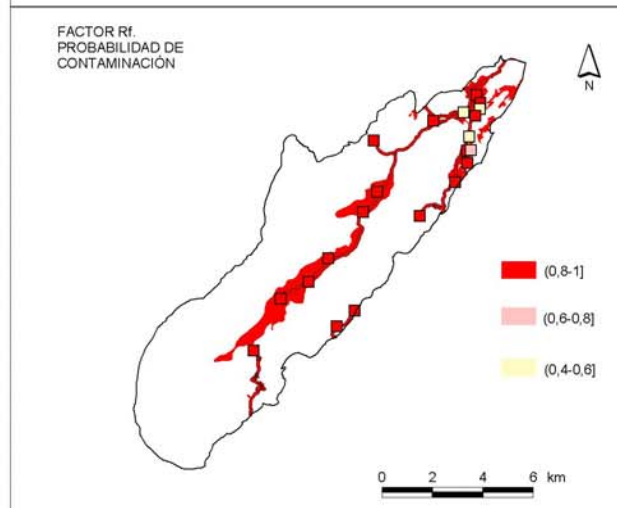
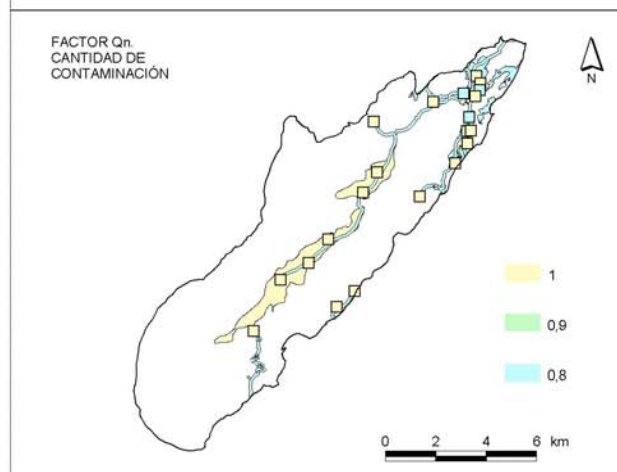
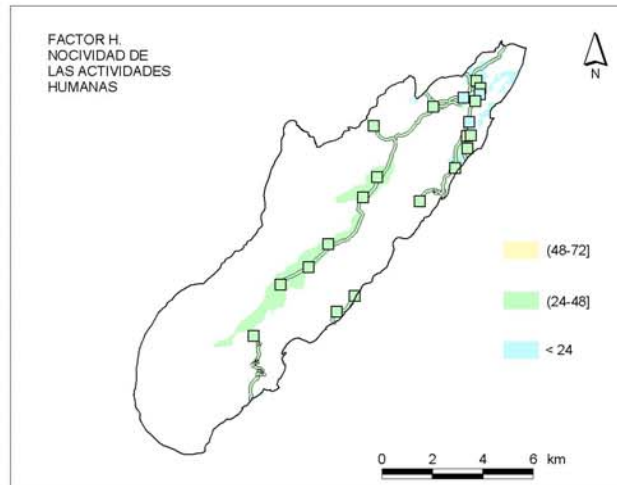
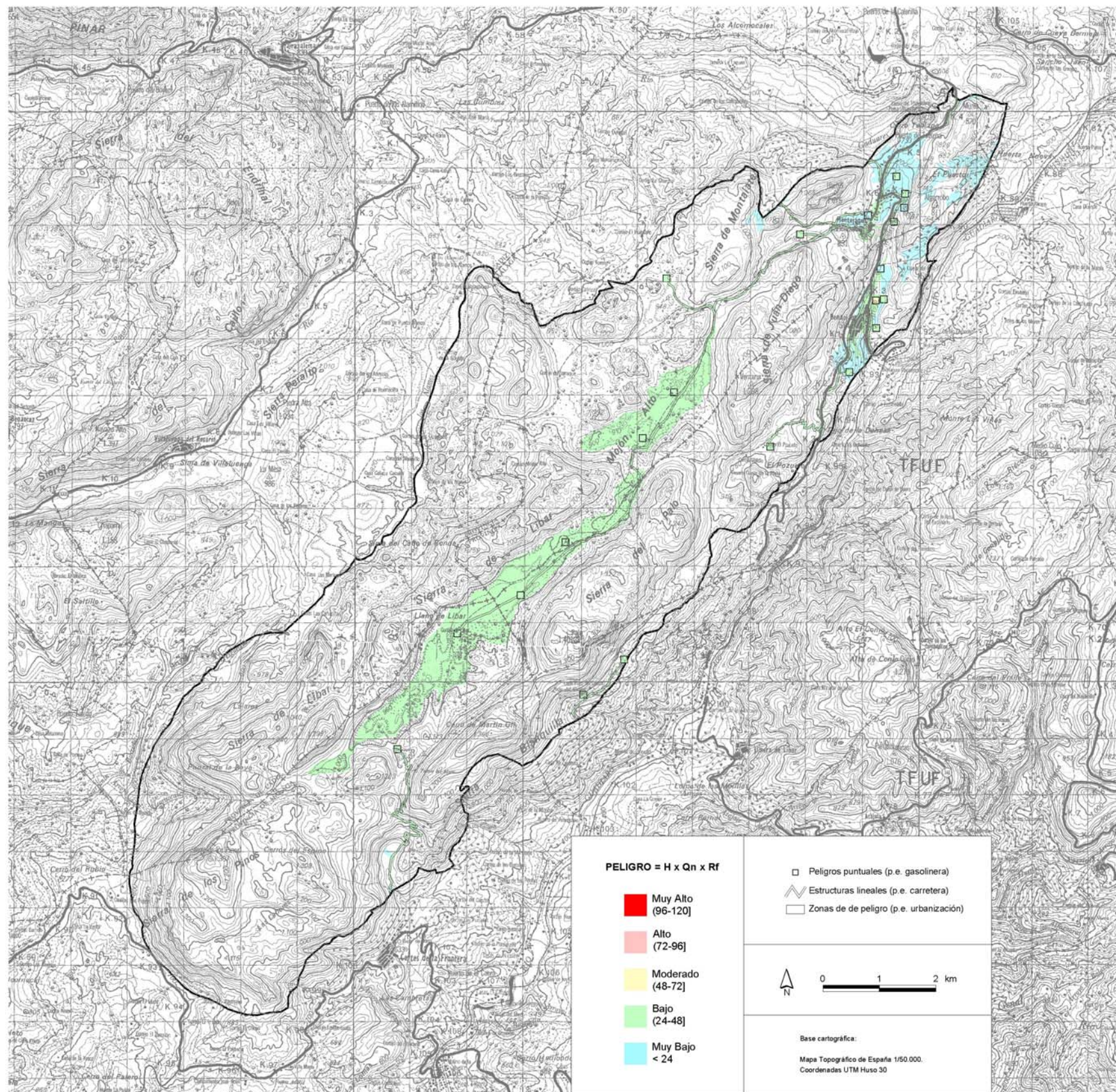
$$\text{Índice} = \sum_{i=1}^4 W_i \times R_i$$

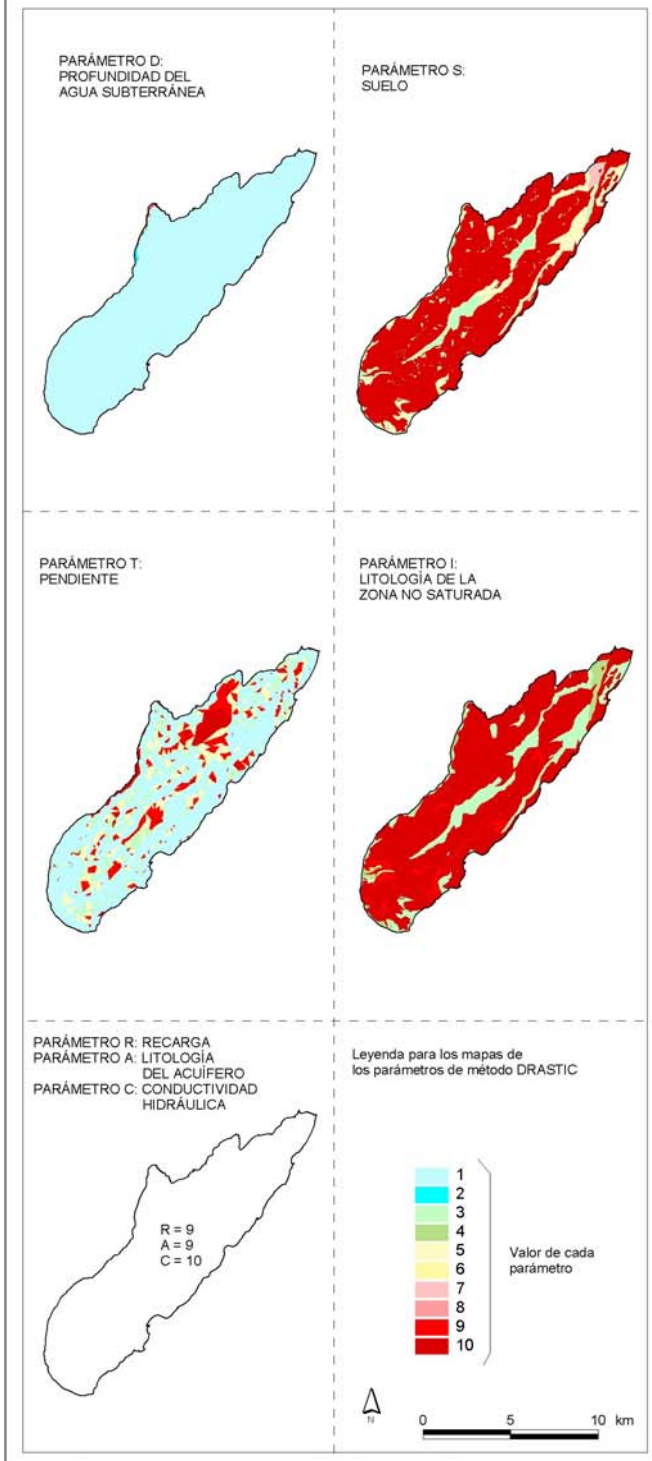
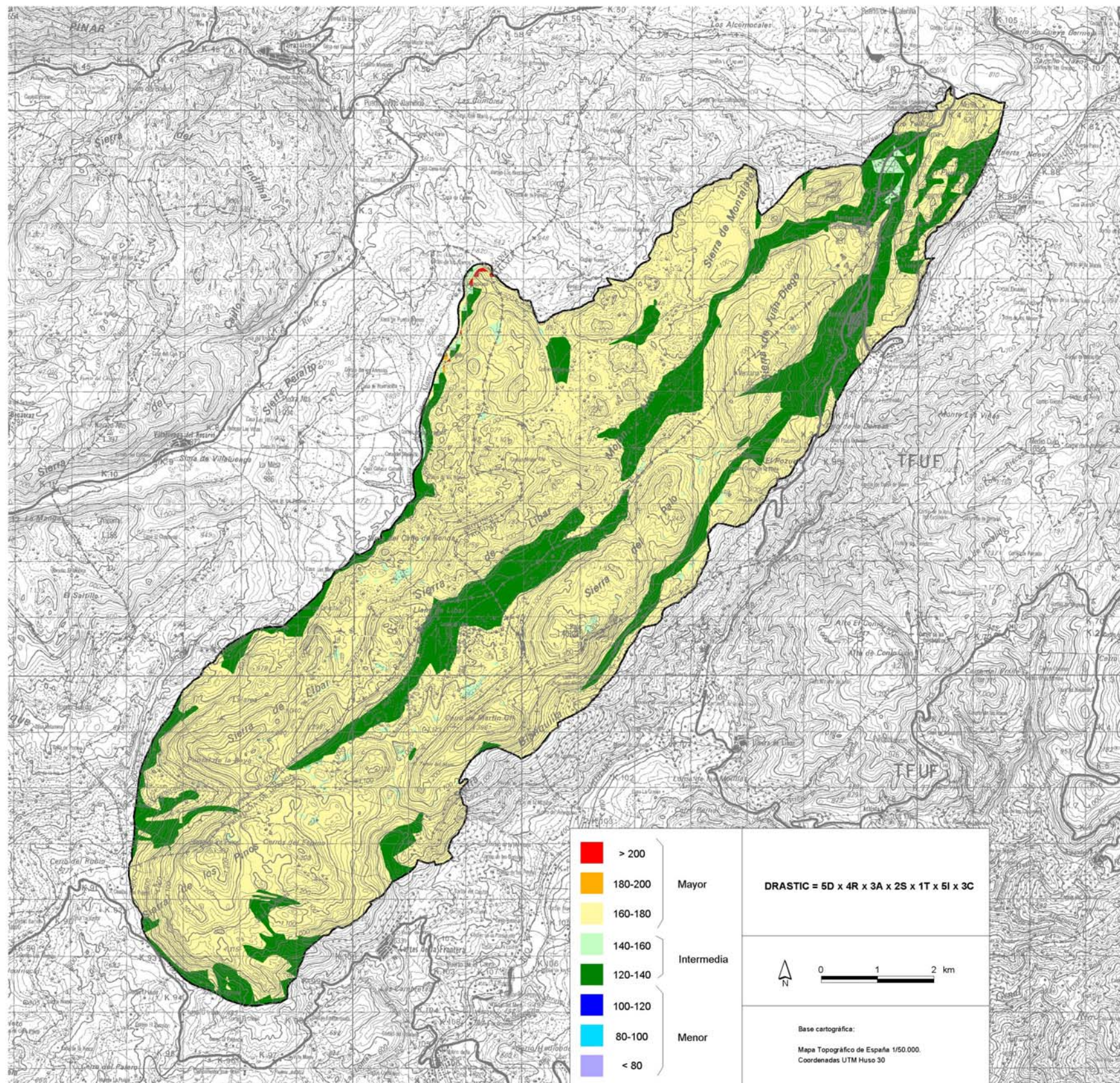
Intervalos del índice de vulnerabilidad EPIK	Zonas de Protección S	Clase de vulnerabilidad
≤ 19	S1	Muy Alta
19 - 25	S2	Alta
> 25	S3	Moderada
P4		Débil

Esquema 4. Sistema evaluación de la vulnerabilidad intrínseca mediante el método EPIK.



Esquema 5. Sistema evaluación de la vulnerabilidad intrínseca mediante el método COP. Tomado de Vías *et al.* (2002)



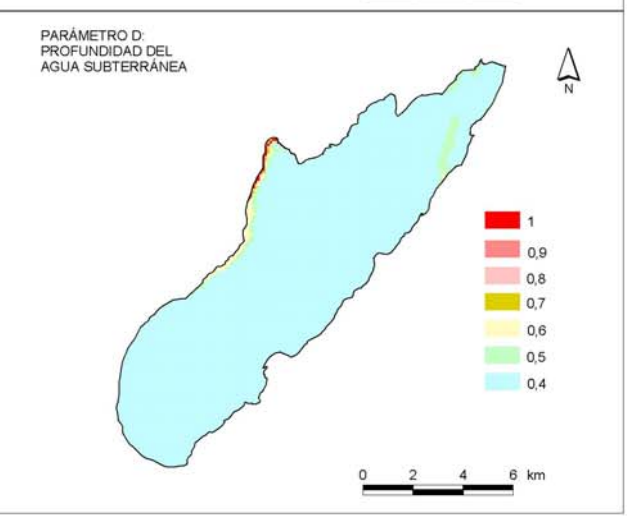
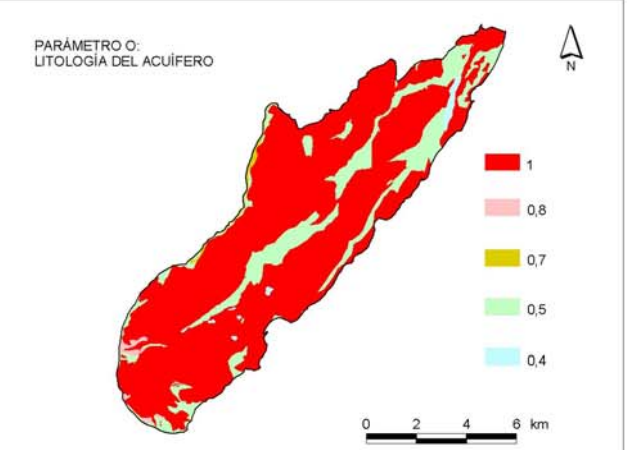
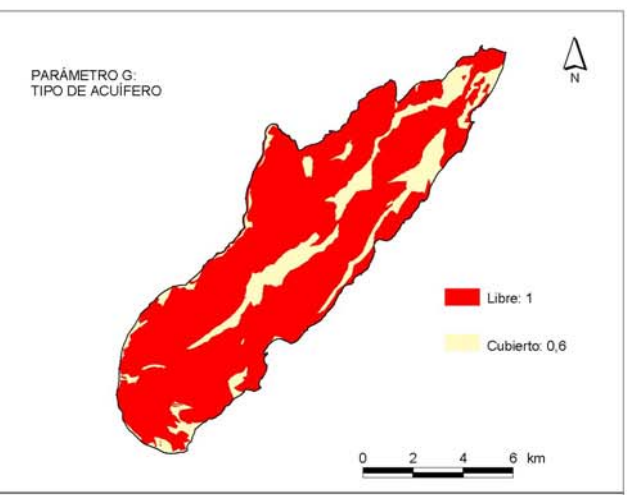
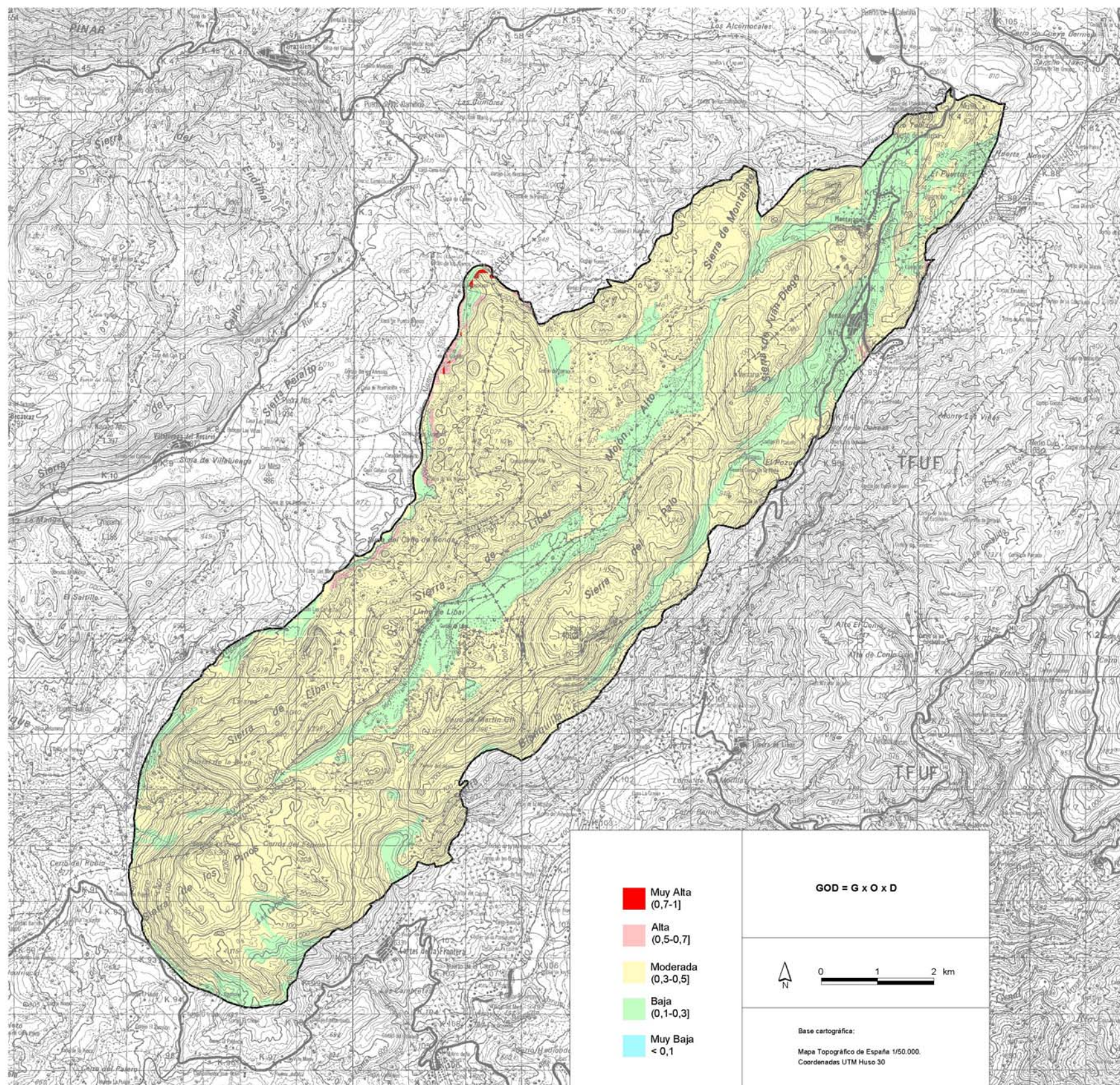


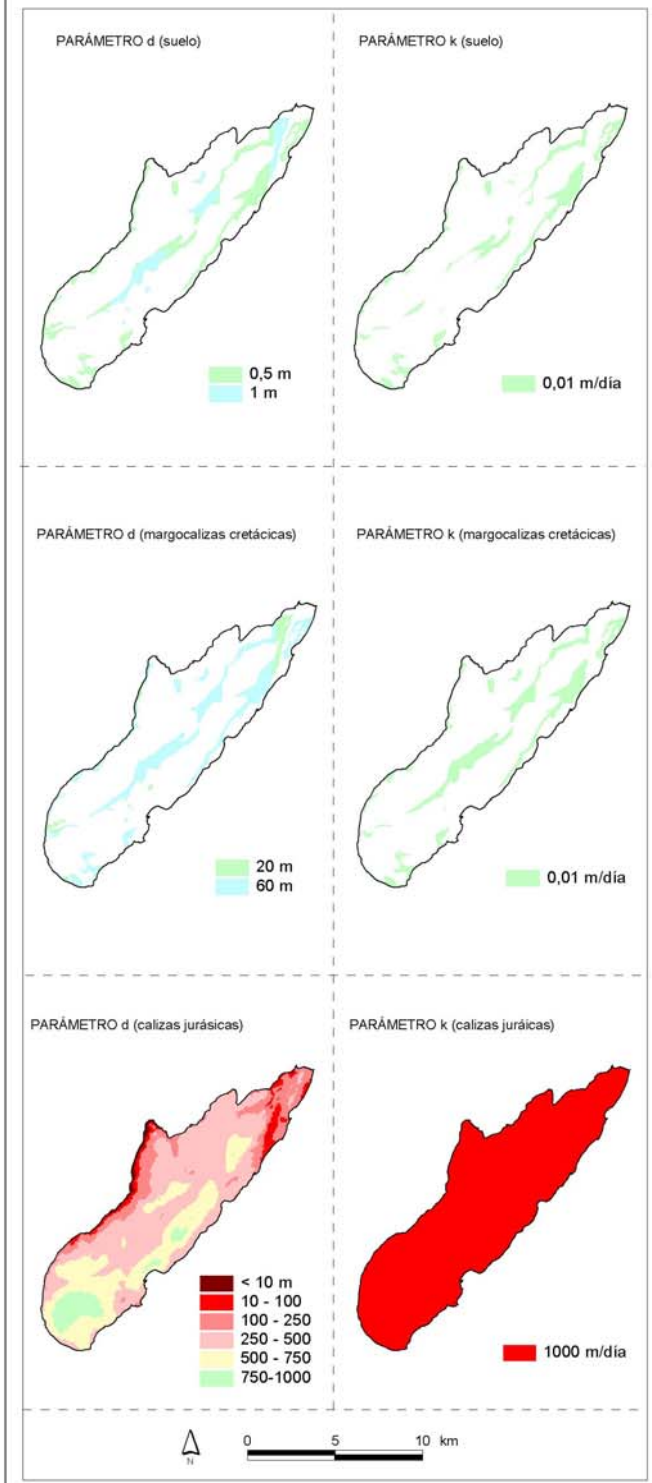
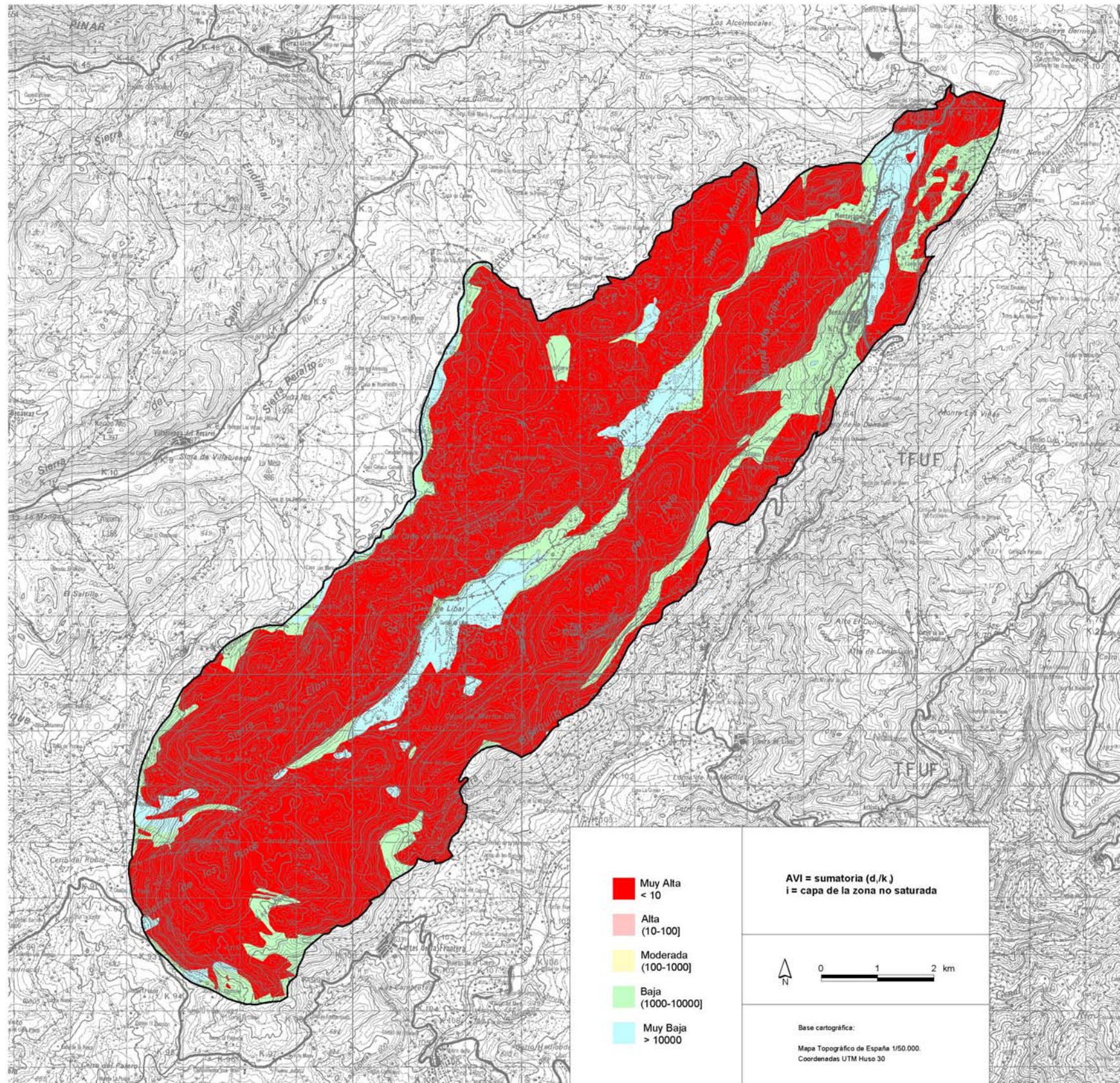
Autor: JESÚS M^º VÍAS MARTÍNEZ

MAPA 2L

**VULNERABILIDAD INTRÍNSECA SEGÚN EL MÉTODO DRASTIC.
ACUÍFERO DE LA SIERRA DE LIBAR**

TESIS DOCTORAL:
Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación
de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España



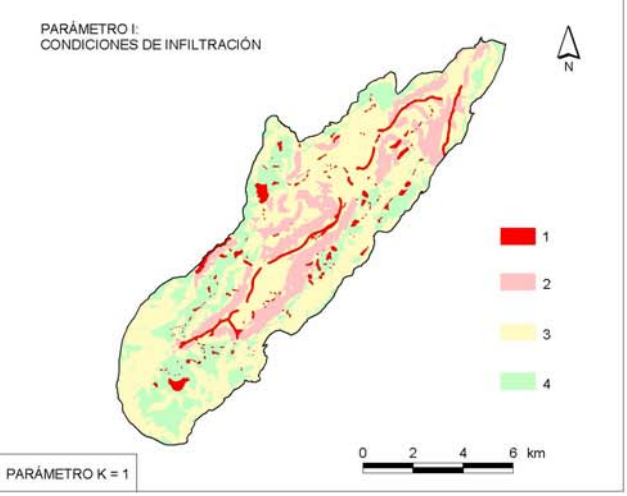
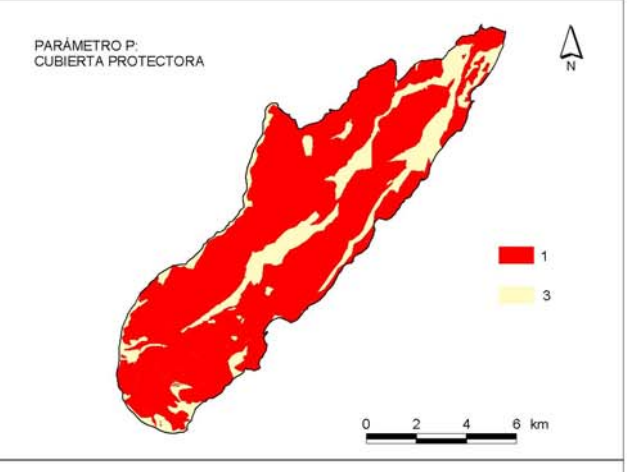
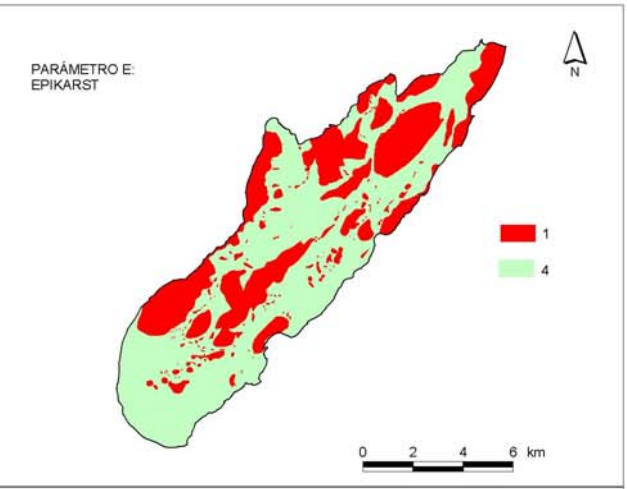
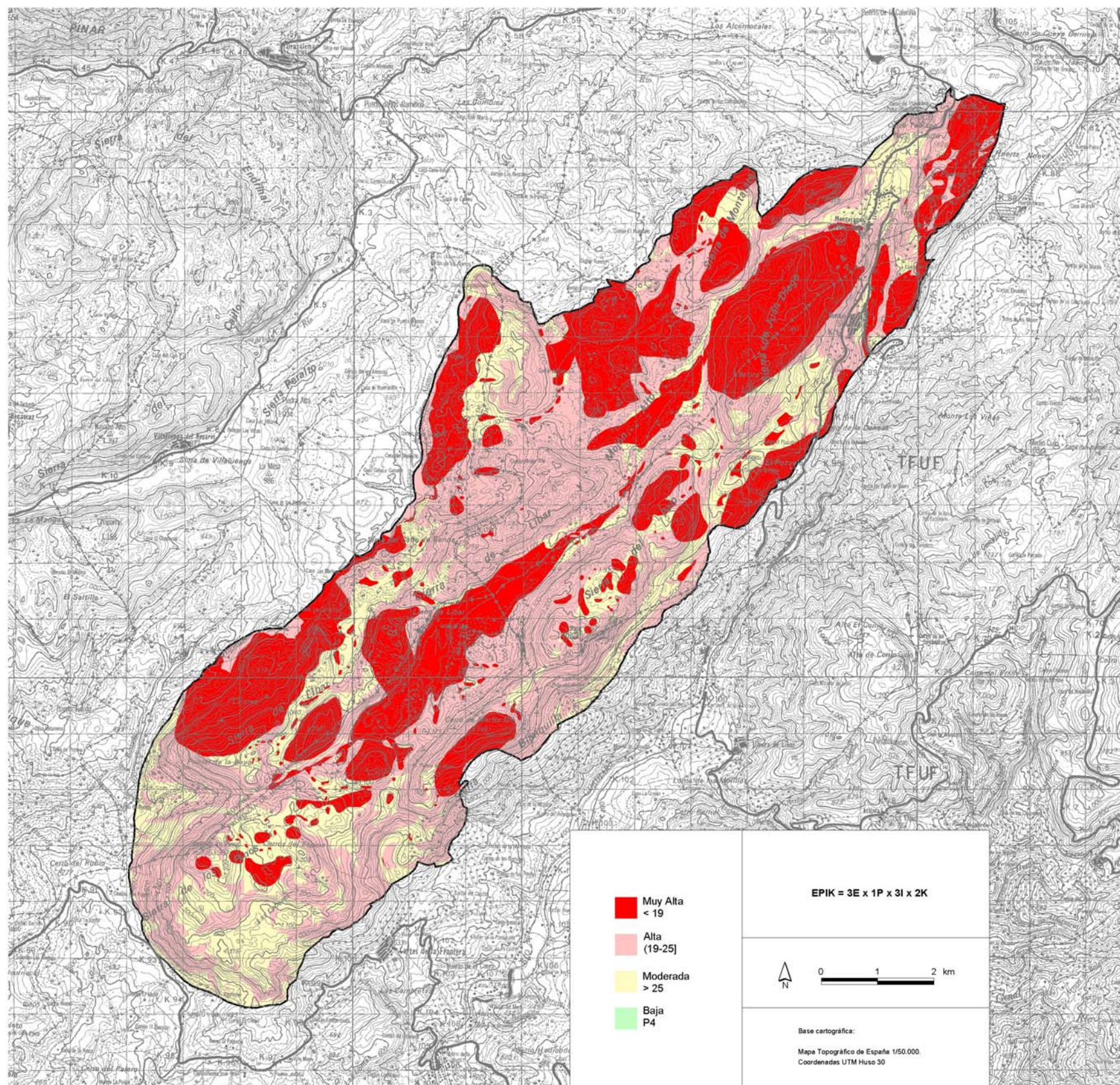


Autor: JESÚS M^o VÍAS MARTÍNEZ

MAPA 4L

VULNERABILIDAD INTRÍNSECA SEGÚN EL MÉTODO AVI.
ACUÍFERO DE LA SIERRA DE LIBAR

TESIS DOCTORAL:
 Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España

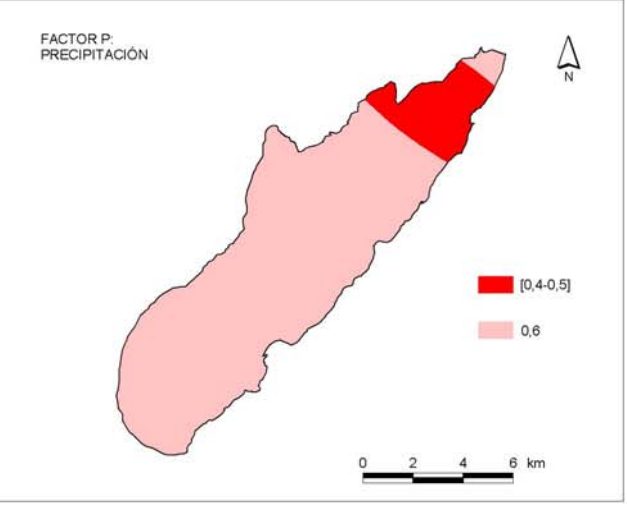
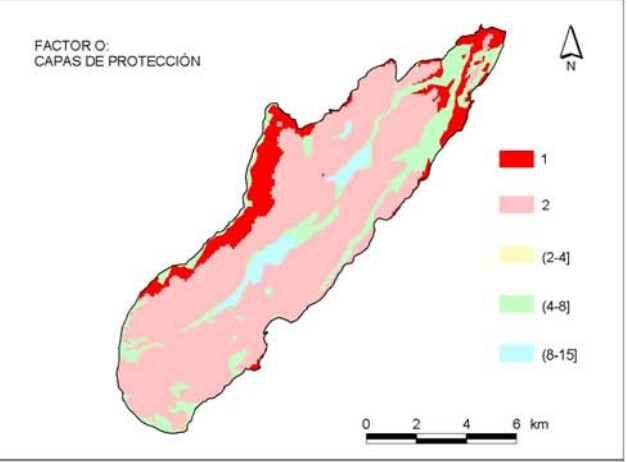
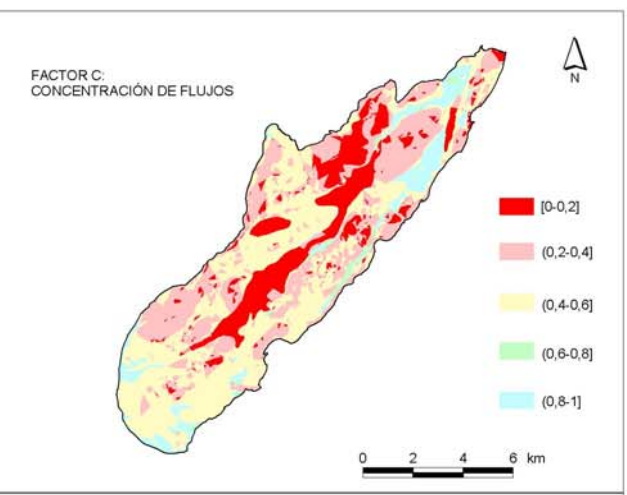
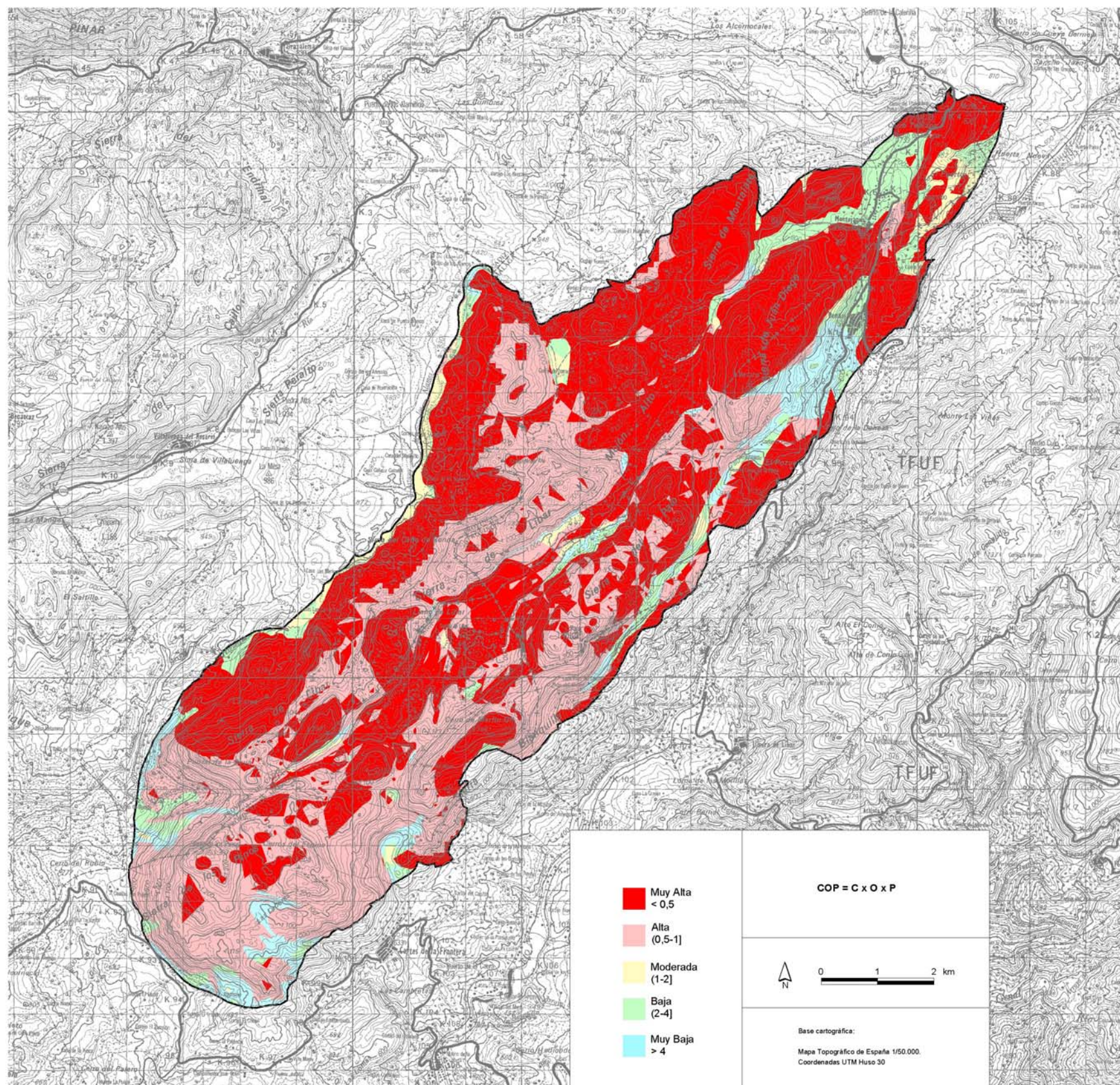


Autor: JESÚS M^o VÍAS MARTÍNEZ

MAPA 5L

**VULNERABILIDAD INTRÍNSECA SEGÚN EL MÉTODO EPIK.
ACUÍFERO DE LA SIERRA DE LIBAR**

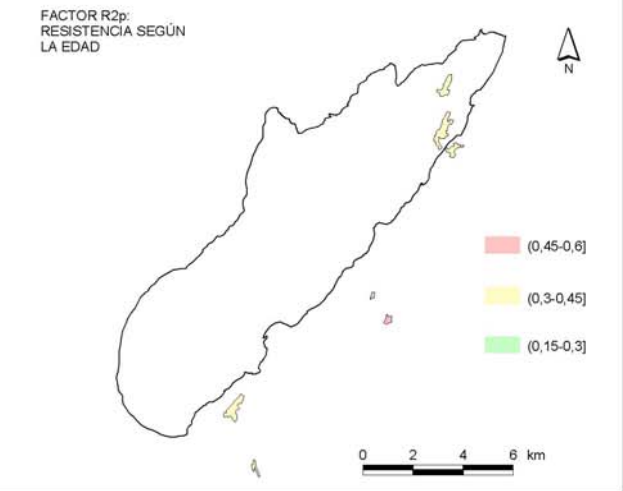
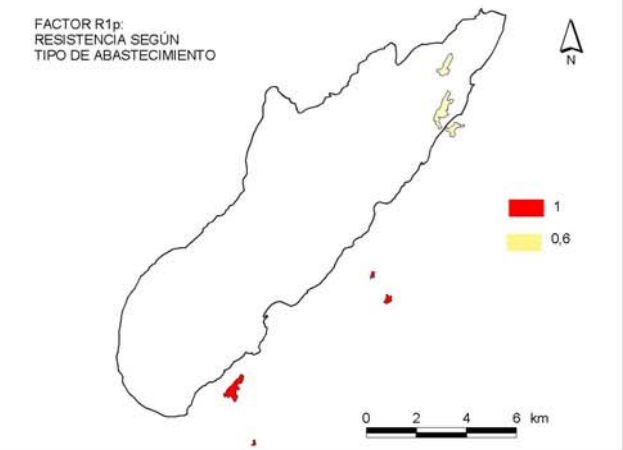
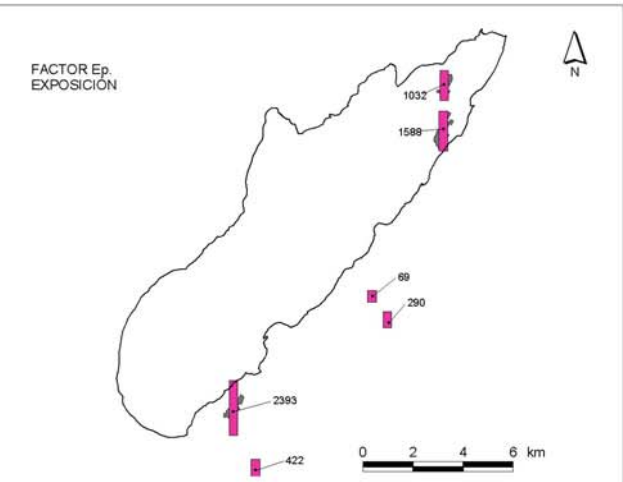
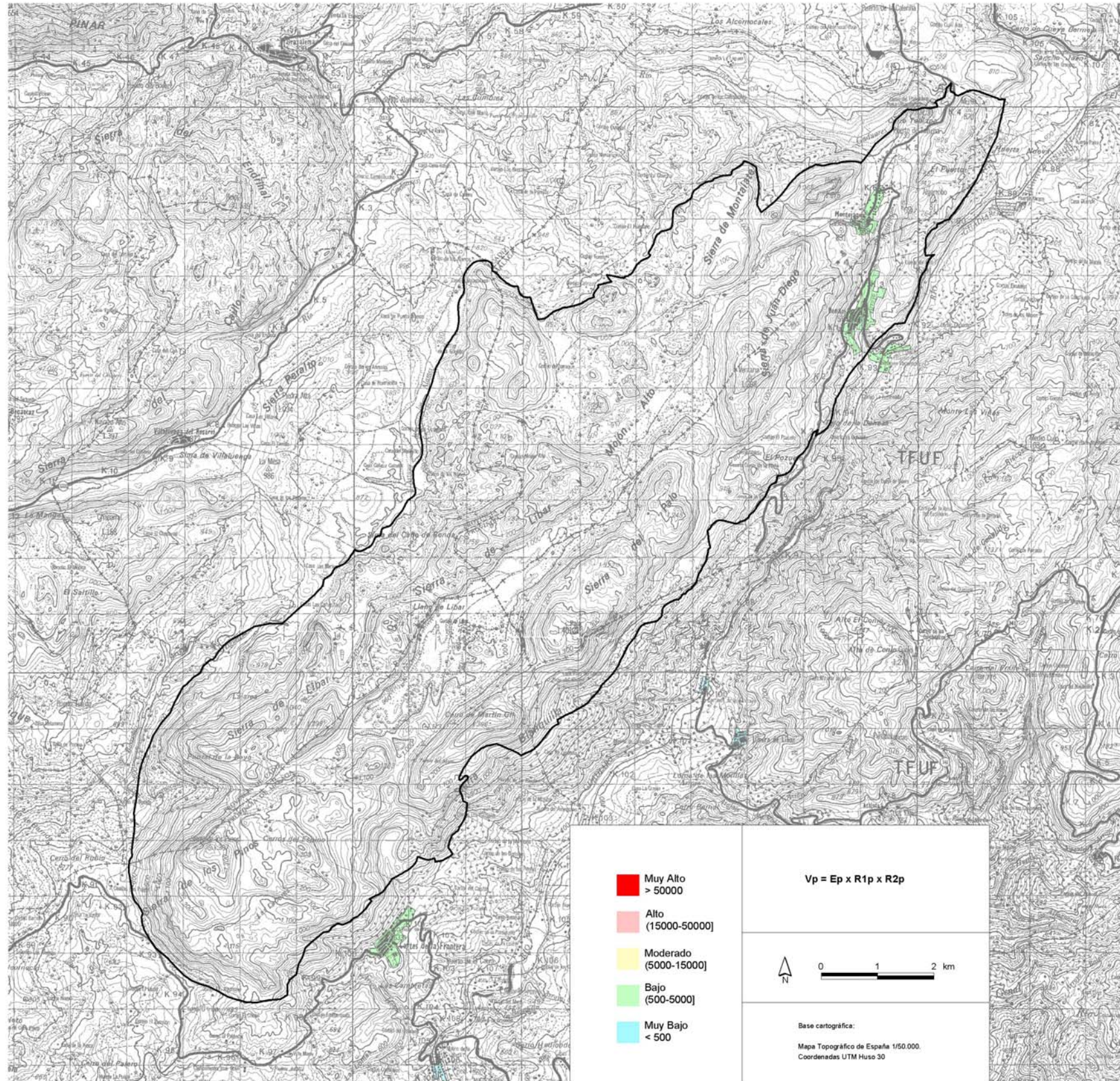
TESIS DOCTORAL:
 Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación
 de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España

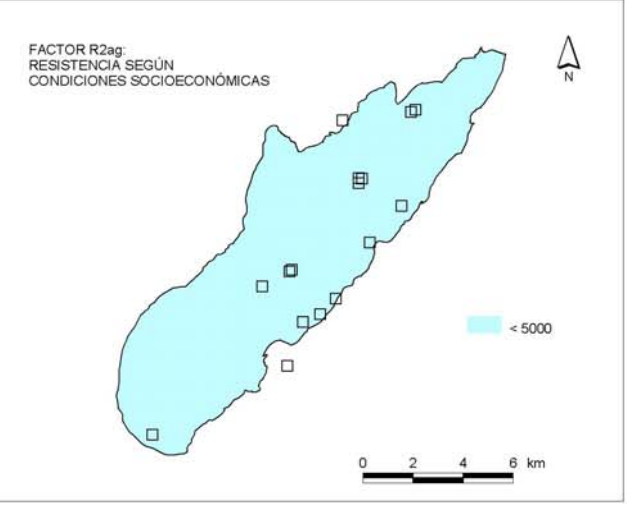
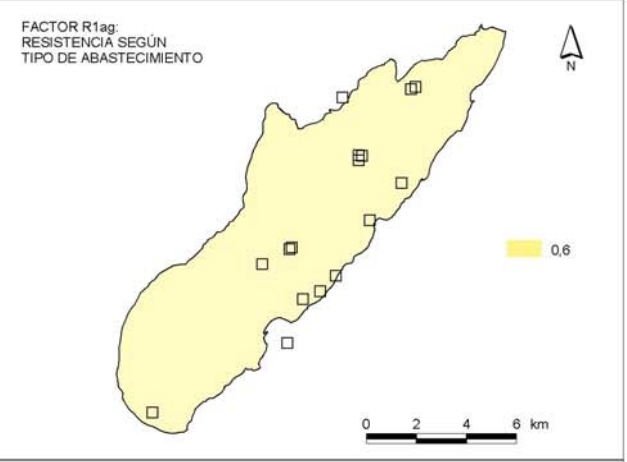
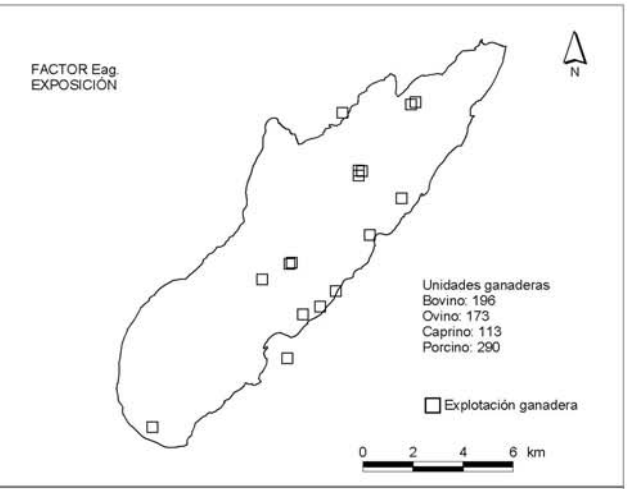
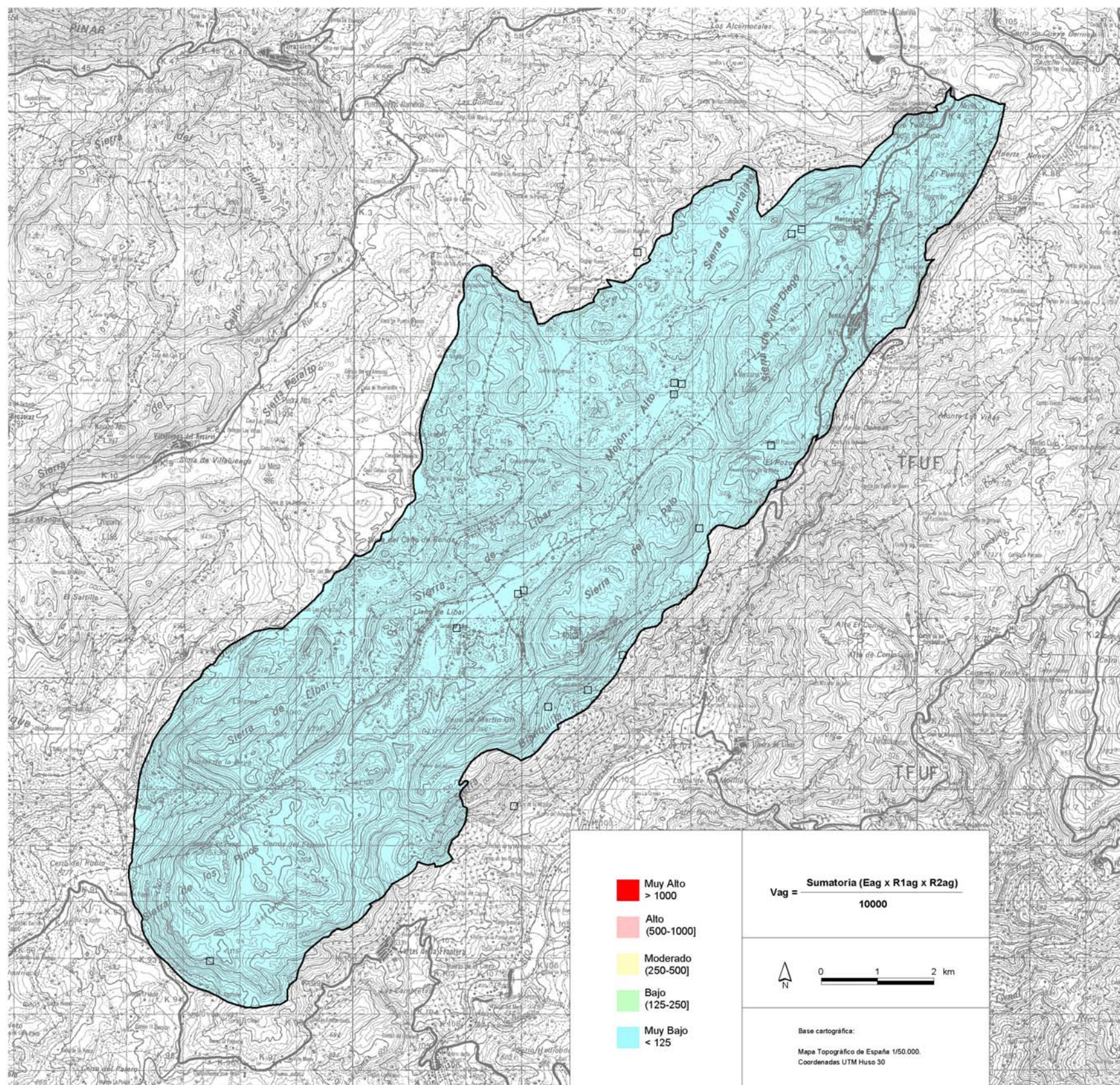


Autor: JESÚS M^a VÍAS MARTÍNEZ MAPA 6L

**VULNERABILIDAD INTRÍNSECA SEGÚN EL MÉTODO COP.
ACUÍFERO DE LA SIERRA DE LIBAR**

TESIS DOCTORAL:
Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación
de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España



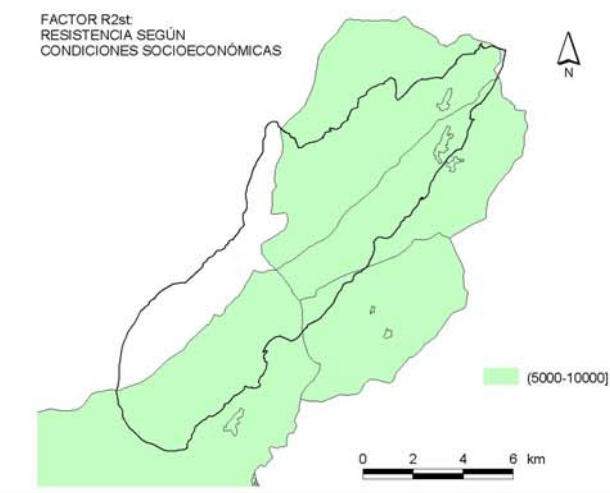
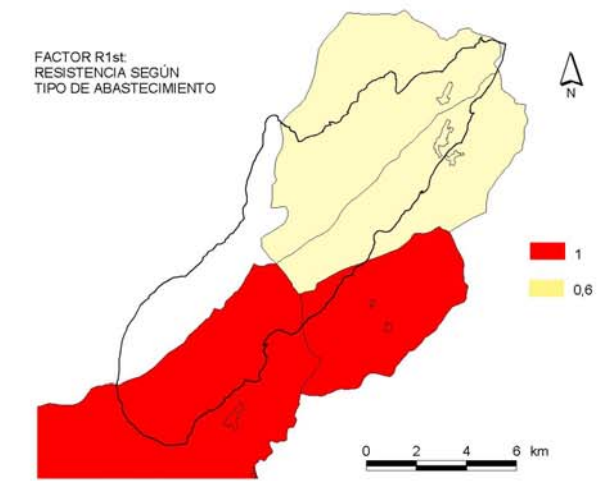
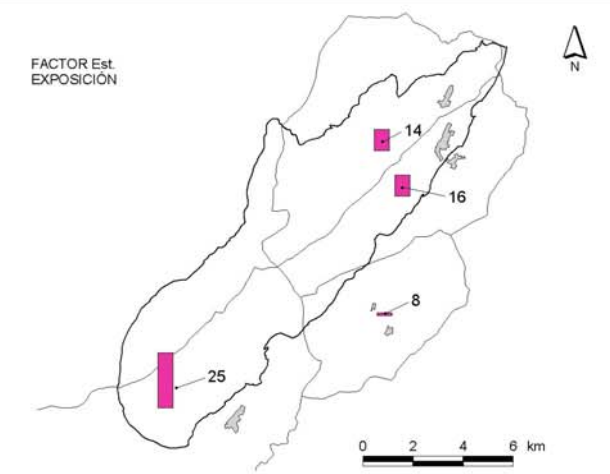
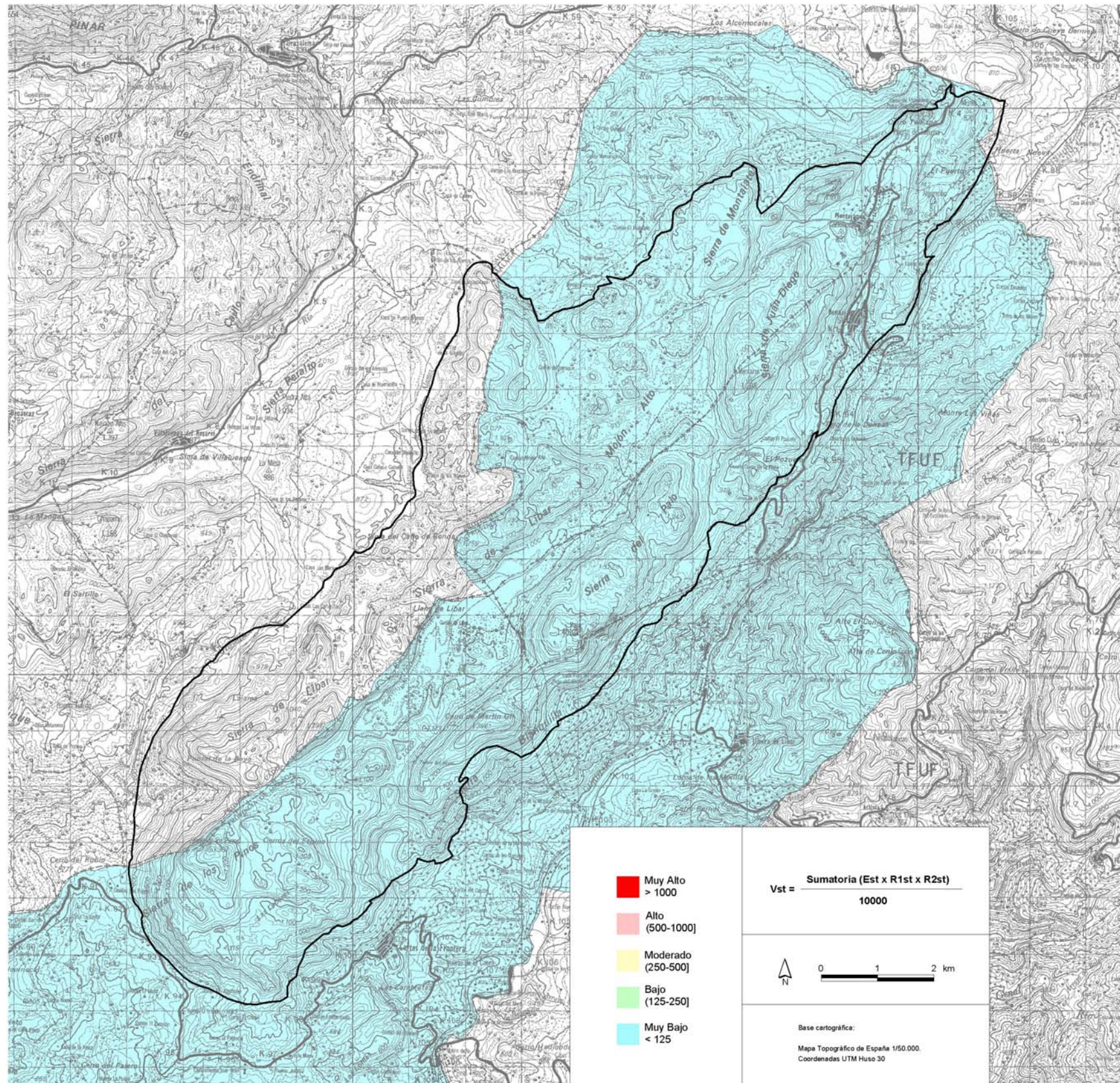


Autor: JESÚS M^o VÍAS MARTÍNEZ

MAPA 8L

VULNERABILIDAD DE LA ACTIVIDAD PRODUCTIVA: GANADERÍA. ACUÍFERO DE LA SIERRA DE LIBAR

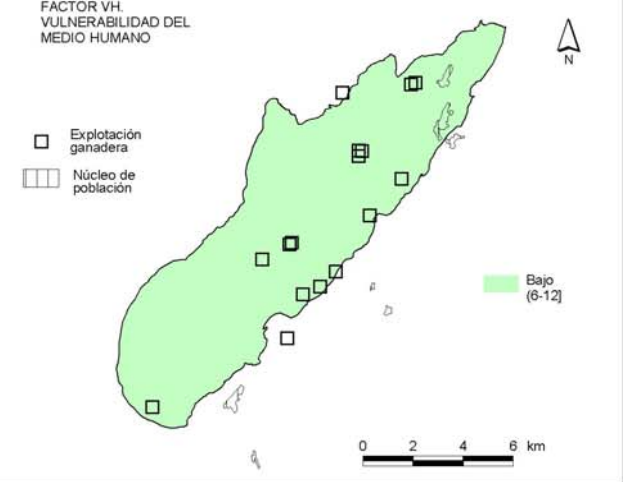
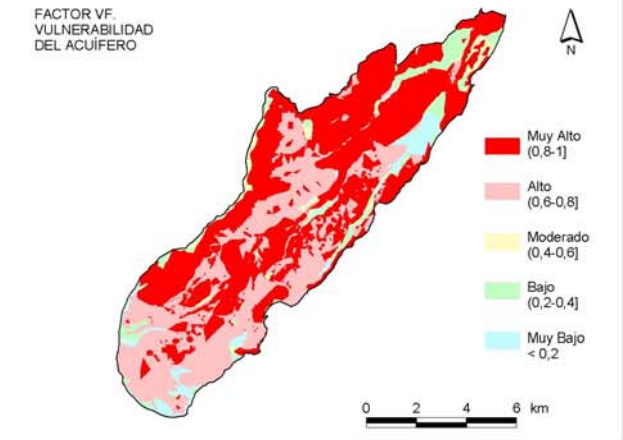
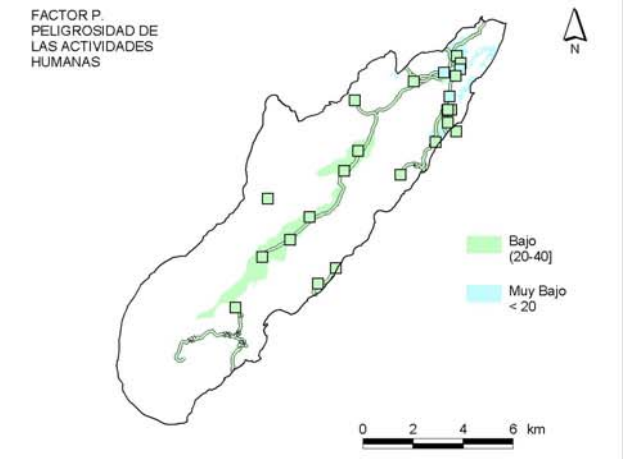
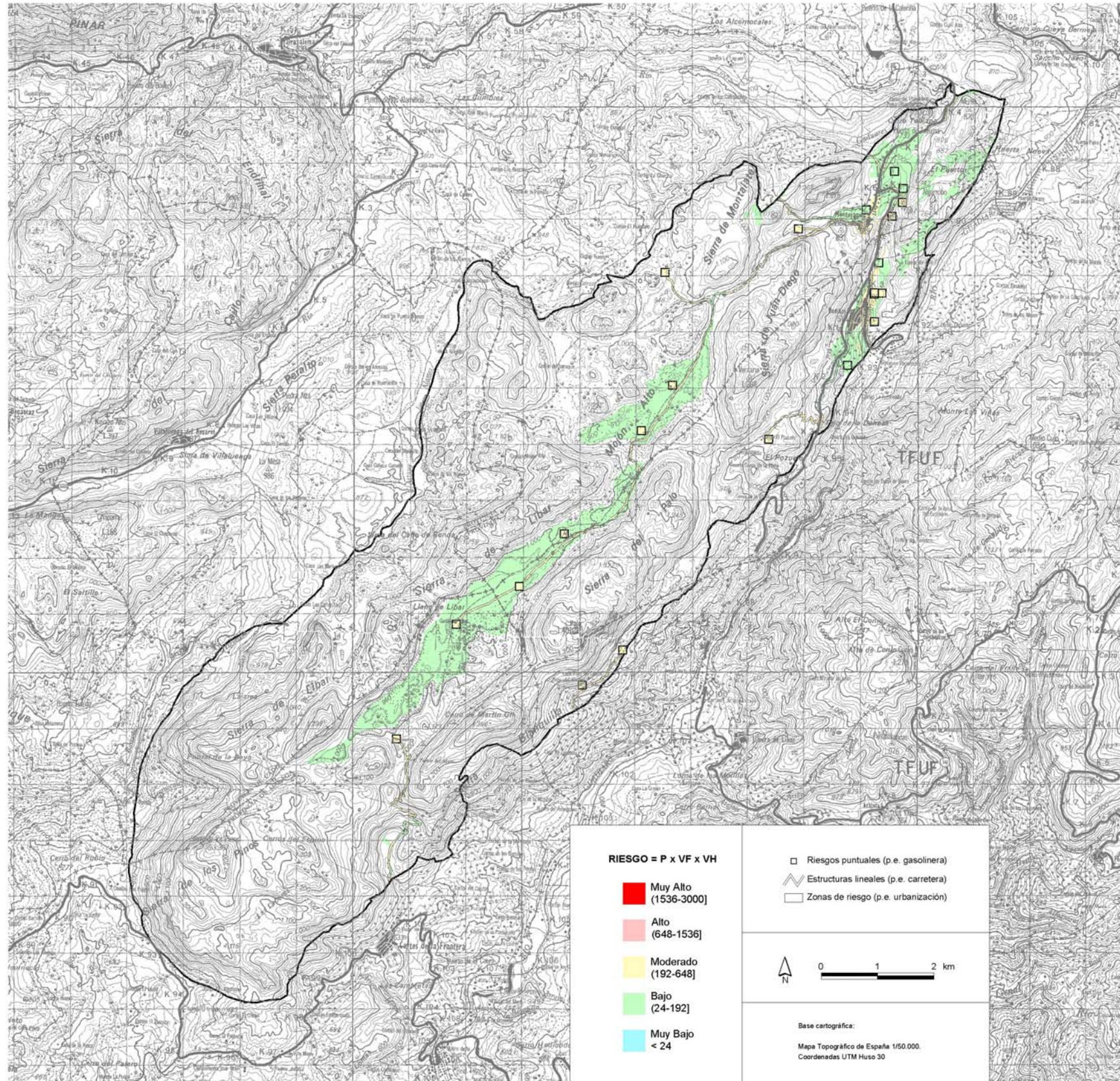
TESIS DOCTORAL:
Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España



Autor: JESÚS M^a VÍAS MARTÍNEZ MAPA 9L

VULNERABILIDAD DE LA ACTIVIDAD PRODUCTIVA: HOSTELERÍA Y OTROS. ACUÍFERO DE LA SIERRA DE LIBAR

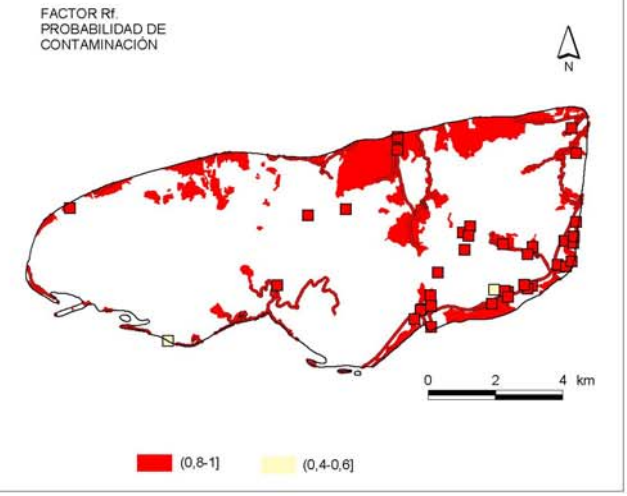
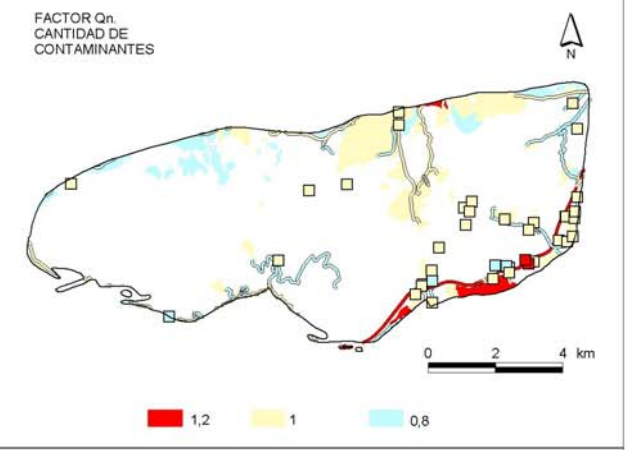
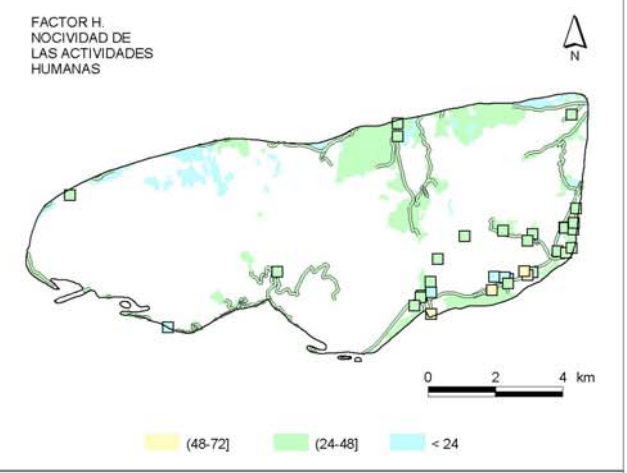
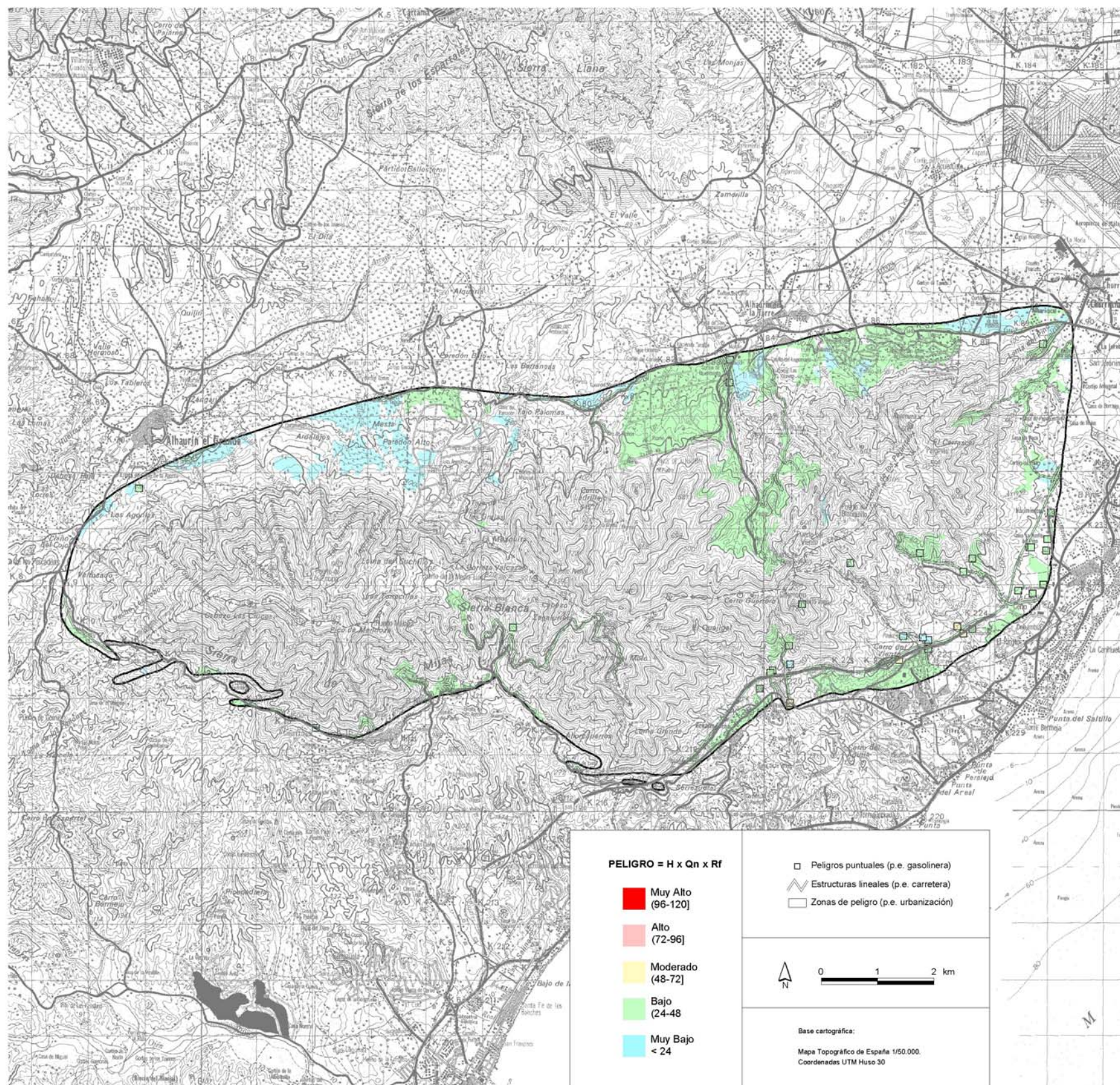
TESIS DOCTORAL:
Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España



Autor: JESÚS M^º VÍAS MARTÍNEZ MAPA 10L

RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS. ACUÍFERO DE LA SIERRA DE LIBAR

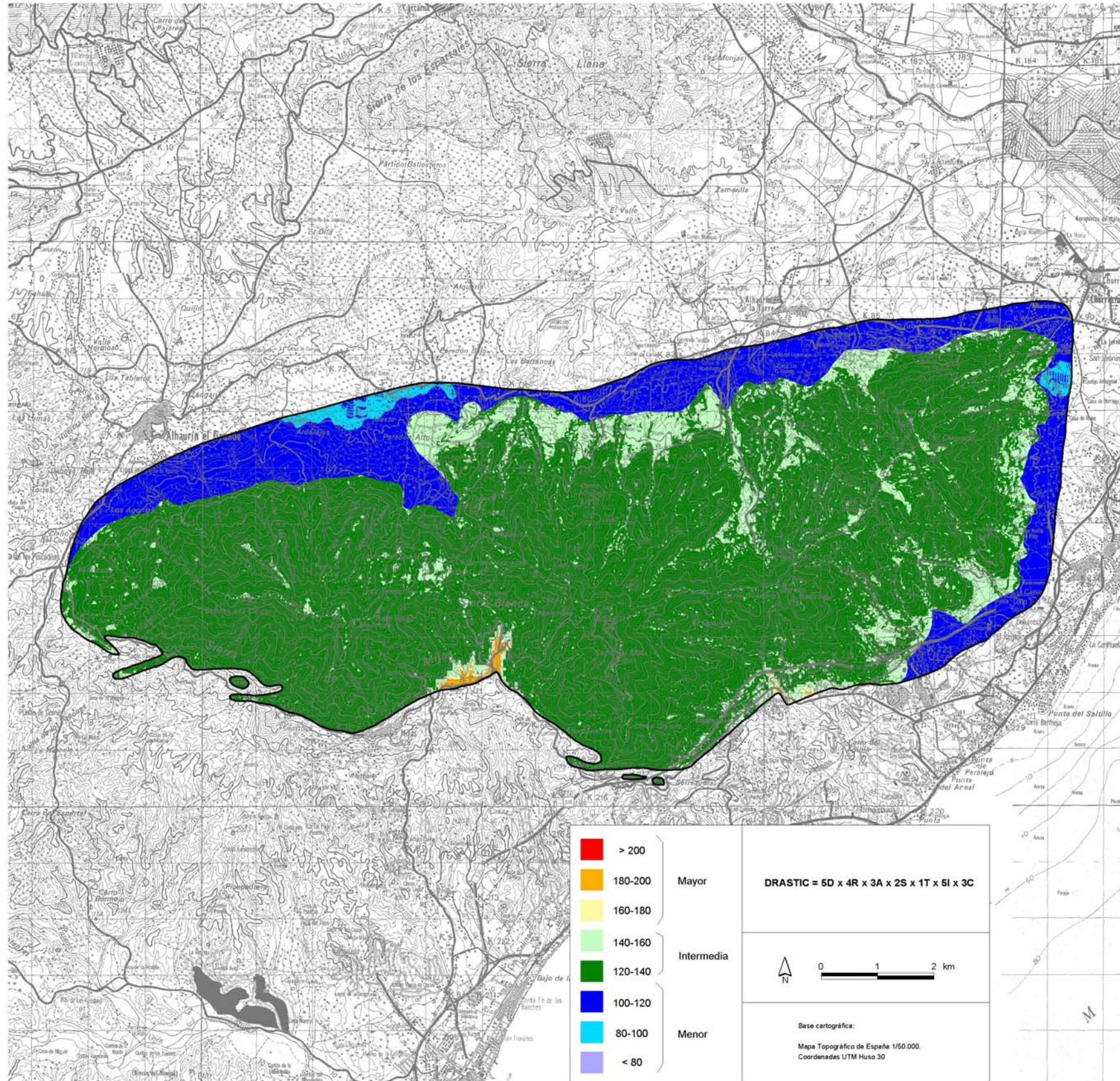
TESIS DOCTORAL:
 Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España



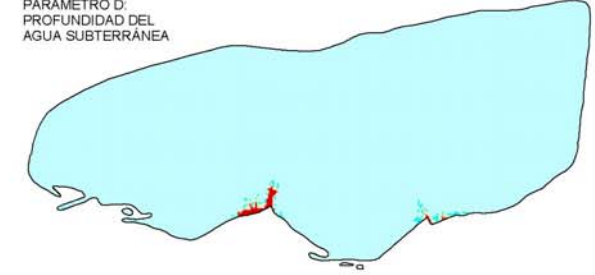
Autor: JESÚS M^a VÍAS MARTÍNEZ MAPA 1M

**PELIGRO DE CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.
 ACUÍFERO DE LA SIERRA DE MIJAS**

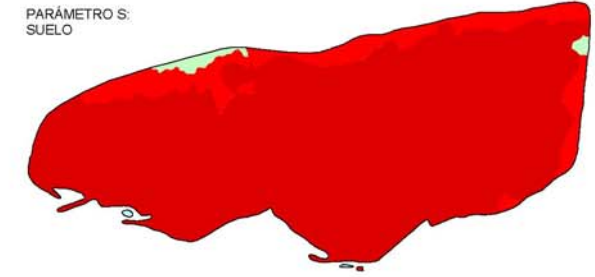
TESIS DOCTORAL:
 Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación
 de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España



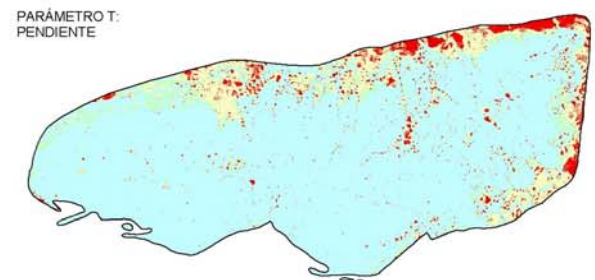
PARÁMETRO D:
PROFUNDIDAD DEL
AGUA SUBTERRÁNEA



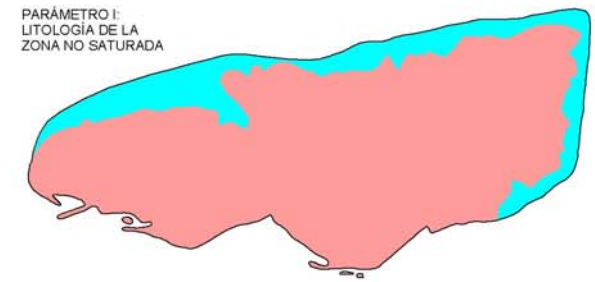
PARÁMETRO S:
SUELO



PARÁMETRO T:
PENDIENTE



PARÁMETRO I:
LITOLOGÍA DE LA
ZONA NO SATURADA



Leyenda para los mapas de
los parámetros del método DRATIC



Valor de cada
parámetro

PARÁMETRO R: RECARGA = 9
PARÁMETRO A: LITOLOGÍA DEL ACUÍFERO = 8
PARÁMETRO C: CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA = 4



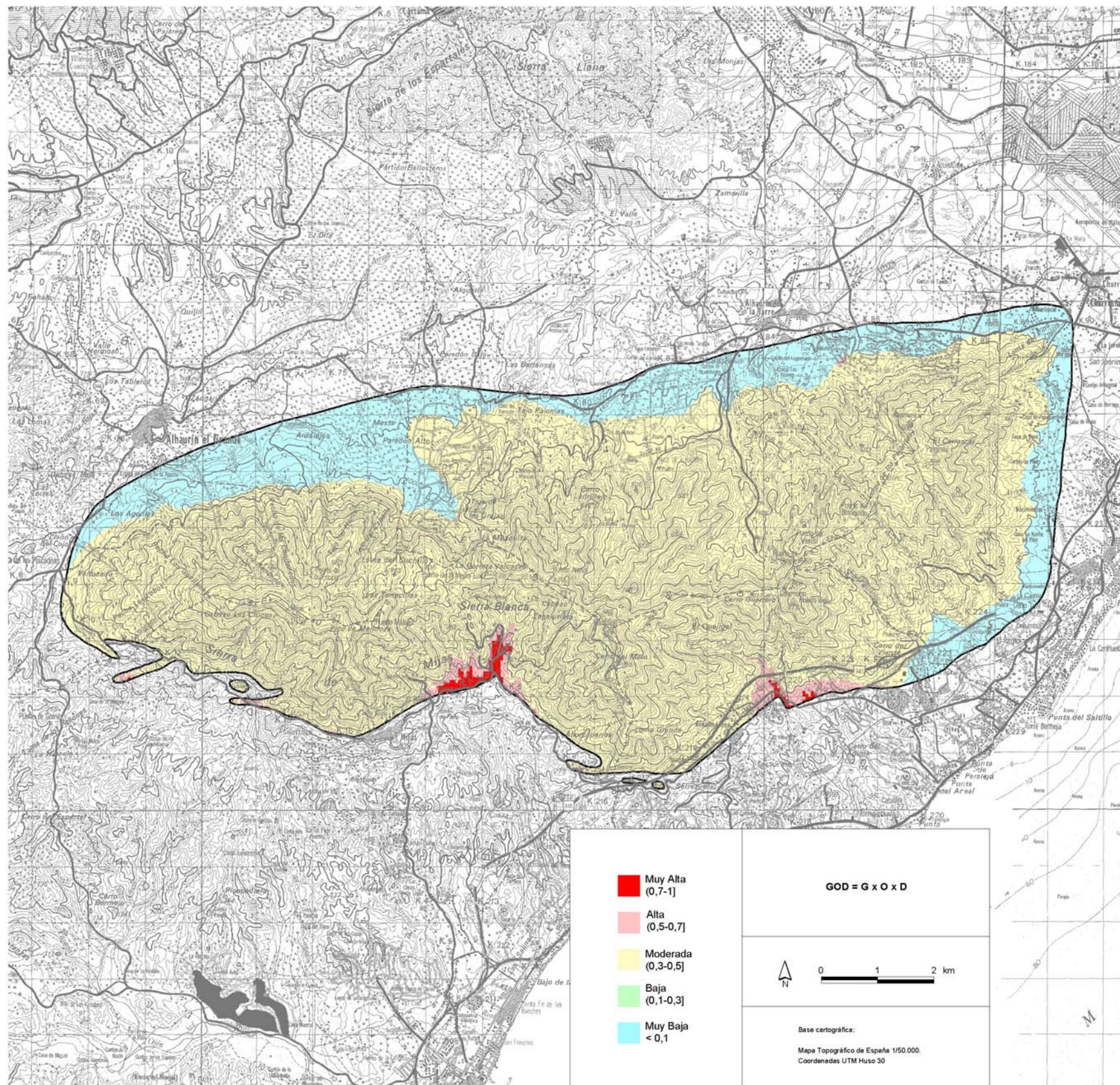
Autor: JESÚS M^º VÍAS MARTÍNEZ

MAPA 2M

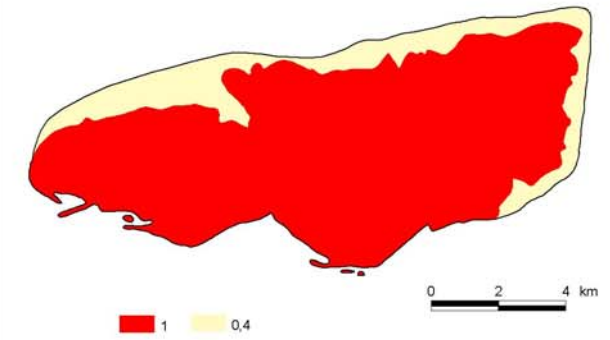
**VULNERABILIDAD INTRÍNSECA SEGÚN EL MÉTODO DRATIC.
ACUÍFERO DE LA SIERRA DE MIJAS**

TESIS DOCTORAL:
Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación
de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España

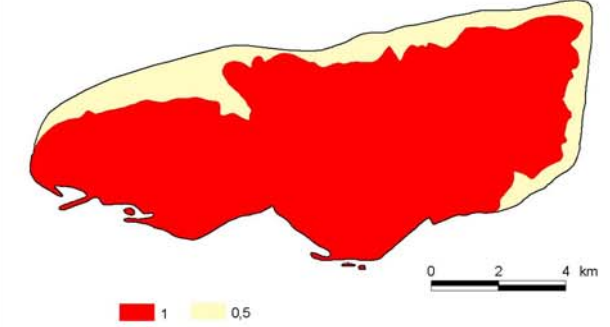




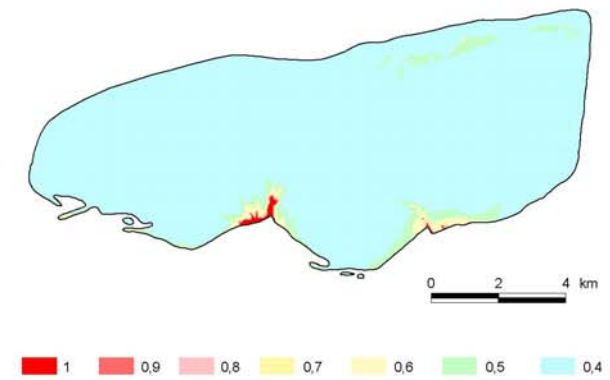
FACTOR G:
TIPO DE ACUÍFERO



FACTOR O:
LITOLOGÍA DEL ACUÍFERO



FACTOR D:
PROFUNDIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA



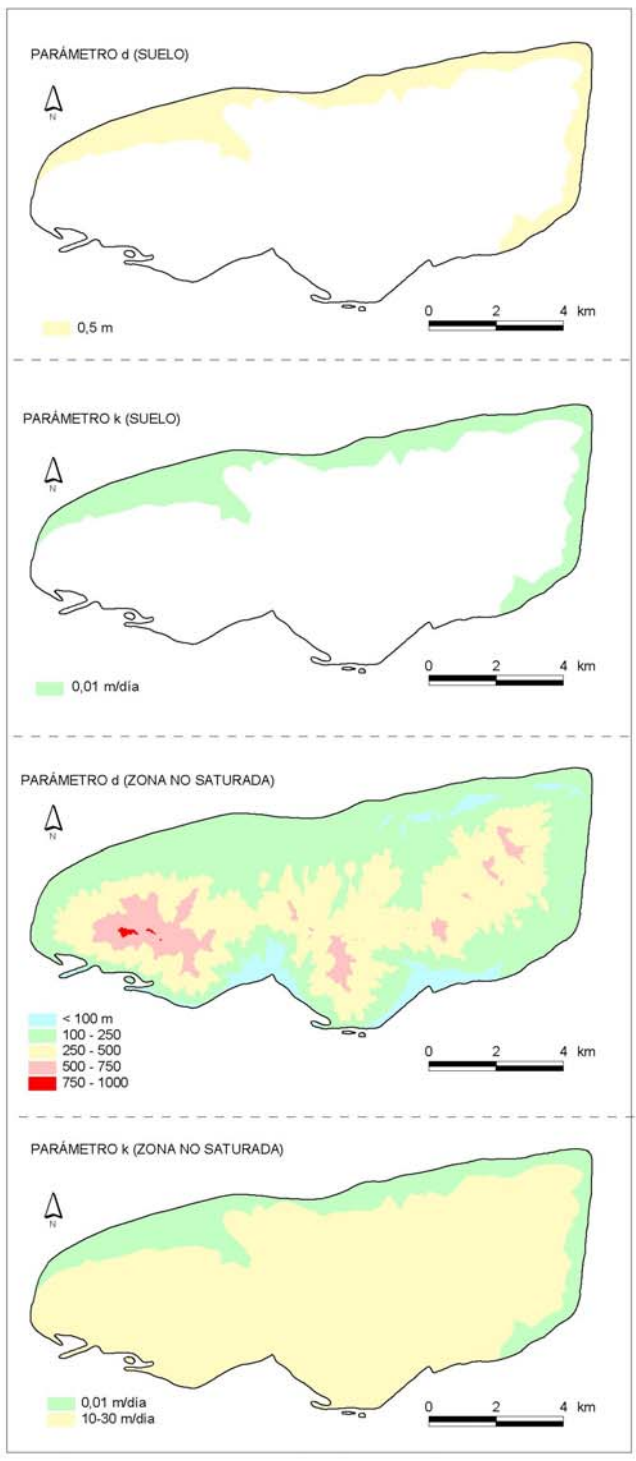
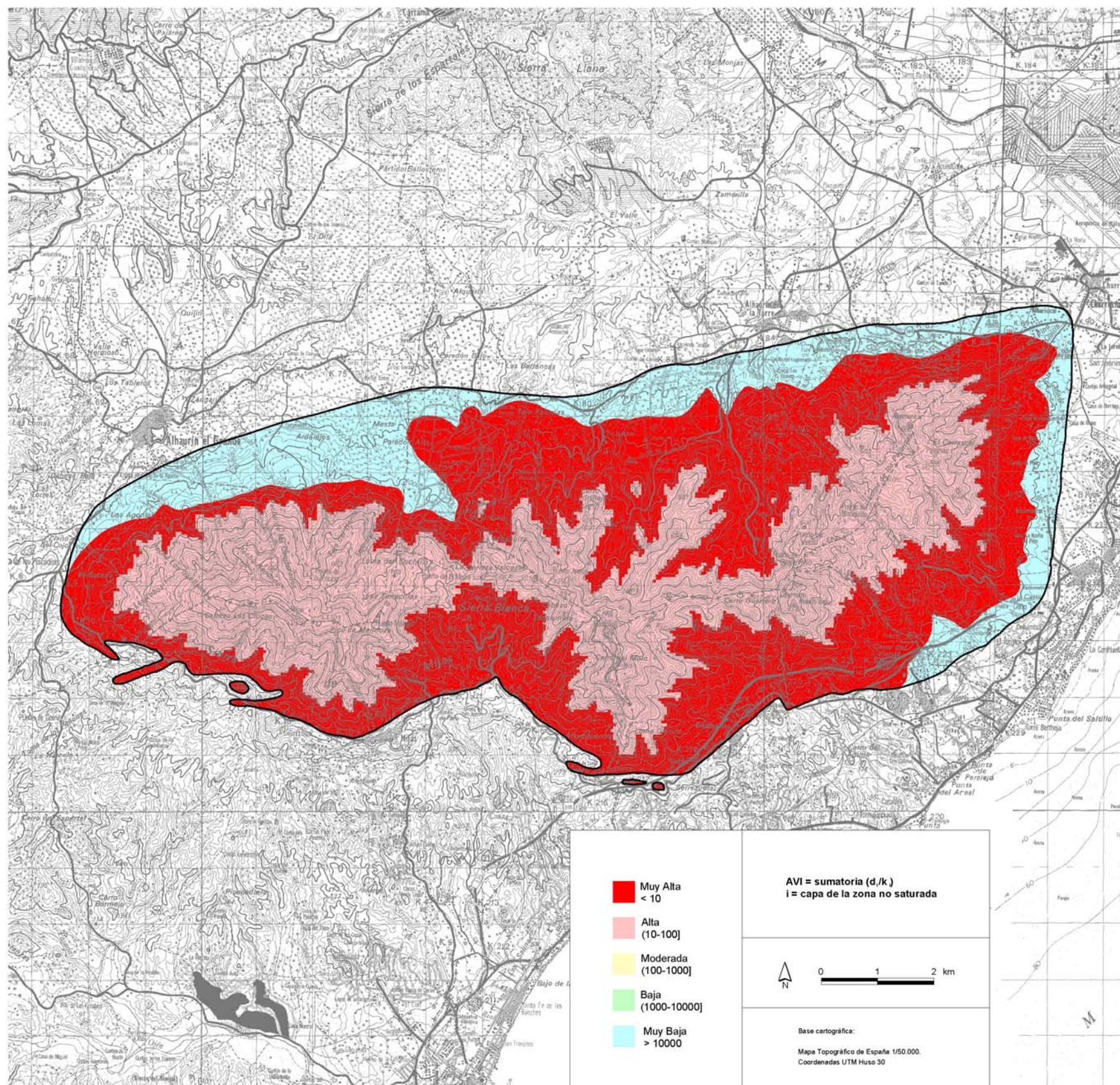
Autor: JESÚS M^o VÍAS MARTÍNEZ

MAPA 3M

**VULNERABILIDAD INTRÍNSECA SEGÚN EL MÉTODO GOD.
ACUÍFERO DE LA SIERRA DE MIJAS**

TESIS DOCTORAL:
Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España

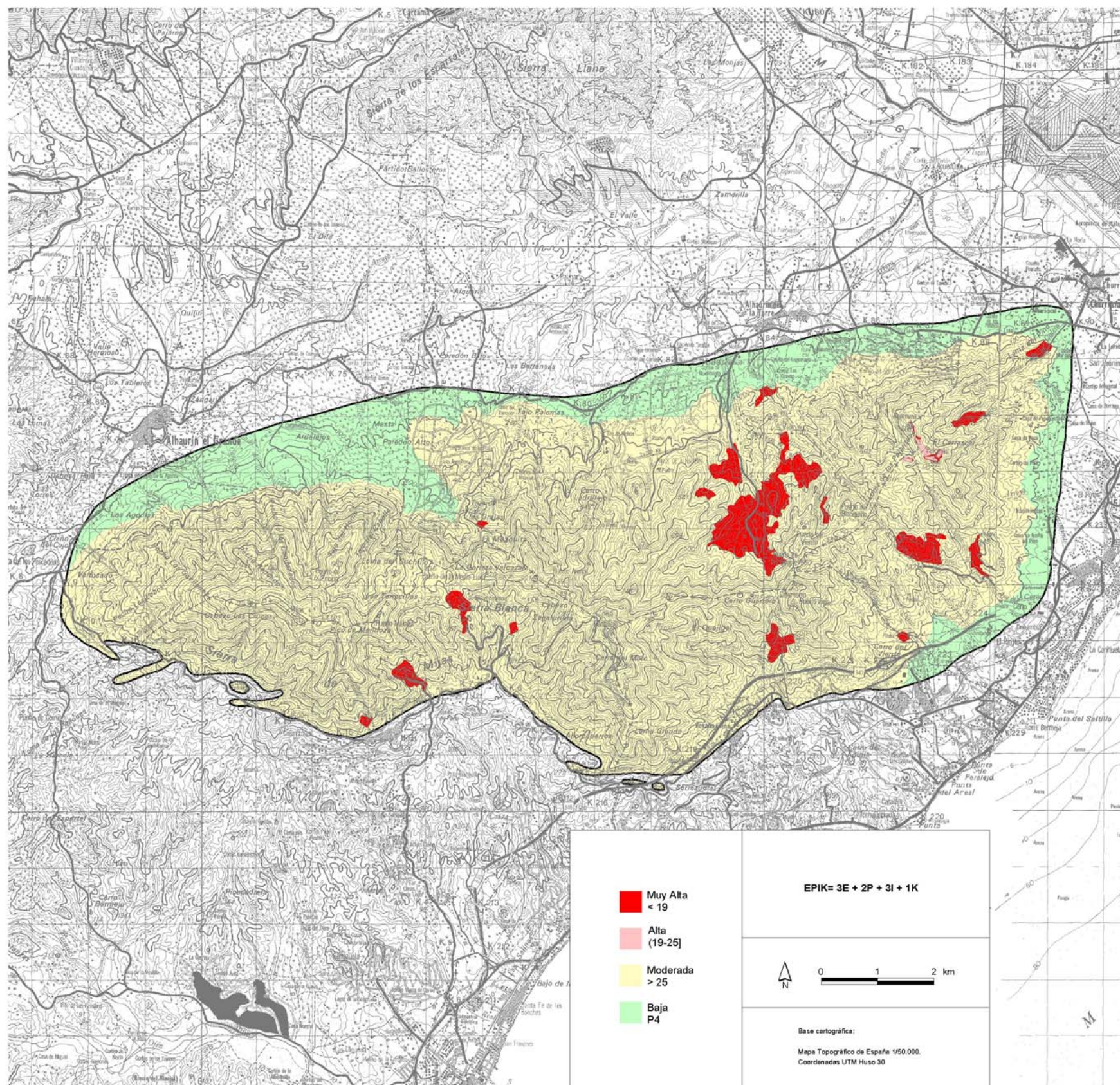




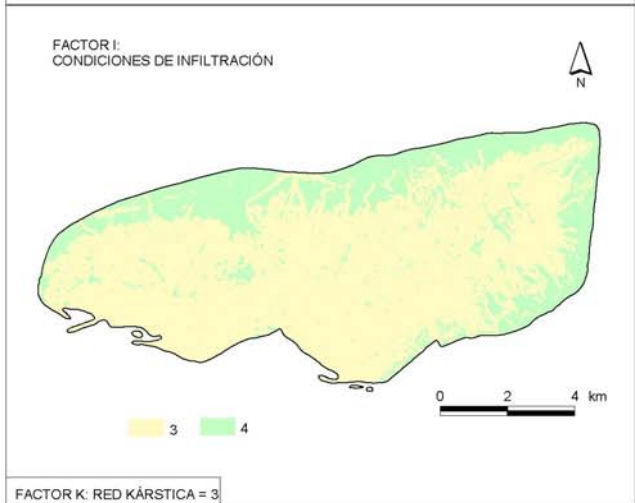
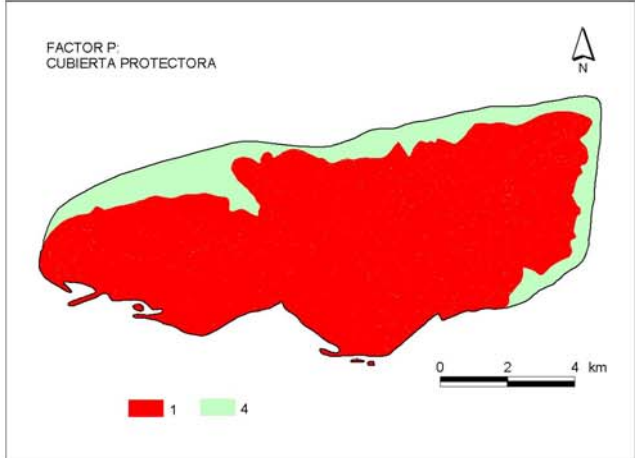
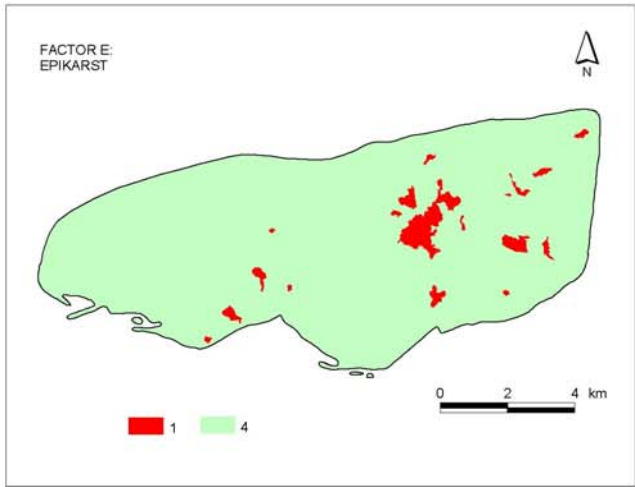
Autor: JESÚS M^o VÍAS MARTÍNEZ MAPA 4M

**VULNERABILIDAD INTRÍNSECA SEGÚN EL MÉTODO AVI.
ACUÍFERO DE LA SIERRA DE MIJAS**

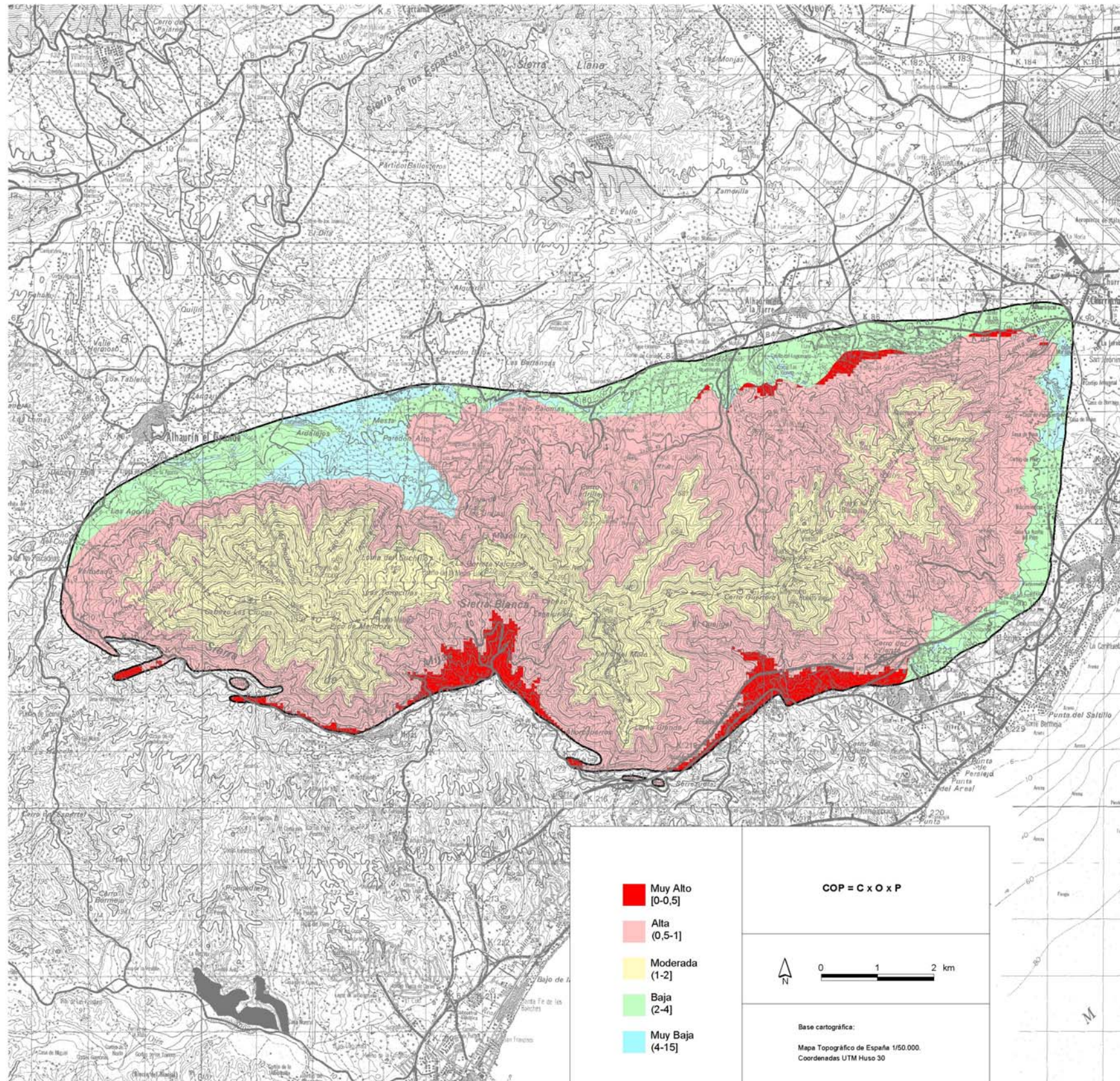
TESIS DOCTORAL:
Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación
de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España



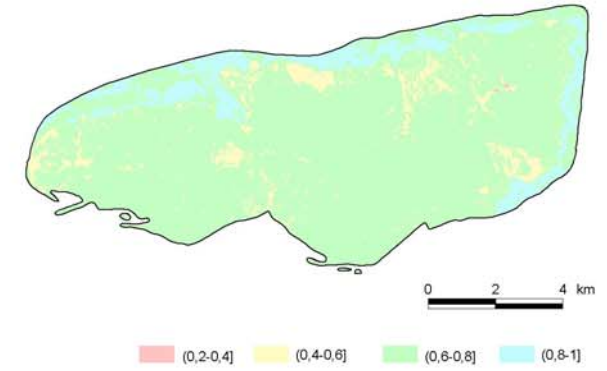
<ul style="list-style-type: none"> ■ Muy Alta < 19 ■ Alta (19-25] ■ Moderada > 25 ■ Baja P4 	<p style="text-align: center;">$EPIK = 3E + 2P + 3I + 1K$</p> <p style="text-align: center;">0 1 2 km</p> <p>Base cartográfica: Mapa Topográfico de España 1/50.000. Coordenadas UTM Huso 30</p>
---	---



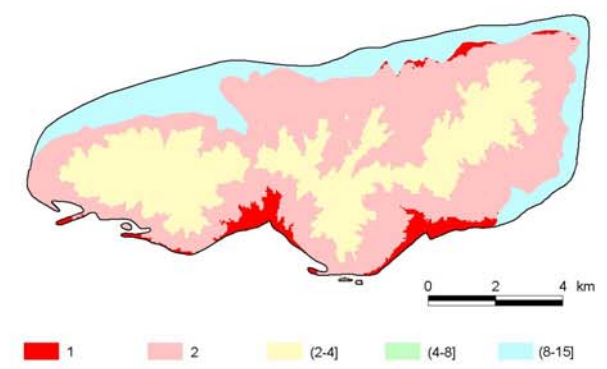
Autor: JESÚS M ^a VÍAS MARTÍNEZ	MAPA 5M
VULNERABILIDAD INTRÍNSECA SEGÚN EL MÉTODO EPIK. ACUÍFERO DE LA SIERRA DE MIJAS	
<small> TESIS DOCTORAL: Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España </small>	
	



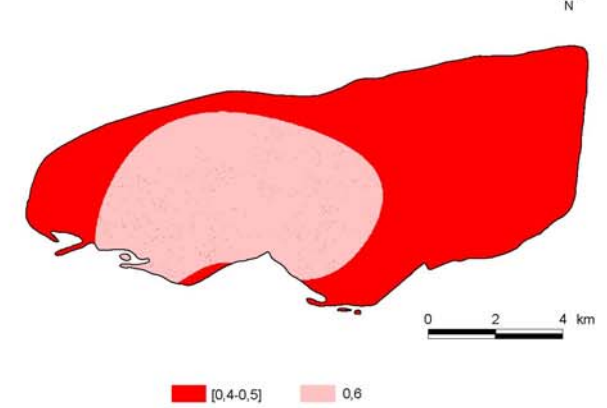
FACTOR C: CONCENTRACIÓN DE FLUJOS



FACTOR O: CAPAS DE PROTECCIÓN



FACTOR P: PRECIPITACIÓN



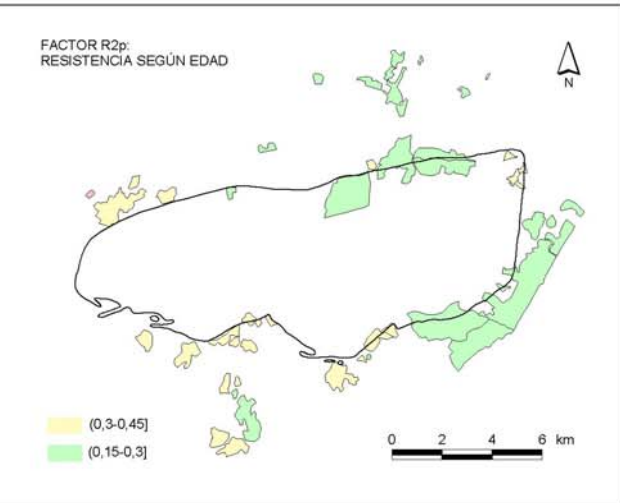
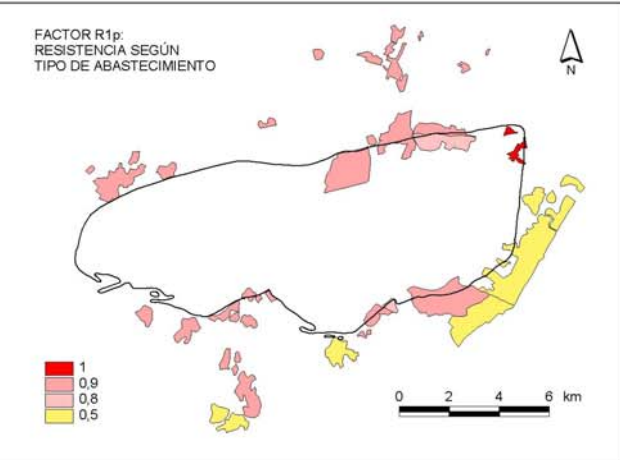
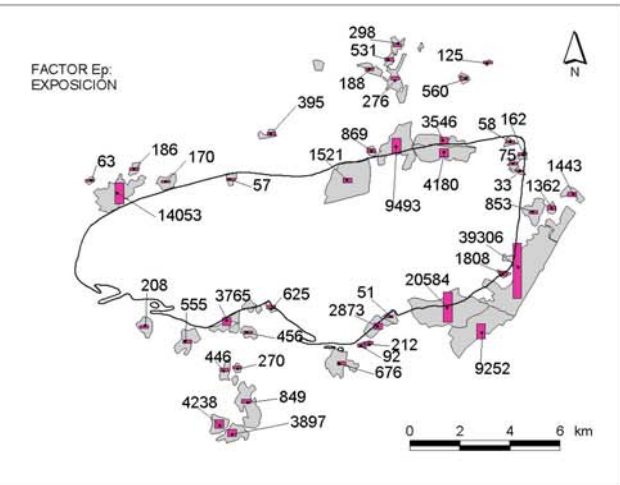
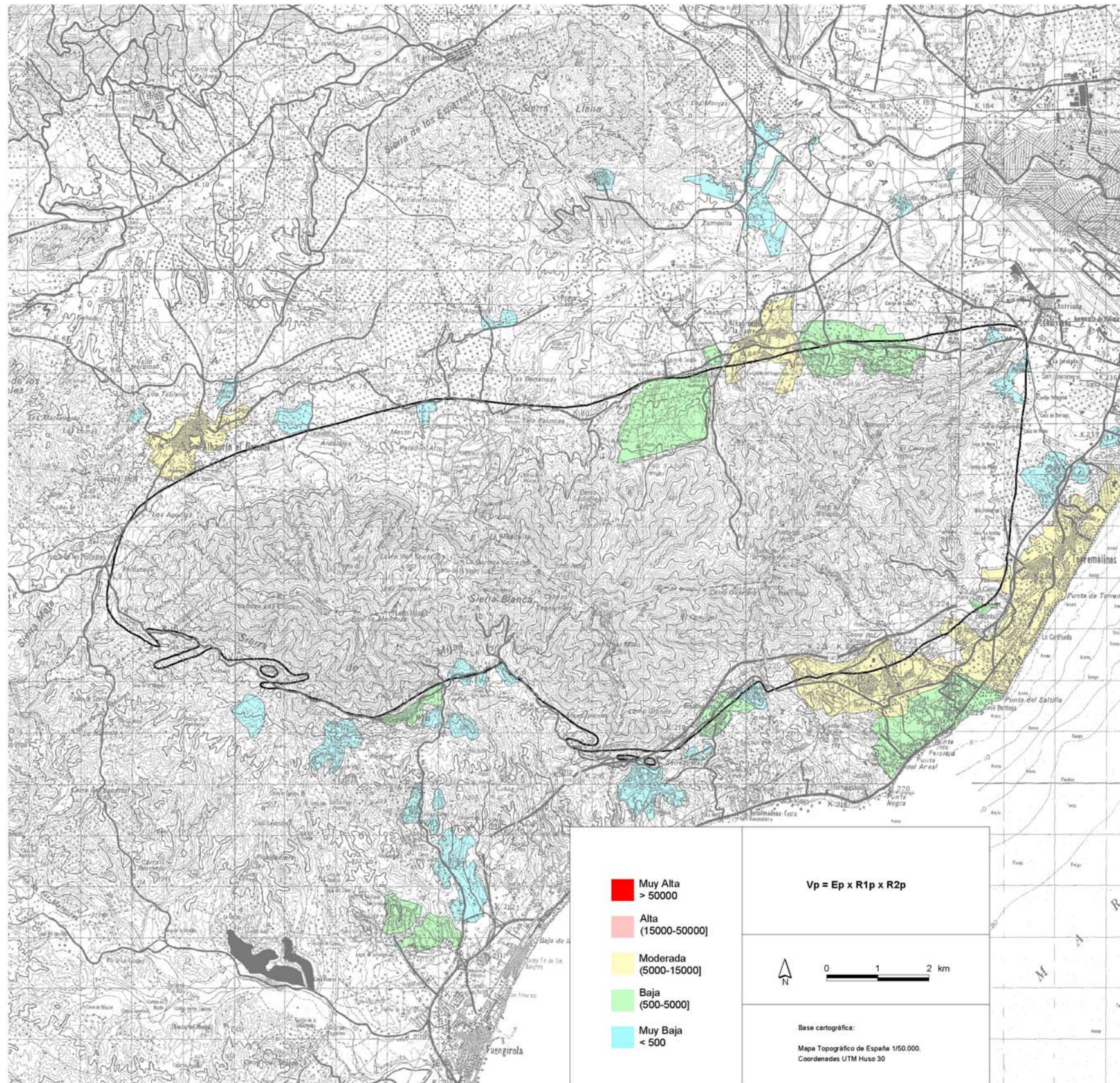
Autor: JESÚS Mª VÍAS MARTÍNEZ

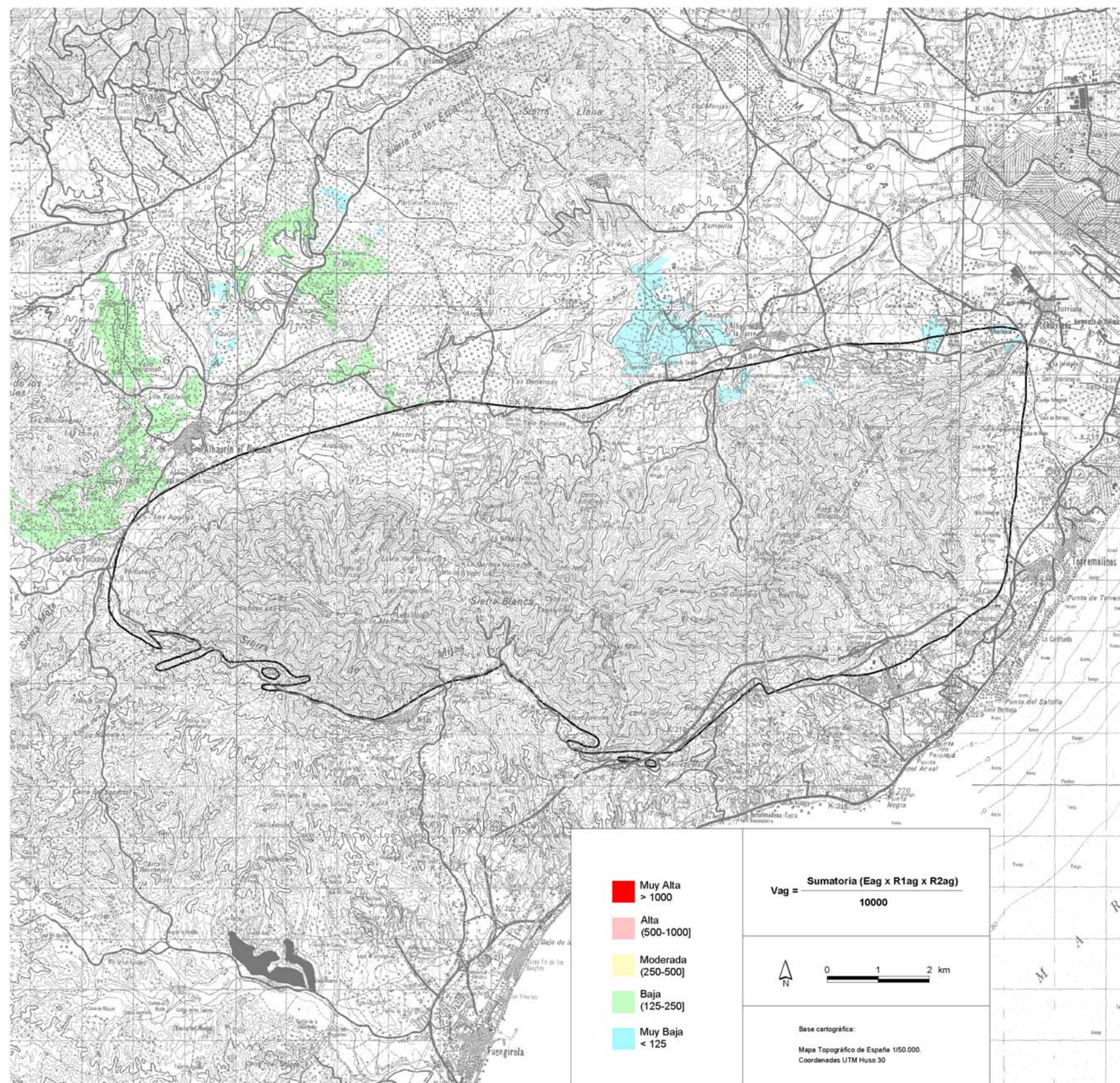
MAPA 6M

VULNERABILIDAD INTRÍNSECA SEGÚN EL MÉTODO COP.
ACUÍFERO DE LA SIERRA DE MIJAS

TESIS DOCTORAL: Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España







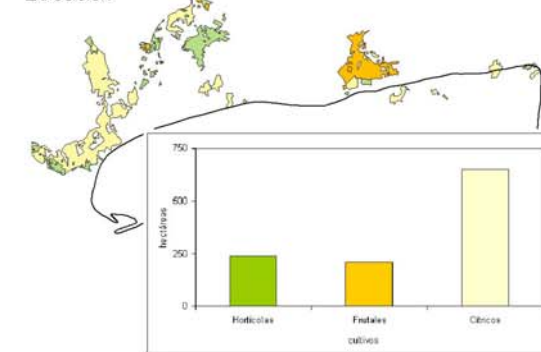
- Muy Alta (> 1000)
- Alta (500-1000)
- Moderada (250-500)
- Baja (125-250)
- Muy Baja (< 125)

$$V_{ag} = \frac{\text{Sumatoria (Eag x R1ag x R2ag)}}{10000}$$

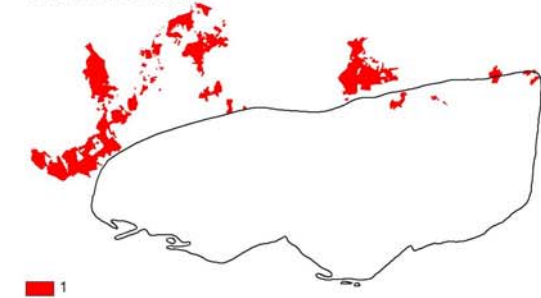


Base cartográfica:
 Mapa Topográfico de España 1/50.000.
 Coordenadas UTM Huso 30

FACTOR Eag
EXPOSICIÓN



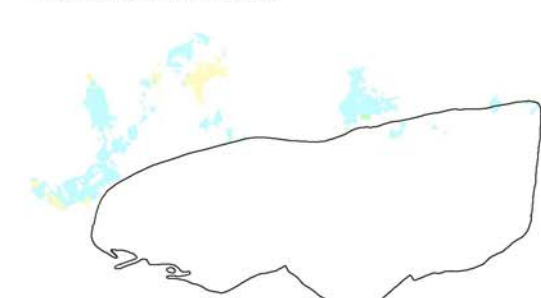
FACTOR R1ag
RESISTENCIA SEGÚN
TIPO DE ABASTECIMIENTO



■ 1



FACTOR R2ag
RESISTENCIA SEGÚN
CONDICIONES SOCIOECONÓMICAS



(10000-15000] (5000-10000] < 5000



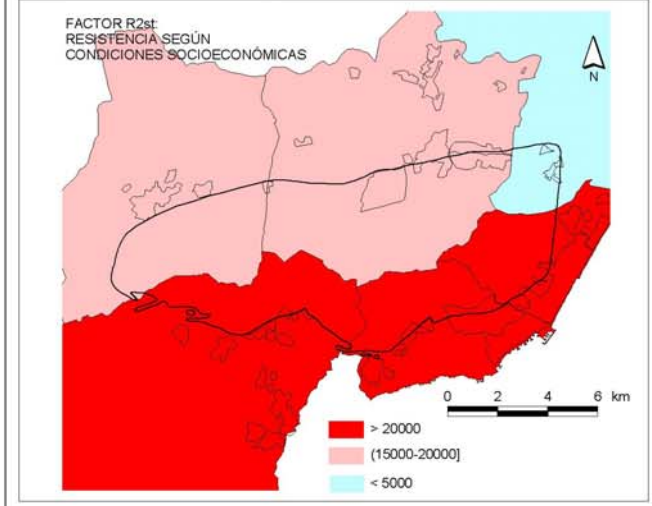
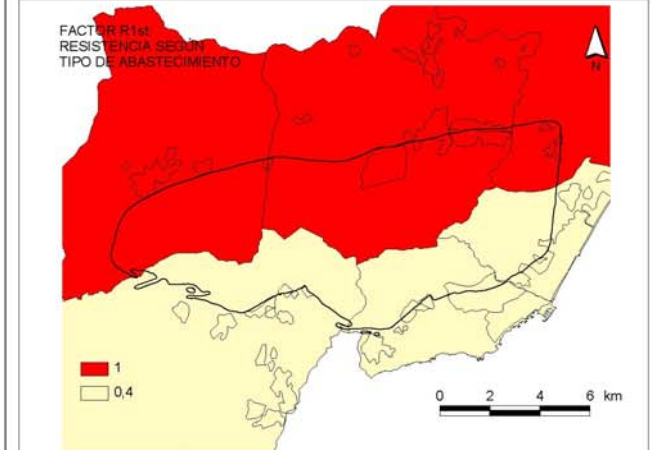
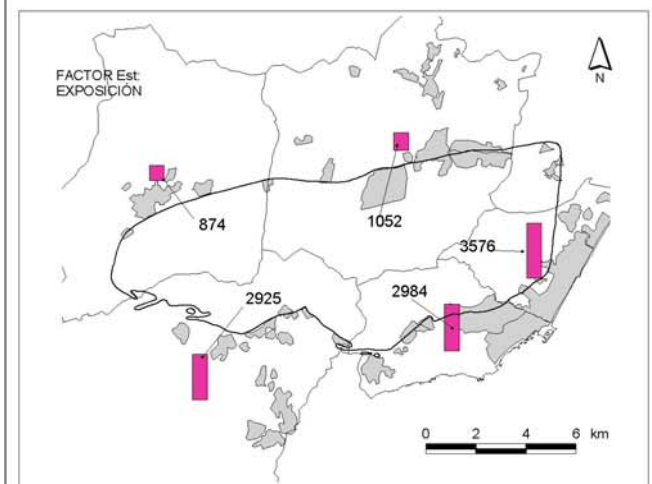
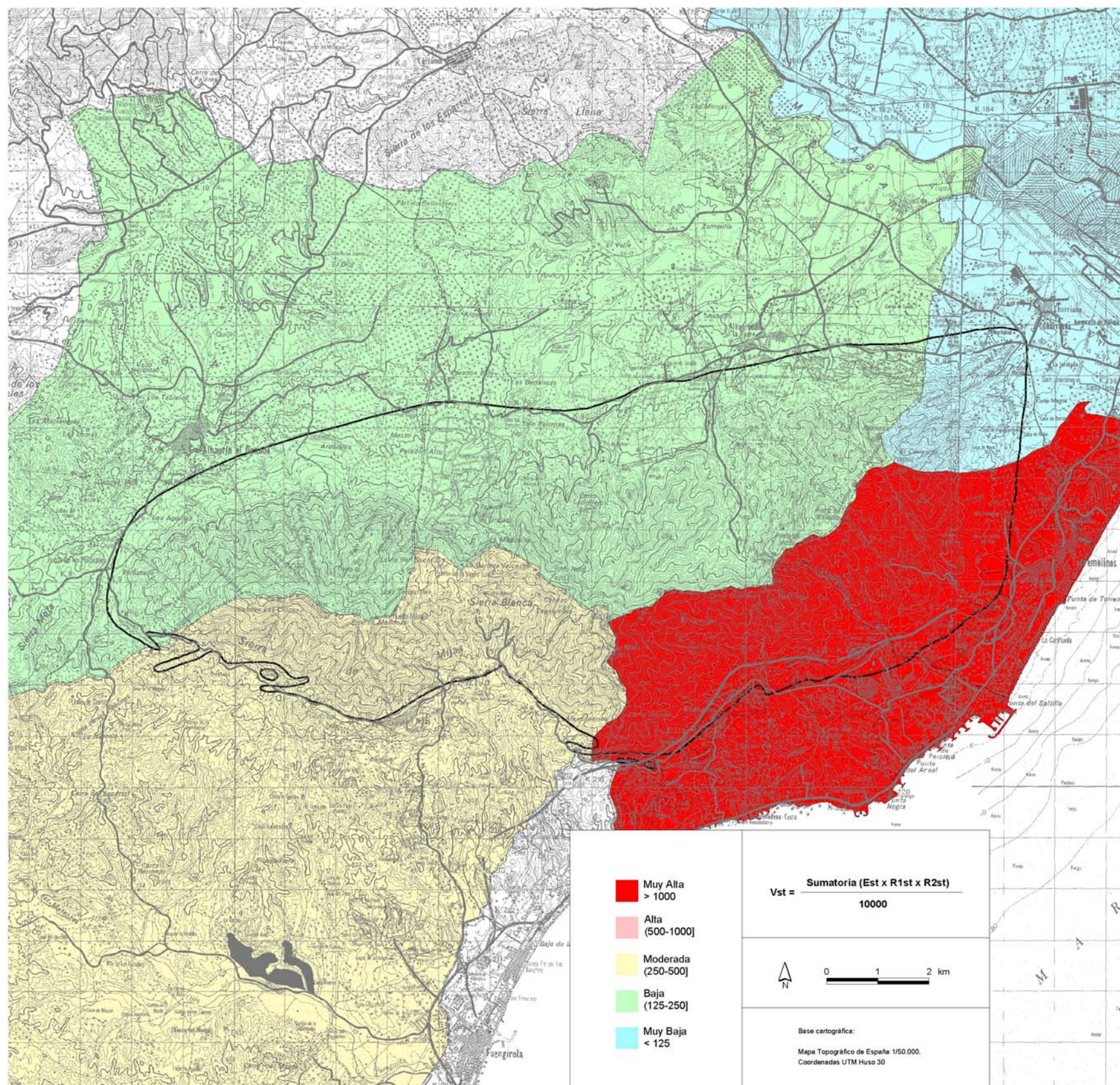
Autor: JESÚS M^o VÍAS MARTÍNEZ

MAPA 8M

VULNERABILIDAD DE LA ACTIVIDAD PRODUCTIVA:
 AGRICULTURA. ACUÍFERO DE LA SIERRA DE MIJAS

TESIS DOCTORAL:
 Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación
 de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España

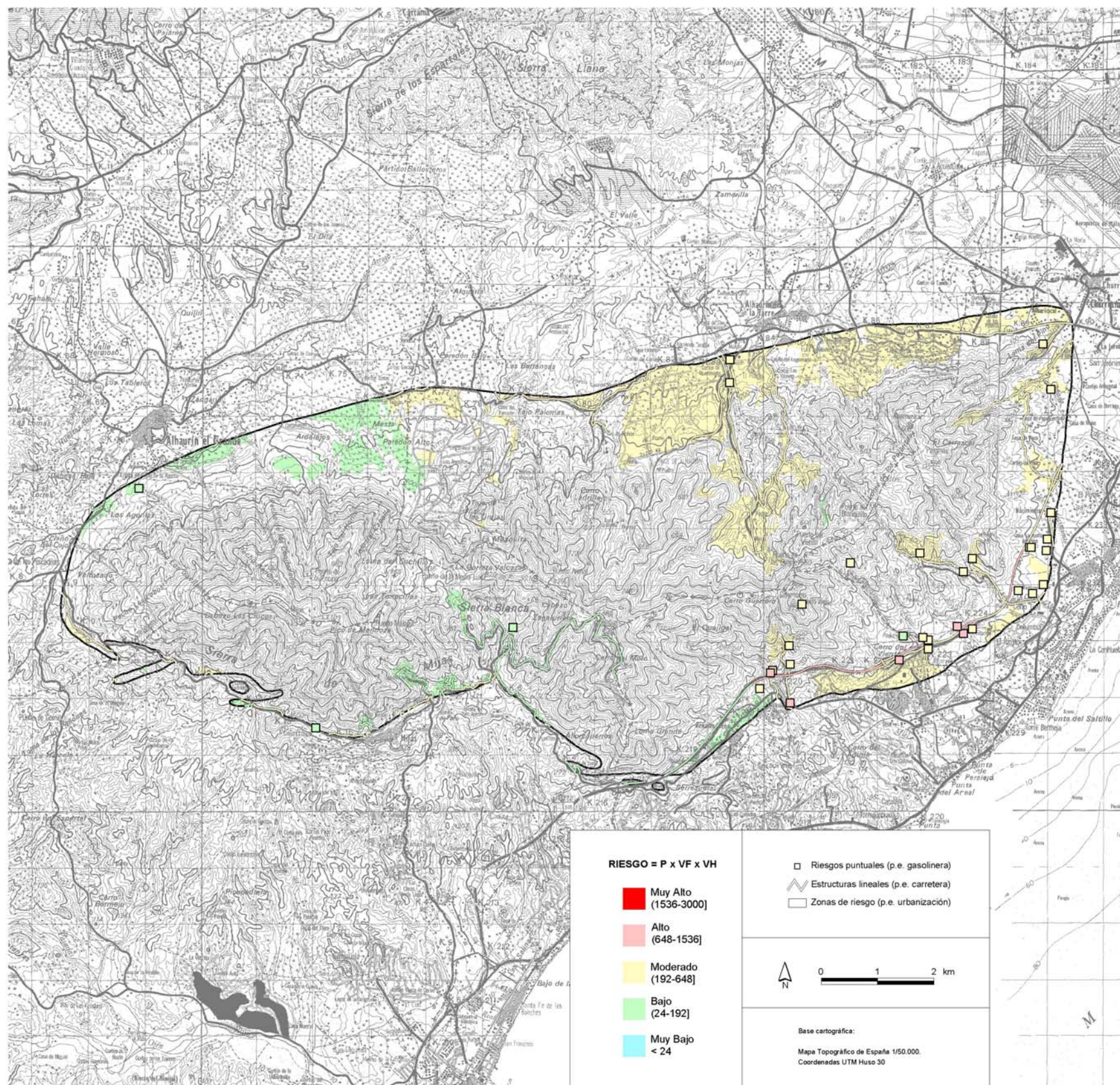




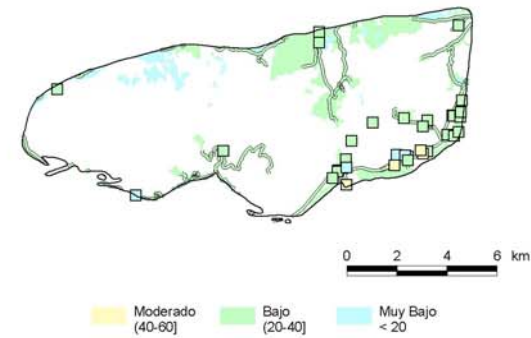
Autor: JESÚS M^o VÍAS MARTÍNEZ MAPA 9M

VULNERABILIDAD DE LA ACTIVIDAD PRODUCTIVA: HOSTELERÍA Y OTROS. ACUÍFERO DE LA SIERRA DE MIJAS

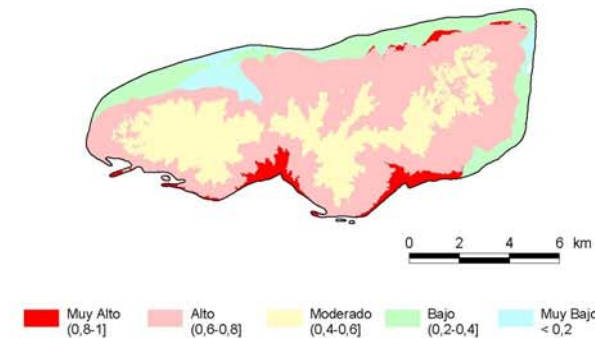
TESIS DOCTORAL:
Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España



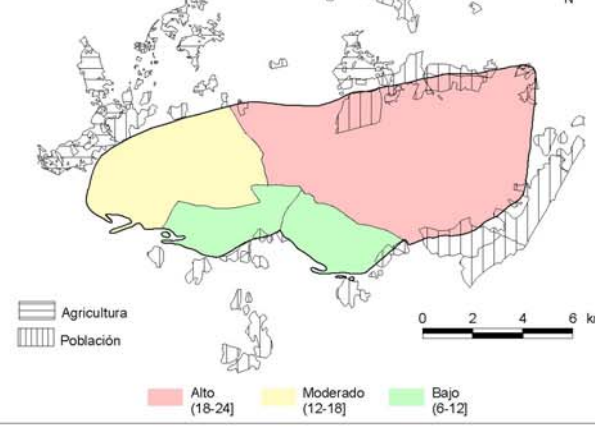
FACTOR P
 PELIGROSIDAD DE
 LAS ACTIVIDADES
 HUMANAS



FACTOR VF
 VULNERABILIDAD
 DEL ACUÍFERO



FACTOR VH
 VULNERABILIDAD DEL
 MEDIO HUMANO

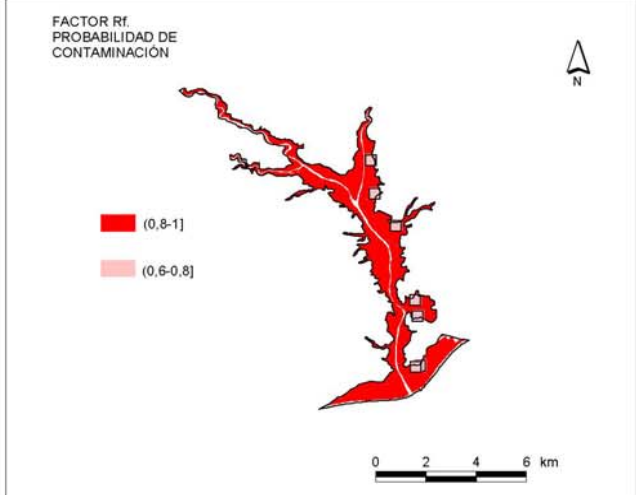
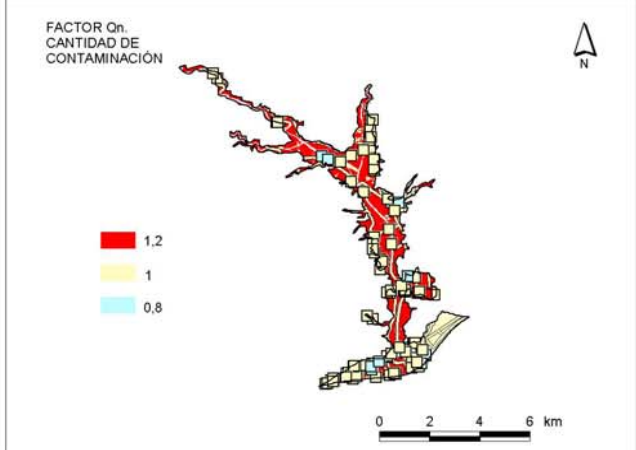
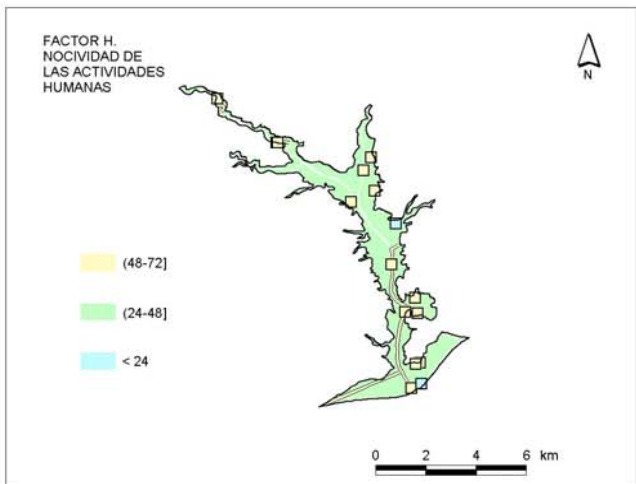
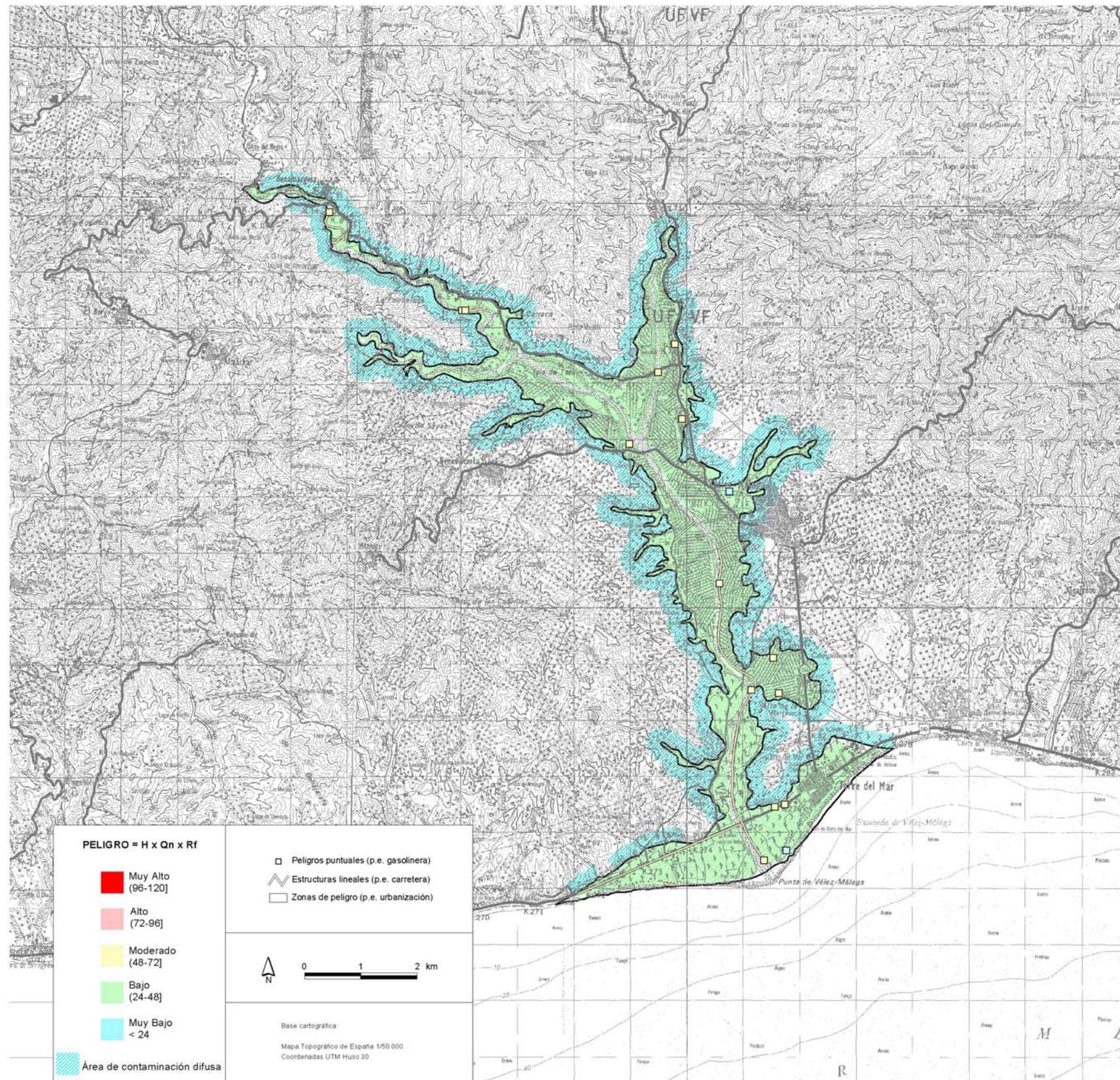


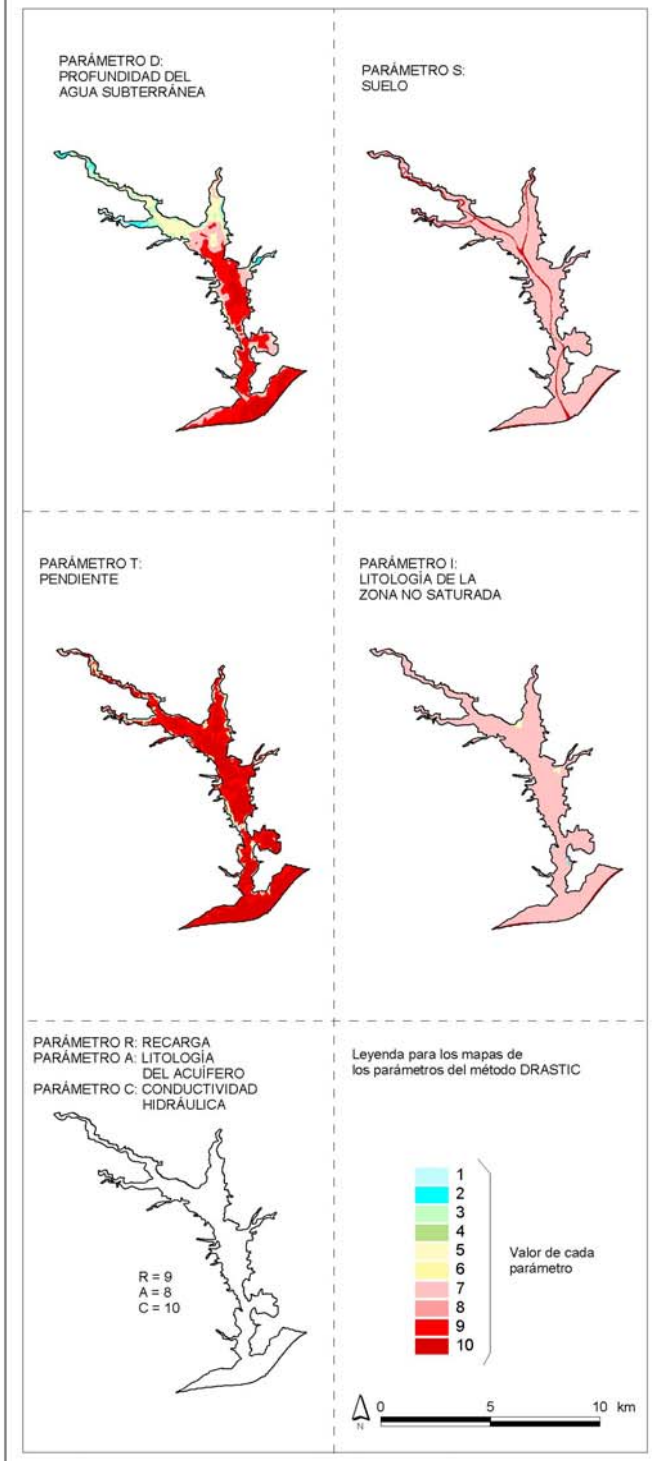
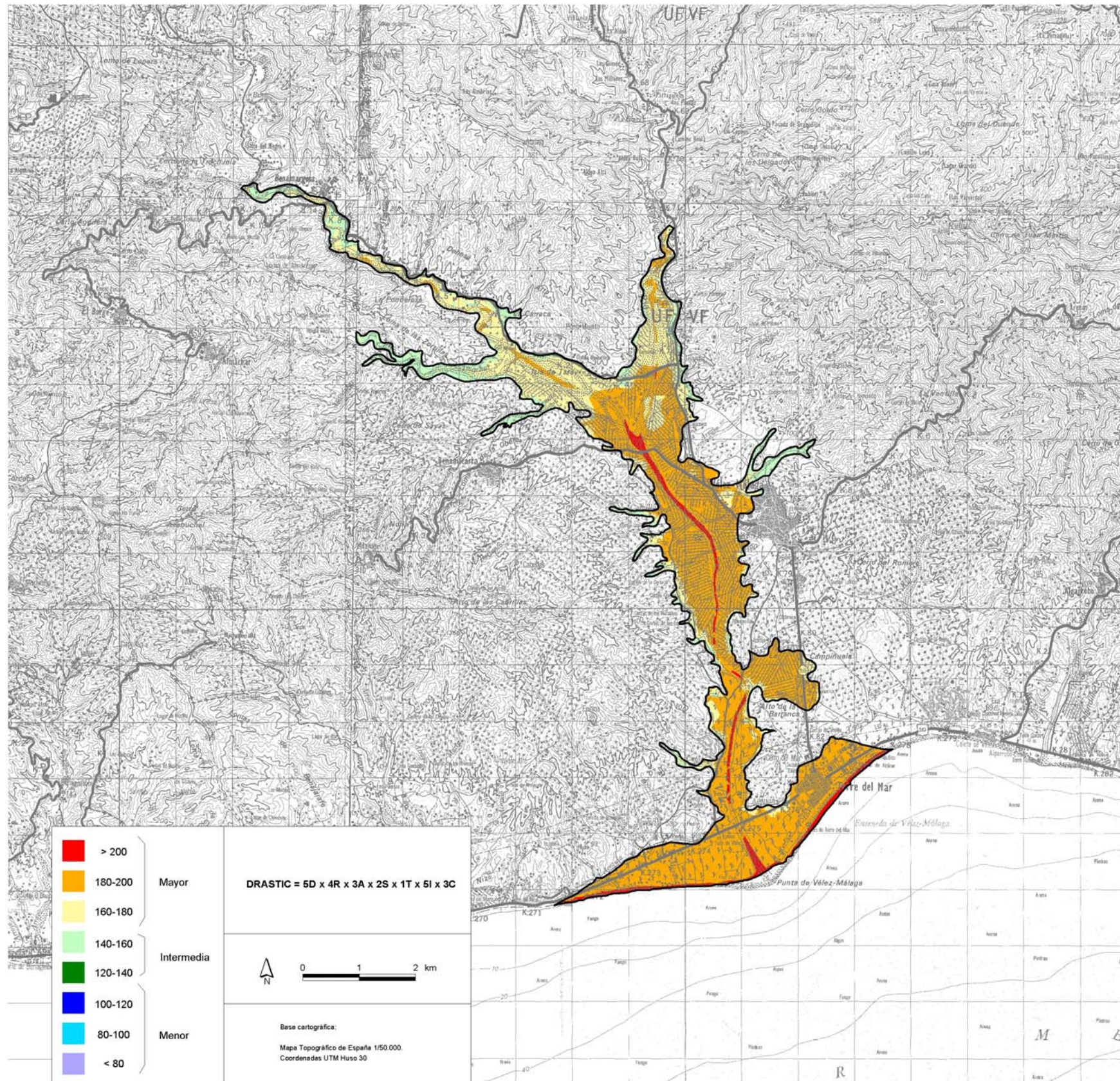
Autor: JESÚS M^a VÍAS MARTÍNEZ MAPA 10M

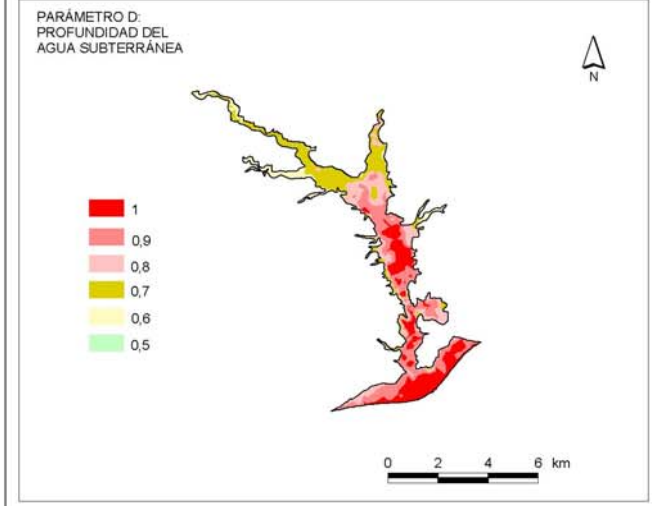
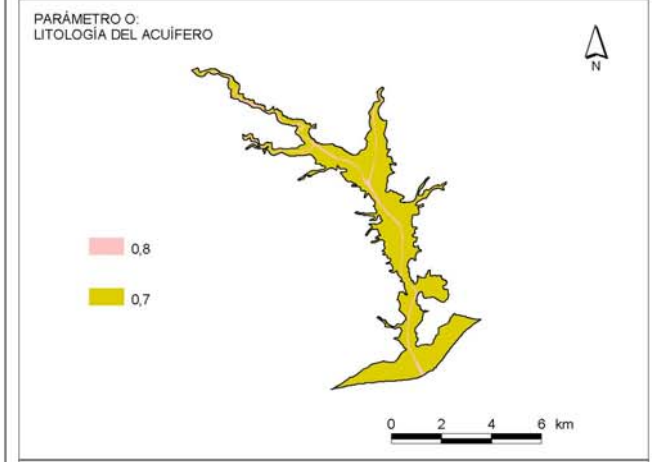
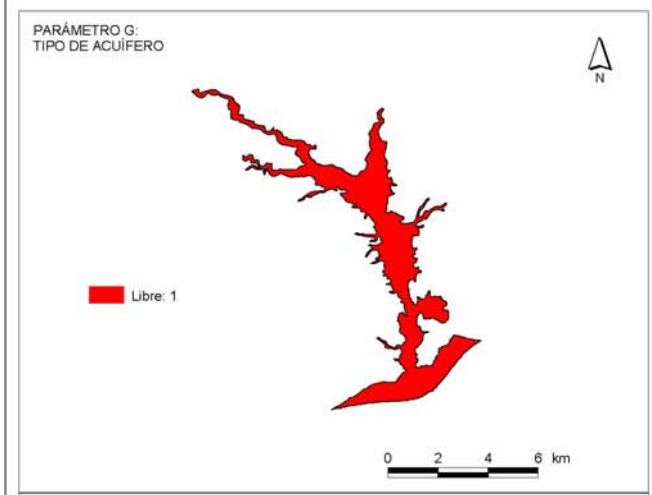
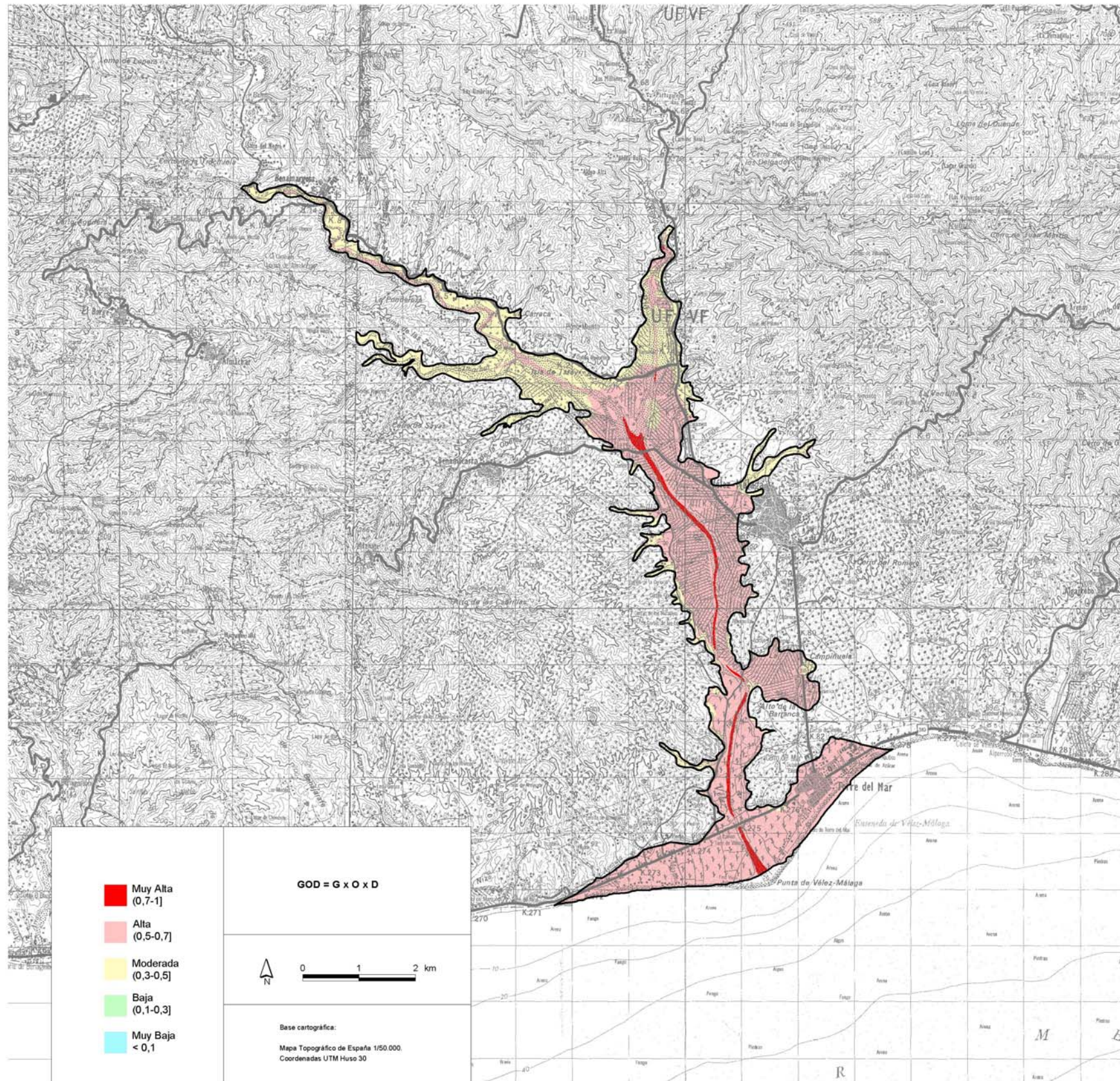
**RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.
 ACUÍFERO DE LA SIERRA DE MIJAS**

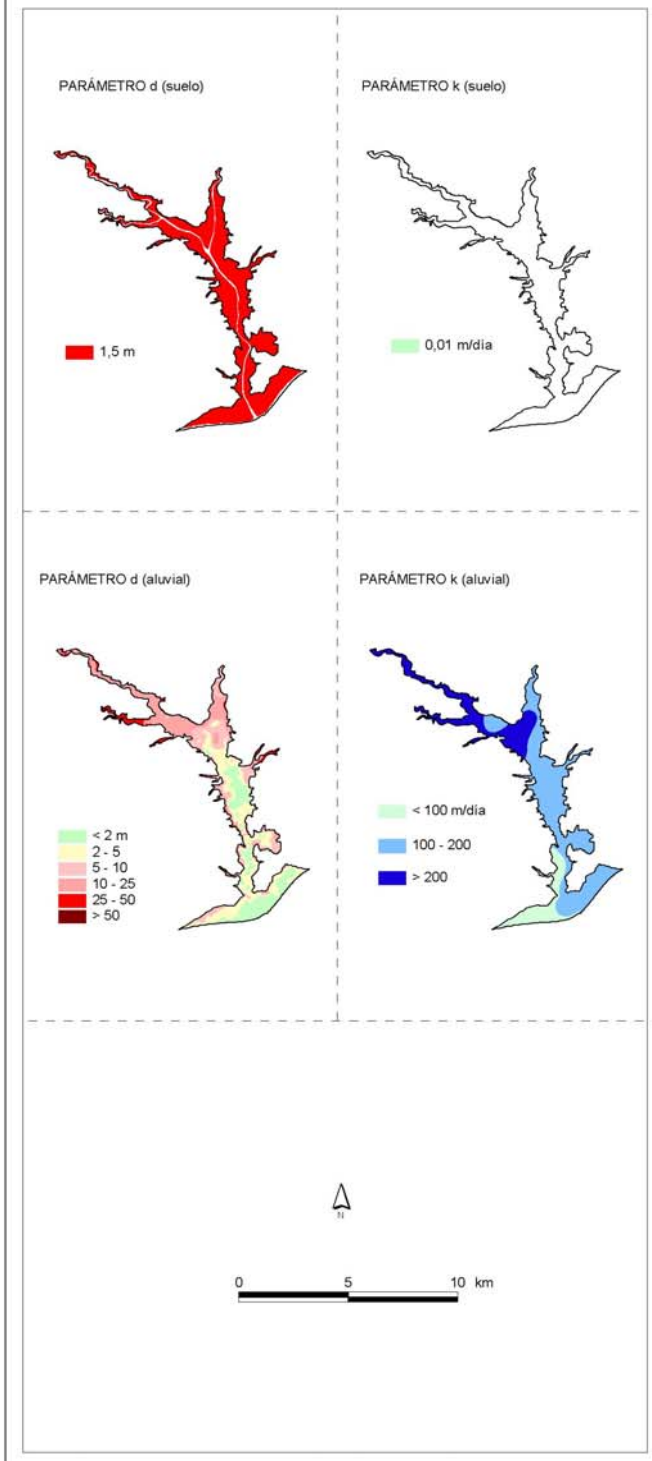
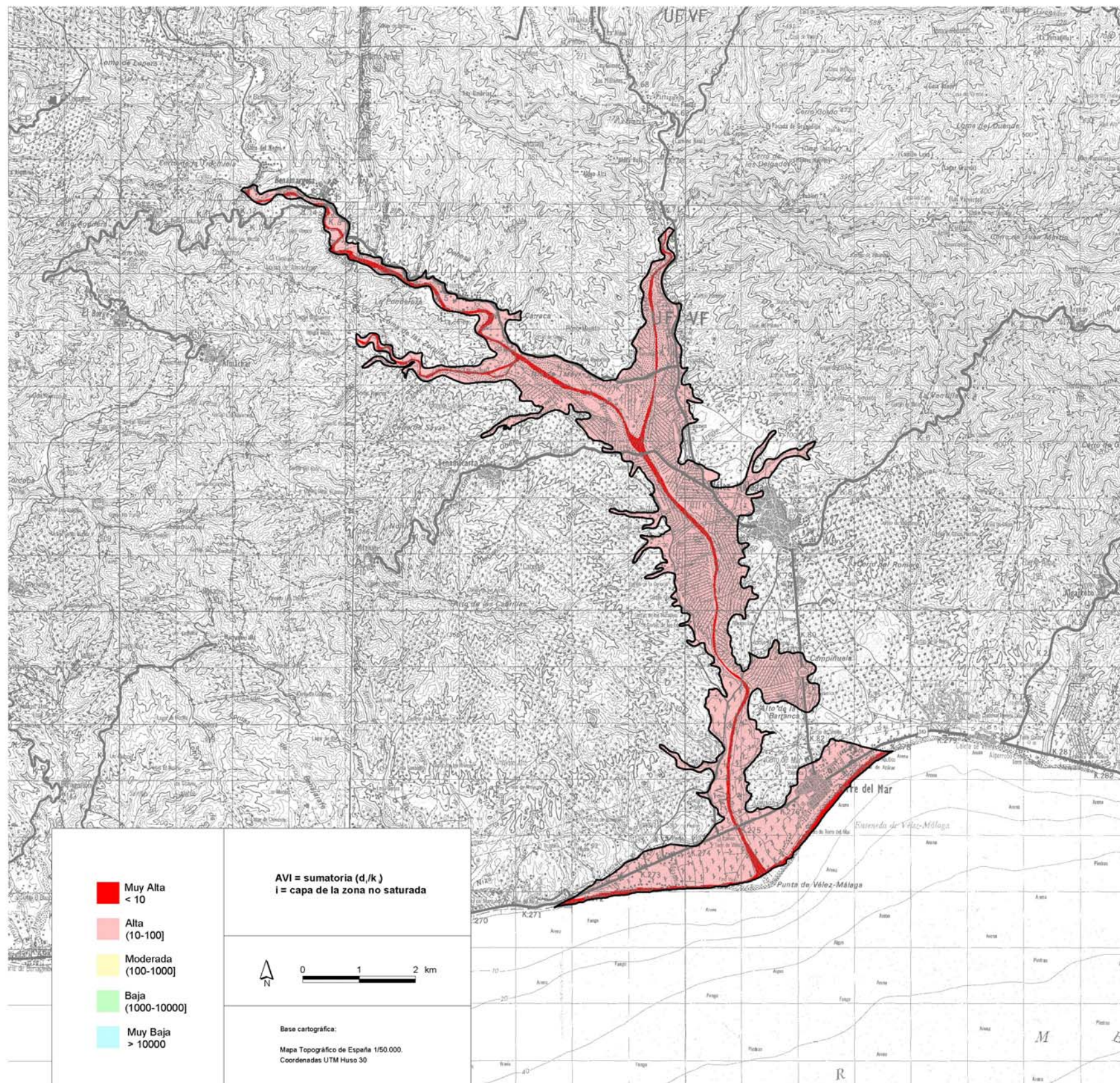
TESIS DOCTORAL:
 Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación
 de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España

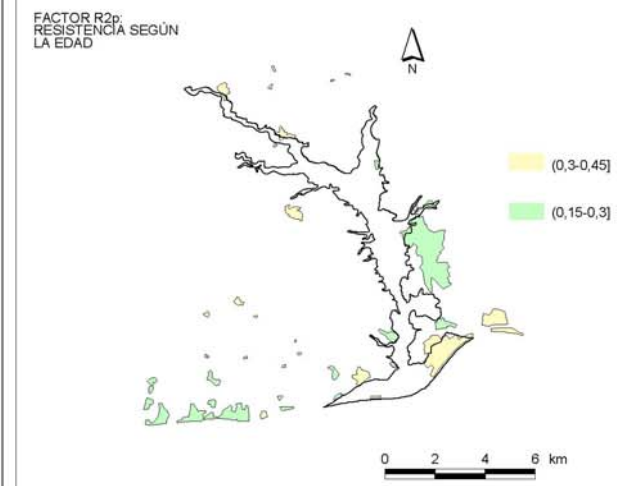
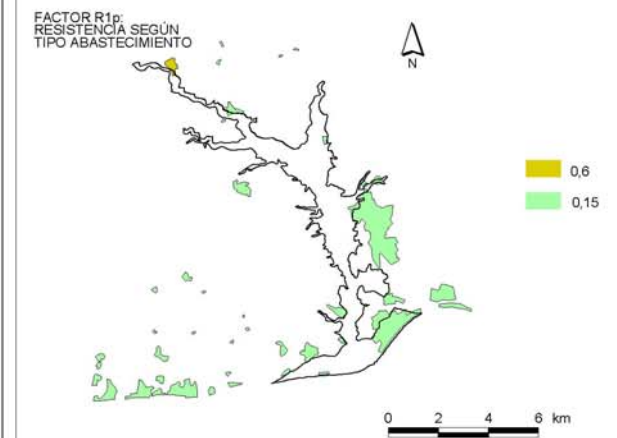
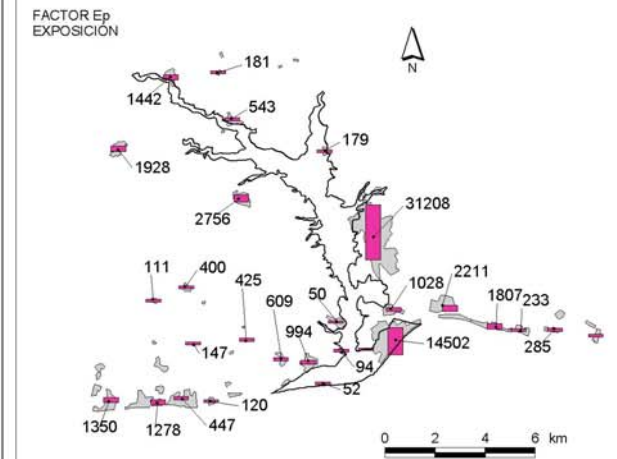
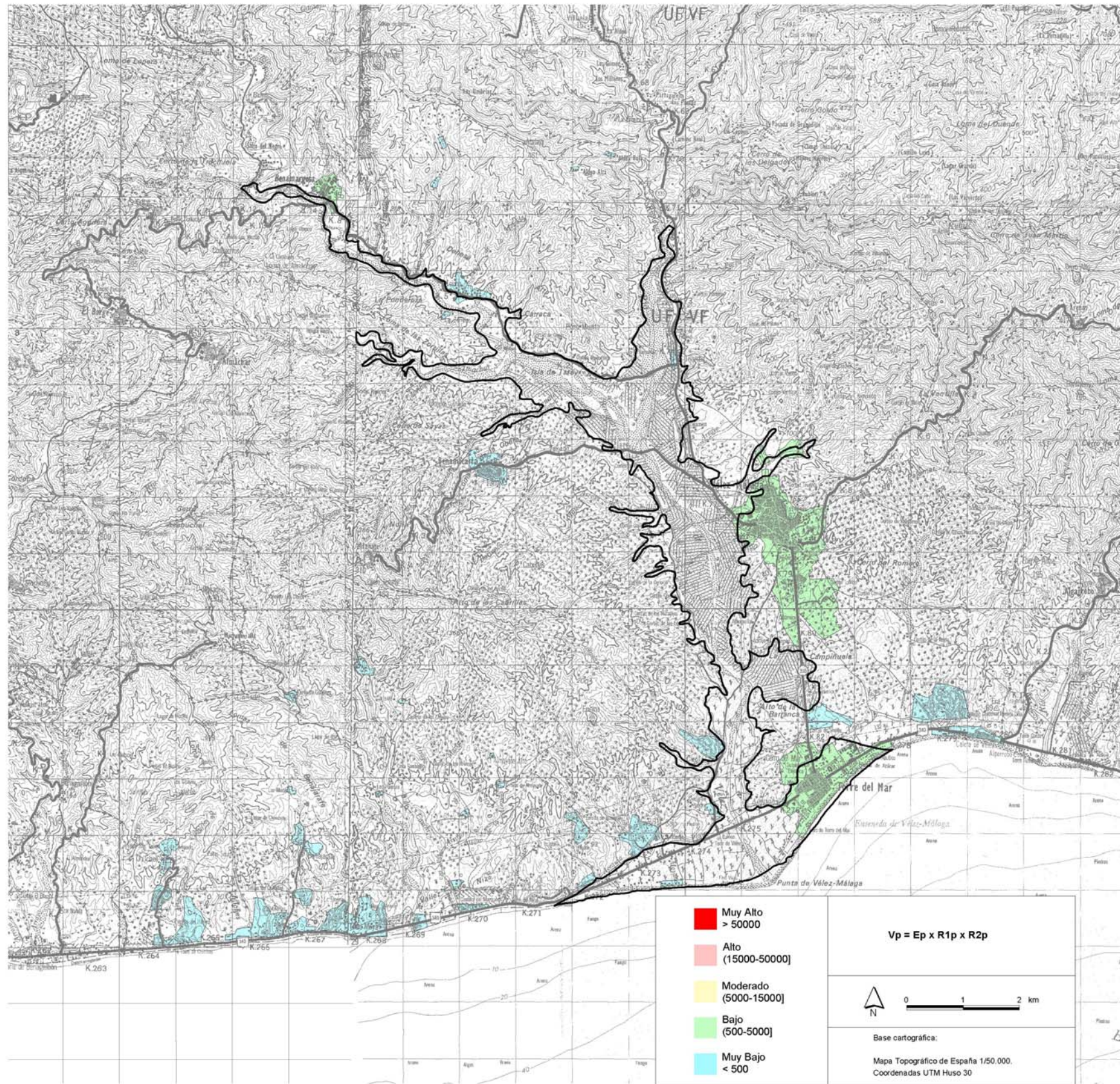


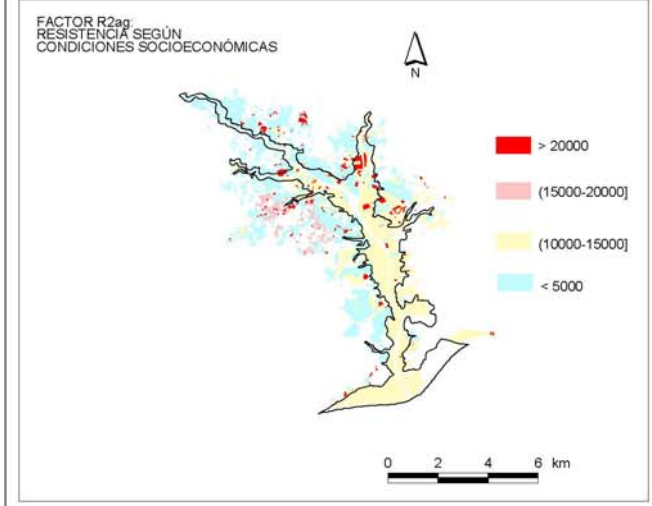
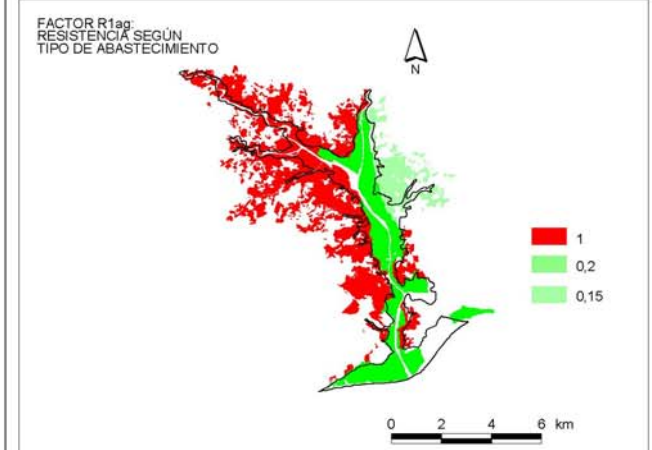
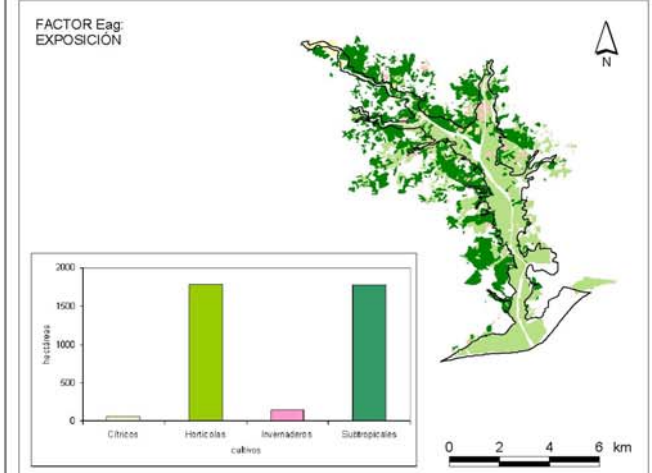
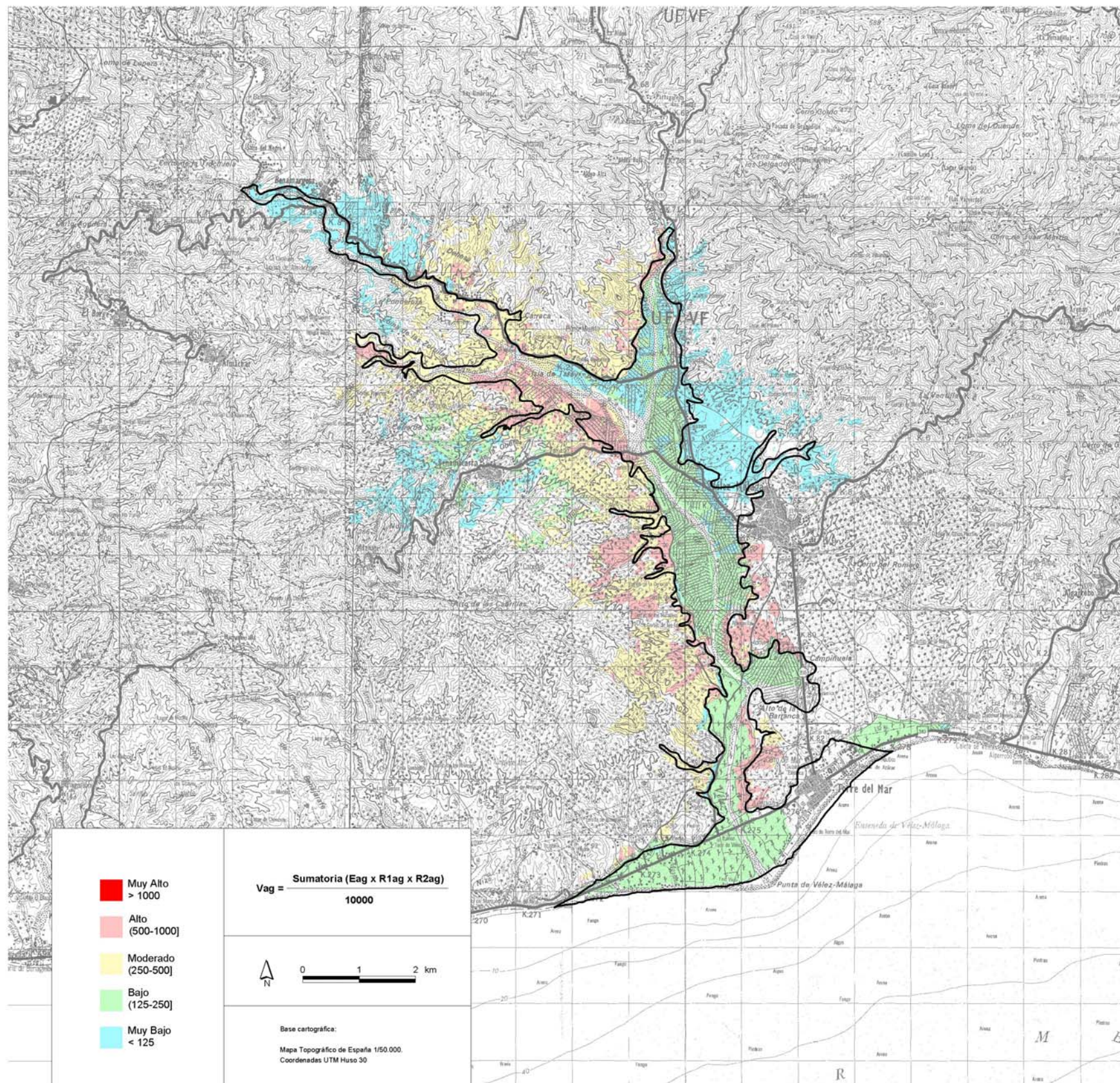


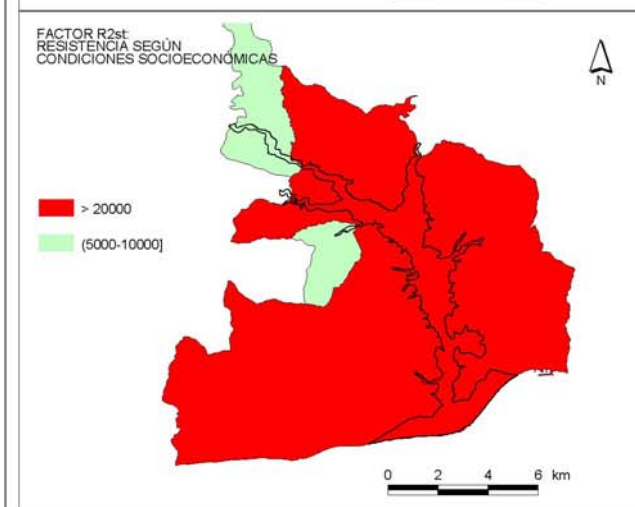
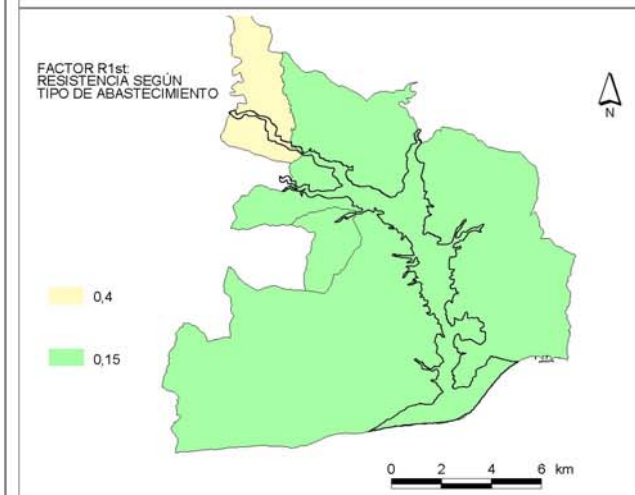
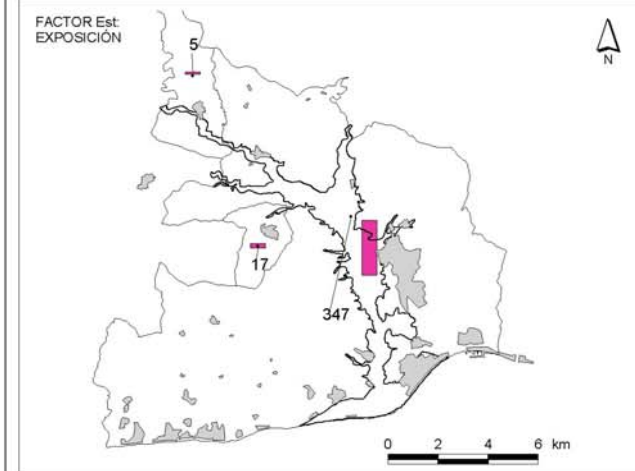
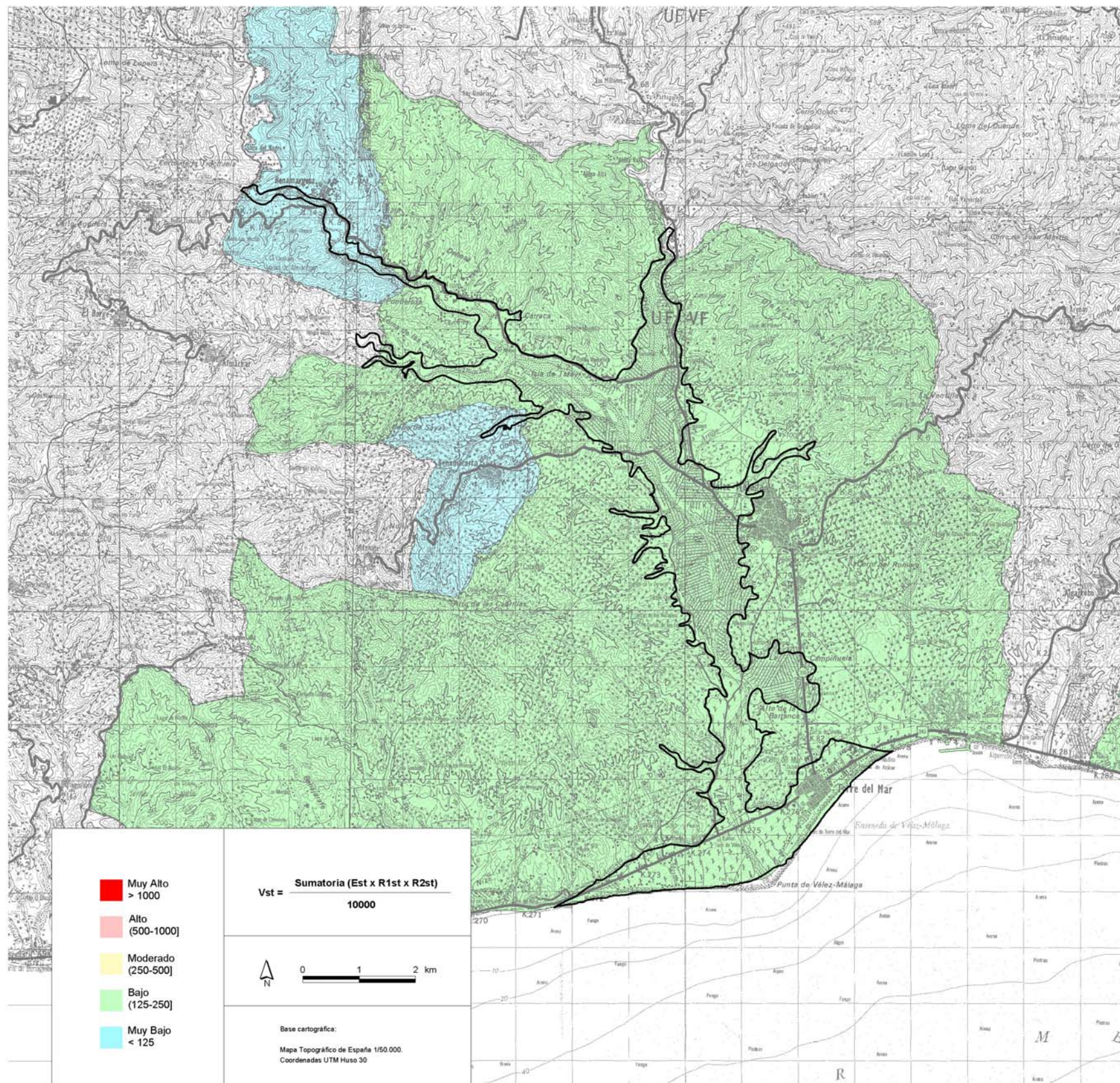








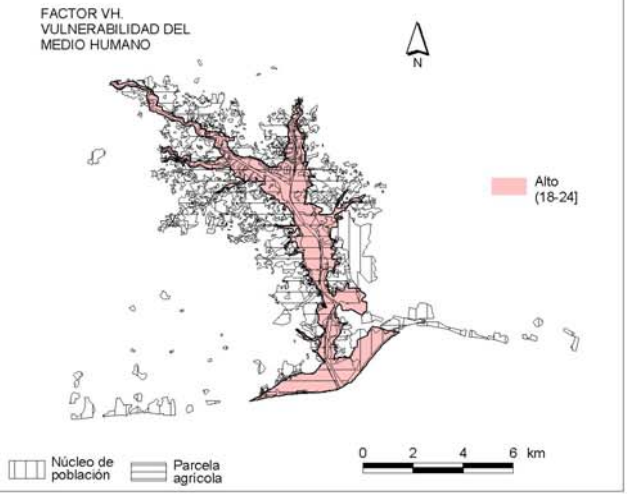
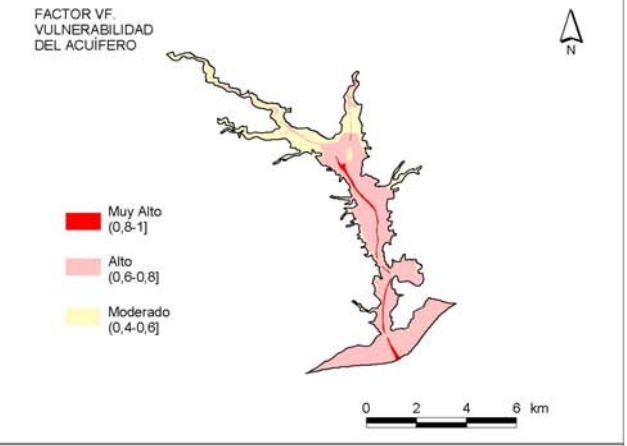
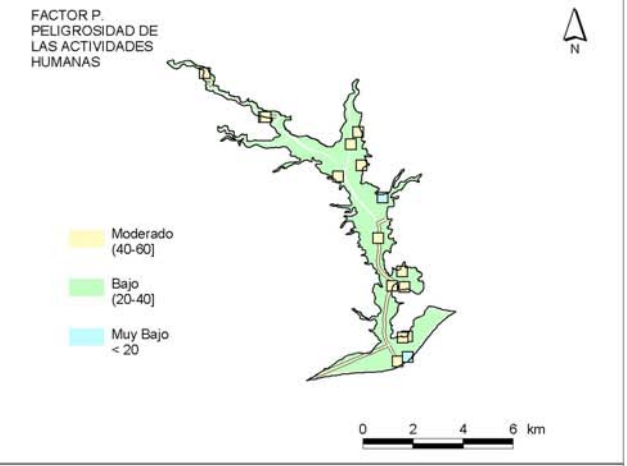
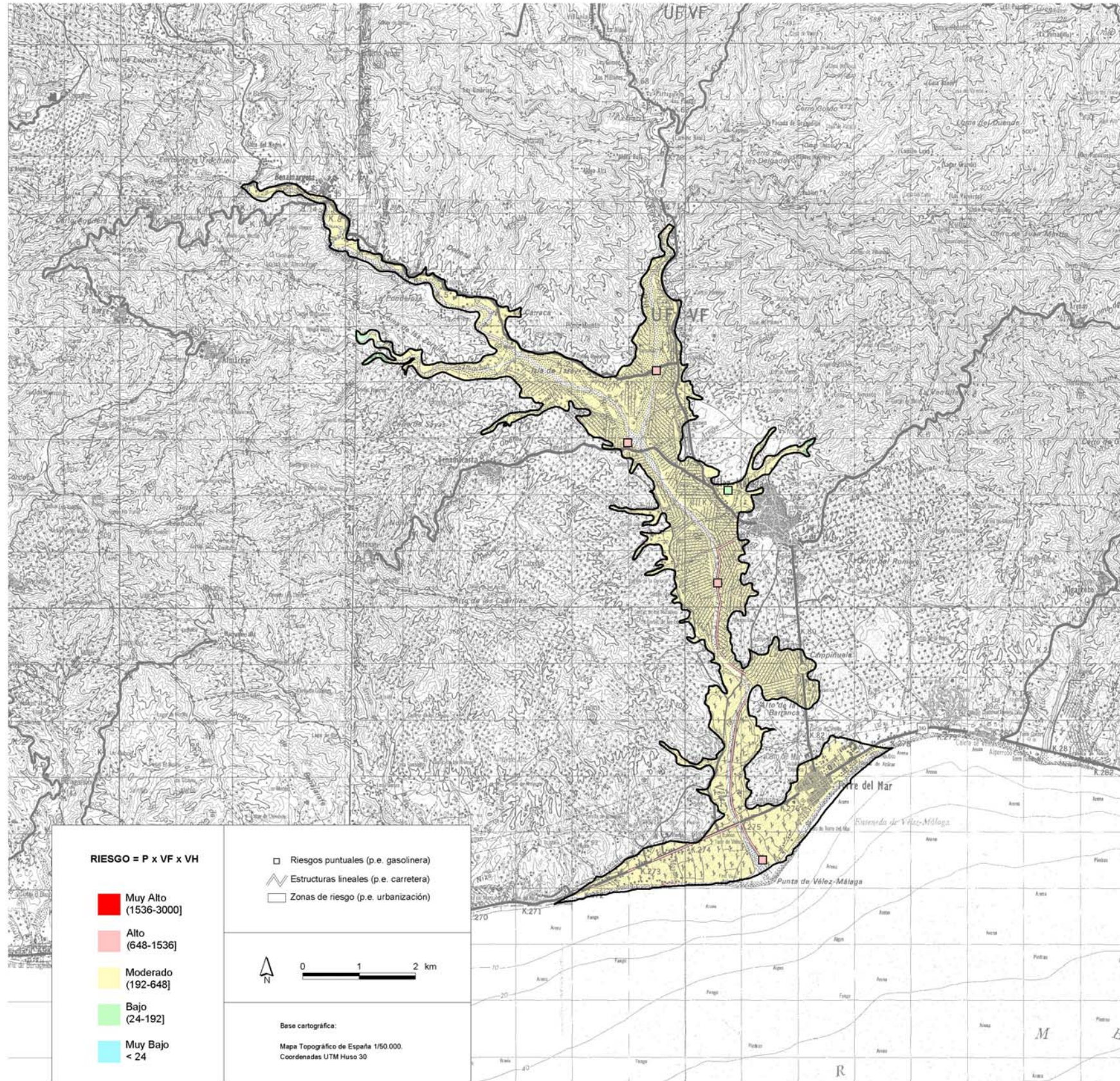




Autor: JESÚS M^º VIAS MARTÍNEZ MAPA 7V

VULNERABILIDAD DE LA ACTIVIDAD PRODUCTIVA: HOSTELERÍA Y OTROS. ACUÍFERO DEL RÍO VÉLEZ

TESIS DOCTORAL:
 Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España



Autor: JESÚS M^o VÍAS MARTÍNEZ

MAPA 8V

RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS. ACUÍFERO DEL RÍO VÉLEZ

TESIS DOCTORAL:
 Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España