

***IV. VULNERABILIDAD DE LOS RECURSOS
HIDROMINERALES FRENTE A LA
CONTAMINACIÓN***

IV.1. Planteamiento

***IV.2. Definición del índice de
vulnerabilidad***

IV.1. Planteamiento

Las aguas subterráneas, de igual modo que el resto de los recursos aprovechados por el hombre, son susceptibles de verse afectadas por fenómenos antrópicos, que pueden provocar cambios en sus características físico-químicas. Cuando se producen dichos cambios, se habla de un proceso de contaminación.

Debe destacarse que el medio físico, según su tipología, puede interactuar con los potenciales contaminantes de distinta forma, proporcionando una cierta defensa a las aguas subterráneas ante la acción de éstos. Es lo que se denomina *poder depurador* del terreno y se debe, principalmente, a la presencia de minerales de arcilla y a la existencia de materia orgánica en la zona no saturada.



Chircales (Valdepeñas de Jaén).

Esta facultad no es constante en la naturaleza, sino que varía de unas zonas a otras. Por ello, a finales de los sesenta, se introdujo el concepto de vulnerabilidad para expresar, de la forma más homogénea posible, el grado de protección que el terreno proporciona a las aguas subterráneas. Dicho concepto se basa en que algunos entornos tienen menor capacidad de atenuar o retener un posible contaminante vertido que otros.

El concepto de vulnerabilidad puede aplicarse de varios modos, dando lugar a dis-

tintas definiciones. Así, se denomina *vulnerabilidad intrínseca* a la accesibilidad hidráulica de la zona no saturada a la penetración de la polución (o de un contaminante genérico) y la capacidad de atenuación de dicha zona como resultado de la retención física o de la reacción de los contaminantes con el terreno. Por otro lado, se define como *vulnerabilidad específica* aquella que, además de considerar los factores anteriores, viene condicionada por los atributos y el comportamiento de contaminantes individualizados.

En el presente documento se considera la valoración de la *vulnerabilidad intrínseca* de las captaciones inventariadas con el fin de diferenciar aquellas que por su ubicación y naturaleza precisen estudios y controles más detallados para garantizar su protección. Para ello, deben tenerse en cuenta todos aquellos factores que determinan la vulnerabilidad del terreno. Dichos factores pueden clasificarse según su importancia:

Factores principales: Son los de mayor peso a la hora de valorar la vulnerabilidad, debido a su elevada importancia en los procesos que determinan directamente la cantidad y características del contaminante que podría llegar a contaminar un acuífero. Dichos factores son los siguientes:

- **Recarga:** En la mayoría de los casos ésta es la vía de entrada del contaminante; es por ello que el balance de agua que entra en el acuífero se considera como uno de los factores primordiales en la valoración de la vulnerabilidad.
- **Suelo:** La capa más superficial de la corteza terrestre es el primer obstáculo físico que se encuentra todo contaminante en su camino de incorporación al acuífero. En dicha capa tienen lugar un conjunto de procesos que afectarán tanto a la cantidad como a las características de las sustancias que lo atraviesan, que dependerán de las características del suelo (textura, humedad, composición,...), por lo que su importancia a la hora de valorar la vulnerabilidad debe considerarse como elevada.

- **Zona no saturada:** La zona no saturada se define como la porción de terreno que se extiende entre el suelo y la zona saturada. Sus características (fundamentalmente su litología, espesor y permeabilidad vertical) van a determinar como se mueve el contaminante a través de ella, y los procesos que tendrán lugar durante dicho tránsito hasta alcanzar el acuífero.
- **Zona saturada:** Una vez que el contaminante alcanza el acuífero, comienza a extenderse por el mismo. Este fenómeno se verá limitado por sus características (litología, permeabilidad, modelo de flujo, dirección del mismo,...), y con él los posibles daños que dicho contaminante pueda provocar.

Factores secundarios: Estos factores, a pesar de que su importancia sea menor, no deben desestimarse, pues influyen en el proceso de contaminación del acuífero. Entre ellos puede destacarse la topografía, la geología del entorno, la existencia de intrusiones salinas o fases acuosas de distinta densidad al agua del acuífero, las actividades antrópicas en la zona, etc.

Una vez identificados los factores a considerar, la forma más objetiva de valorar la vulnerabilidad consiste en la definición de índices adimensionales, de mayor o menor complejidad, en los que dichos factores son tenidos en cuenta y se les asigna un peso variable que dependerá de la importancia que presenten los factores dentro del ámbito que se pretende estudiar.



Fuente Higuera (Martos).

IV.2. Definición del índice de vulnerabilidad

Para valorar la vulnerabilidad se pueden seguir diversas metodologías. Éstas se eligen en función de distintos factores: la fisiografía del área de estudio, cantidad y fiabilidad de la información disponible, y objetivo que se pretende alcanzar.

Entre las técnicas que permiten evaluar la vulnerabilidad, se ha seleccionado la de *Sistemas de intervalos*. Este grupo de índices considera los parámetros seleccionados de forma que su variación es dividida en intervalos. A cada uno de éstos, le corresponde un valor numérico que representará el valor del parámetro con-

siderado a la hora de calcular el índice final de vulnerabilidad. Uno de los índices más interesantes que sigue esta técnica para determinar la vulnerabilidad es el conocido por el acrónimo **GOD** (Foster, 1987). En él, se consideran por separado tres parámetros (tipo de acuífero, litología-permeabilidad, y profundidad del nivel freático), cada uno de los cuales es valorado numéricamente, de forma que el producto de los mismos nos dará el valor final del índice. Para ello se define en cada factor un conjunto de intervalos dentro de los cuales el valor asignado por el índice para ese factor es constante. El valor final del índice de vulnerabilidad corresponde al producto de los valores de

cada uno de los parámetros considerados. Una vez obtenido éste, se compara con los intervalos definidos por el autor, los cuales nos darán una clasificación cualitativa de la vulnerabilidad.

El índice **GOD** se ha considerado como el más apropiado para el análisis de las captaciones hidrominerales de una región tan diversa hidrogeológicamente como la estudiada, ya que permite obtener una clasificación cualitativa de su vulnerabilidad a escala local (la captación y su entorno hidrogeológico inmediato) sin que la calidad del resultado final se vea afectada ni por la disponibilidad previa de información ni por las particularidades de las áreas geográficas a las que se aplique. La aplicación del índice **GOD** requiere la determinación de 3 parámetros denominados G, O y D.

- **G** representa la tipología del acuífero considerado y toma los valores 1; 0,4 y 0,2 según que el acuífero se clasifique como libre, semiconfinado o confinado. La asignación de valores del parámetro se ha realizado a partir del conocimiento de la hidrogeología local.
- **O** refleja la naturaleza y permeabilidad de la litología acuífera, considerando fundamentalmente la litología y el grado de consolidación de los materiales. En esta labor se ha partido de la cartografía geológica existente, complementada con la bibliografía disponible. El valor del parámetro O resultante oscila entre 0,4 (correspondiente a suelos arcillosos residuales) y 1 (que equivale a calizas fisuradas y/o karstificadas). Otras litologías como rocas

metamórficas, conglomerados, arenas y margas, reciben una valoración intermedia.

- **D** refleja la profundidad del nivel piezométrico o, en el caso de acuíferos confinados, del techo de la capa acuífera. Para estimar el valor correspondiente a cada punto, se ha analizado el inventario de puntos de agua y los mapas de piezometría realizados en las áreas estudiadas, así como la información sintetizada sobre el entorno hidrogeológico de cada punto. Las profundidades consideradas se dividen en 7 intervalos que oscilan entre menos 2 m y más de 100 m, y el valor correspondiente del parámetro D varía entre 0,4 y 1.

El producto de los parámetros **G, O y D** da resultados numéricos del índice de vulnerabilidad $-I_{GOD}$ comprendidos entre 0 y 1. El rango de variación del índice se divide en 5 intervalos que proporcionan una clasificación cualitativa de la vulnerabilidad de cada captación:

$I_{GOD} < 0,1$: MÍNIMA.

I_{GOD} entre 0,1 y 0,3: BAJA.

I_{GOD} entre 0,3 y 0,5: MODERADA.

I_{GOD} entre 0,5 y 0,7: ALTA.

$I_{GOD} > 0,7$: EXTREMA.

Conviene recordar que se han considerado únicamente las características intrínsecas del acuífero en las zonas estudiadas, sin que el factor humano se haya valorado. Sin embargo, como es sobradamente conocido, las prácticas antrópicas pueden inducir variaciones en las características hidráulicas del acuífero

que hagan variar sensiblemente la vulnerabilidad obtenida.

En la aplicación de dicho protocolo se ha realizado en primer lugar *una valoración general de la vulnerabilidad de las unidades hidrogeológicas implicadas*. Dicha valoración no ha tenido en cuenta las variacio-

nes internas dentro de las mismas, pues habría precisado de un volumen de información mayor, sino que ha partido de lo que podríamos denominar “situación media”, extrapolándose a toda la unidad las condiciones que imperan en los puntos más representativos o mejor estudiados de la misma.



Fuente del Parque (Bélmez de la Moraleda).

Finalmente, se ha aplicado el índice a los entornos inmediatos de las captaciones o grupos de captaciones considerados y a sus ámbitos locales de influencia hidrogeológica, que son el objetivo último de la vulnerabilidad. La aplicación del mismo se ha basado en el análisis de la información bibliográfica y cartográfica disponible, con atención especial a la cartografía

geológica e hidrogeológica de detalle (fundamentalmente a escala 1:50.000), así como a los inventarios de puntos de agua y a los datos de piezometría.

En el Cuadro 7 se incluye la vulnerabilidad del entorno de los puntos de interés hidromineral.

Nº	Denominación	Nº inventario IGME	Naturaleza	Municipio	UTMX	UTMY	Cota	Vulnerabilidad
1	Fuente de San José	193540005	Pozo	Santa Elena	449840	4242990	670	MODERADA
2	Fuente de la Salud	193540006	Pozo	Santa Elena	448917	4242178	645	MODERADA
3	Fuente de la Encina	183670028	Pozo	Andújar	417050	4211175	235	MÍNIMA
4	Fuencaliente de Canena	203650001	Manantial	Canena	457175	4211400	470	MÍNIMA
5	Fuente La Hontana	183970025	Manantial	Castillo de Locubín	416300	4154200	620	MÍNIMA
6	Fuente de Encina Hermosa	183970026	Manantial	Castillo de Locubín	412160	4158170	780	ALTA
7	Virgen de las Mercedes	194010022	Manantial	Frailles	425715	4148645	920	BAJA
8	La Ribera	194010031	Manantial	Frailles	425765	4148620	915	BAJA
9	Baños de Fuente Álamo	184020007	Manantial	Alcalá la Real	409155	4147280	700	BAJA
10	Baños de Jabalcuz	193850004	Manantial	Jaén	427970	4177200	750	ALTA
11	Fuente Agria	173680017	Manantial	Marmolejo	395440	4212720	178	BAJA
12	Baños de Agua Hedionda. Fte. Floja	183870014	Manantial	Martos	416750	4171580	695	MÍNIMA
13	Pilar Viejo	193540008	Manantial	La Carolina	449165	4237840	587	MODERADA
14	Agua Apestosa	213820005	Sondeo surgente	Huesa	494110	4178770	700	MÍNIMA
15	Fuente del Ochovo	193540013	Pozo	La Carolina	448010	4237020	611	BAJA
16	Fuente del Saladillo	213670037	Manantial	Villacarrillo	499060	4213900	480	BAJA
17	Baños de Agua Hedionda. Fte. Fuerte	183870041	Manantial	Martos	416785	4171690	710	MÍNIMA
18	Cortijo de San Luis	193650001	Sondeo	Jabalquinto	431800	4209390	248	MÍNIMA
19	Los Moñicos	203710017	Manantial	Baeza	457900	4203000	525	MODERADA
20	Fuente Gallego	203710013	Pozo	Baeza	458720	4202700	505	MODERADA
21	La Herrumbrosa	193540007	Manantial	Santa Elena	449665	4242760	665	MODERADA
22	Baños de Lorenzo Vázquez	193940012	Manantial	Cambil	452950	4166450	790	MÍNIMA
23	Fuente del Espino	183960026	Pozo	Alcaudete	404125	4157810	565	BAJA
24	Venta Quemada	183520001	Manantial	Andújar	404700	4234675	610	MODERADA
25	Fuentepinilla (1)	223550007a	Manantial	Beas de Segura	516150	4232800	840	EXTREMA
26	Fuentepinilla (2)	223550007b	Manantial	Beas de Segura	516150	4232800	840	EXTREMA
27	Fuentepinilla (3)	223550007c	Manantial	Beas de Segura	516150	4232800	840	EXTREMA
28	Fuentepinilla (4)	223550007d	Manantial	Beas de Segura	516150	4232800	840	EXTREMA
29	Fuentepinilla (5)	223550007e	Manantial	Beas de Segura	516150	4232800	840	EXTREMA
30	Baños de Pipe	213470001	Galería	Chiclana de Segura	501925	4243600	640	BAJA
31	La Higuera (1)	213520005	Manantial	Chiclana de Segura	497890	4241550	630	BAJA
32	La Higuera (2)	213530023	Pozo	Chiclana de Segura	498460	4241020	620	BAJA
33	Fuente Agria	193610018	Pozo surgente	Guarromán	427215	4216850	255	MÍNIMA
34	Fuente del Molino	193610019	Manantial	Guarromán	426800	4215950	255	MÍNIMA
35	Fuente de la Higuera	193610025	Manantial	Guarromán	426310	4215750	260	MÍNIMA
36	Fuente la Pestosa	193610026	Manantial	Guarromán	426780	4215935	255	MÍNIMA
37	Pilar de la Virgen de la Encina	193560048	Manantial	Baños de la Encina	434050	4226800	420	MODERADA
38	Puerto Alto	183530001	Manantial	Andújar	412100	4236750	700	ALTA
39	Baños de Jerez	193850036	Manantial	Jaén	428200	4177350	710	ALTA
40	Baños la Salvadora	183880007	Manantial	Jamilena	420090	4177700	770	ALTA
41	Balneario de Montesordo	193530001	Manantial	La Carolina	445715	4238820	487	BAJA
42	Arroyo Escobar	183680097	Sondeo	Andújar	418500	4212400	260	MÍNIMA
43	Baños de La Muela	193670017	Manantial	Linares	445780	4209940	252	MÍNIMA
44	Fuente del Huevo	193630024	Manantial	Linares	447830	4219600	400	MÍNIMA
45	Arroyo Cerezo (1)	193910010	Pozo	Los Villares	429275	4167400	1120	ALTA
46	Arroyo Cerezo (2)	193910046	Galería	Los Villares	429275	4167400	1120	ALTA
47	Caño Gordo	193910025	Manantial	Los Villares	429750	4167375	1080	ALTA
48	Fuente del Llorón	193910024	Manantial	Los Villares	429375	4167525	1080	ALTA
49	Arroyo Moyanico	173680016	Manantial	Marmolejo	394550	4213050	205	BAJA
50	Arroyo Seco	173680032	Manantial	Marmolejo	394988	4213010	220	BAJA
51	Las Cañas	173680033	Sondeo	Marmolejo	394470	4212870	203	BAJA
52	El Ecijano	173680018	Manantial	Marmolejo	394090	4213270	240	BAJA
53	Fuente Los Perros	173680019	Manantial	Marmolejo	395500	4212950	200	BAJA
54	Fuente de Los Socialistas	173680020	Pozo	Marmolejo	394910	4212480	180	BAJA
55	Sondeo 102	173680021	Sondeo	Marmolejo	394490	4213020	211	BAJA
56	Sondeo 103	173680022	Sondeo	Marmolejo	394520	4213060	207	BAJA
57	Salto de Calderones	193480004	Manantial	Santa Elena	448125	4249100	890	MODERADA
58	Salto del Fraile (1)	193480003	Manantial	Santa Elena	449210	4249005	850	MODERADA
59	Salto del Fraile (2)	193480005	Manantial	Santa Elena	449240	4249020	820	MODERADA
60	Sondeo 118	173680034	Sondeo	Marmolejo	394481	4213216	234	BAJA
61	Olivos de Alfonsillo - Manantial 1993	173680031	Manantial	Marmolejo	394565	4212970	245	BAJA

Cuadro 7. Vulnerabilidad del entorno en los puntos de interés hidromineral.

Nº	Denominación	Nº inventario IGME	Naturaleza	Municipio	UTMX	UTMY	Cota	Vulnerabilidad
62	Fuente San Luis	173680035	Manantial	Marmolejo	395440	4211720	178	BAJA
63	Fuente Buena Esperanza	173680036	Manantial	Marmolejo	395440	4211720	178	BAJA
64	Salto de Padilla	193470001	Manantial	Santa Elena	447200	4248200	890	MODERADA
65	Baños de Ntra. Señora del Collado (1)	203540001	Sondeo	Santisteban del Puerto	482650	4238060	620	MODERADA
66	Baños de Ntra. Señora del Collado (2)	203540011	Sondeo	Santisteban del Puerto	482570	4238030	640	MODERADA
67	Baños de Ntra. Señora del Collado (3)	203540012	Pozo	Santisteban del Puerto	482690	4237970	620	MODERADA
68	Baños de Cabeza Grande	213510009	Galería	Santisteban del Puerto	484925	4241250	760	ALTA
69	Covacho de la Mina	223570056	Manantial	Segura de la Sierra	533800	4233400	1172	MÍNIMA
70	Fuente de El Cerezo / El Fontarrón	223670016	Manantial	Santiago de la Espada	532100	4213160	1280	MODERADA
71	Fuente de El Torcal	223580023	Manantial	Santiago de la Espada	538200	4226450	1000	EXTREMA
72	Virgen de las Angustias	213580029	Manantial	Villanueva del Arzobispo	511956	4228354	670	ALTA
73	Virgen de la Presentación	213580030	Manantial	Villanueva del Arzobispo	511645	4228207	665	ALTA
74	Virgen de la Esperanza	213580015	Manantial	Villanueva del Arzobispo	511667	4228064	660	ALTA
75	El Prado	193850037	Manantial	Jaén	428550	4178260	628	ALTA
76	Manantial Isabel II	193860015	Manantial	La Guardia de Jaén	439090	4177775	590	MÍNIMA
77	Nacimiento de los Arbunielos	193940013	Manantial	Cambil	452325	4164460	930	ALTA
78	La Campana	173680037	Manantial	Marmolejo	392400	4213900	270	BAJA
79	Fuente de los Carros	173680038	Manantial	Marmolejo	395680	4213040	220	BAJA
80	Fuente de la Negra	183940001	Manantial	Fuensanta de Martos	420200	4167200	725	ALTA
81	Sondeo 84	193570044	Sondeo	Guarromán	441620	4227670	340	BAJA
82	Julia María / Valles de la Centenera	183620001	Sondeo	Marmolejo	401650	4219000	645	BAJA
83	Sondeo 108	173680039	Sondeo	Marmolejo	394500	4212910	203	BAJA
84	Hontanar de flores	183460001	Sondeo	Andújar	405050	4248100	750	ALTA
85	Fuente de Hutar	203810017	Manantial	Albánchez de Mágina	459800	4184650	689	MODERADA
86	Las Ericas	213680033	Manantial	Santo Tomé	509400	4207150	900	ALTA
87	La Toba	223580013	Manantial	Santiago de la Espada	538812	4226327	990	EXTREMA
88	Los Castaños	193480006	Manantial	Santa Elena	453125	4244900	670	MODERADA
89	Cueva del Santo	203450001	Manantial	Santa Elena	459600	4249400	925	MODERADA
90	Sondeo 114	173680029	Sondeo	Marmolejo	393778	4213955	295	BAJA
91	Sondeo 116	173680030	Sondeo	Marmolejo	395550	4213245	227	BAJA
92	Fuente Cañillo	213880038	Pozo surgente	Pozo Alcón	505900	4172950	854	BAJA
93	Sondeo Expediente 158	194010032	Sondeo	Frailes	425700	4148645	920	BAJA
94	Fuente del Roble	213580031	Manantial	Sorihuela de Guadalimar	512125	4228369	660	ALTA
95	Fuente de la Mina	223570002	Manantial	Segura de la Sierra	532825	4227675	1195	MÍNIMA
96	Nacimiento del río San Juan	183980003	Manantial	Castillo de Locubín	418818	4155504	690	MÍNIMA
97	Fuente del Papel	193950001	Manantial	Valdepeñas de Jaén	425436	4159179	950	BAJA
98	Chorro	193910022	Manantial	Valdepeñas de Jaén	428077	4161035	800	BAJA
99	Fuente del Rey	184040013	Manantial	Alcalá la Real	420554	4146372	900	ALTA
100	Fuente Somera	184040014	Manantial	Alcalá la Real	420559	4146896	920	ALTA
101	Robledo	183980008	Manantial	Alcalá la Real	421095	4153788	840	MÍNIMA
102	Fuente del Parque	203860007	Manantial	Bélmez de la Moraleda	466321	4175554	885	ALTA
103	Gargantón	203860009	Manantial	Huelma	463430	4175042	1170	ALTA
104	Talabartero	203860010	Manantial	Bélmez de la Moraleda	465131	4177932	1060	ALTA
105	Mata Bejid	203850007	Manantial	Huelma	455240	4172000	1060	ALTA
106	Nacimiento	203870002	Manantial	Cabra de Santo Cristo	474562	4172843	1020	ALTA
107	Villanueva	193880003	Manantial	Cambil	449409	4173567	960	BAJA
108	Fuenmayor	203810022	Manantial	Torres	454549	4178483	1292	EXTREMA
109	Sistillo	203820005	Manantial	Bédmar	464112	4182165	628	ALTA
110	Arroyo de la Sarga	203460005	Sondeo	Aldequemada	464950	4249875	820	MODERADA
111	Santa Lucía	193940001	Manantial	Campillo de Arenas	447090	4162350	740	BAJA
112	Fuente Amuña	183920006	Manantial	Alcaudete	406203	4160394	735	EXTREMA
113	Fuente Higuera	183920013	Manantial	Martos	407858	4166877	480	EXTREMA
114	Cañaverl	193870032	Manantial	Mancha Real	440300	4177350	560	ALTA
115	Berral	223640001	Manantial	Santiago de la Espada	535360	4215330	1300	ALTA
116	Molino de Loreto	223630002	Manantial	Santiago de la Espada	530050	4220450	1290	ALTA
117	Chircales	193910023	Manantial	Valdepeñas de Jaén	425300	4162400	1060	ALTA
	Villalva (aguas de)		Manantial	Villalva				
	El Nazareno		Manantial	Andújar				
	Sondeo 117		Sondeo	Marmolejo				BAJA

Cuadro 7. Vulnerabilidad del entorno en los puntos de interés hidromineral (Continuación)