

SECTORIZACIÓN ECOLÓGICA DEL ACUÍFERO DE MADRID PARA UNA CLASIFICACIÓN GENÉTICA Y FUNCIONAL DE HUMEDALES

POR

A. G. BESTEIRO Y C. MONTES

Introducción

El inventario de los humedales de una región, así como su clasificación ecológica, son pasos previos imprescindibles para el estudio de su funcionamiento y para la planificación de su gestión (DGHO, 1990).

Para realizar dicha clasificación es necesario conocer los procesos físicos que explican la génesis de las cubetas y el funcionamiento hidrológico de las masas de agua epicontinentales de un determinado territorio. De esta forma es posible obtener un cuadro sistemático que refleje la variabilidad palustre de cualquier área natural.

Aunque el término *humedal* comprende toda anomalía hídrica positiva respecto al terreno circundante, como un continuo que va desde el humedecimiento de la zona de las raíces de la vegetación (criptohumedales) hasta la presencia en la superficie de terreno de láminas de agua el tiempo suficiente para que se desarrolle vida acuática (formaciones palustres) (González Bernáldez et al., 1989), se ha considerado únicamente éstas últimas para nuestra investigación.

A. G. Besteiro y C. Montes. Departamento Interuniversitario de Ecología de Madrid.

Estudios Geográficos
Tomo LII, n.º 205, octubre-diciembre 1991

A pesar de que en el acuífero de Madrid las formaciones palustres son masas de agua de pequeño tamaño, son estos sistemas los representantes más característicos de la limnología regional de la Península Ibérica (Montes y Bifani, 1990). La gran ventaja de trabajar en el acuífero de Madrid en esquemas de clasificación ecológica de sus sistemas naturales radica en la existencia de un conocimiento profundo de los aspectos temáticos más importantes de su medio físico (clima, geología, etc.) así como de su hidrología superficial y subterránea. Además, otra ventaja es la existencia de una litología relativamente homogénea, que facilita la interpretación de los procesos que tienen lugar en las formaciones palustres, y se puede considerar como un laboratorio natural idóneo donde estudiar las relaciones de aguas superficiales y subterráneas.

Desde esta perspectiva, el objetivo del presente trabajo es clasificar y tipificar las formaciones palustres del acuífero de Madrid a partir de la sectorización ambiental del mismo, delimitando regiones geográficas homogéneas (Bailey, 1984).

La realización de sectorizaciones ecológicas enfocadas específicamente a la clasificación de humedales está poco desarrollada, encontrándose en la literatura muy pocos trabajos que aborden la integración de varias características indicadoras desde esta perspectiva.

Florín et al. (enviado) diferencian varios sectores palustres en la región de La Mancha (España central) a partir de la litología, topografía, hidrología superficial e influencia de las aguas subterráneas.

González Bernáldez et al. (1987) realizaron un mapa ecológico a partir de datos hidrogeoquímicos de pozos existentes en el acuífero de Madrid, comprobando que los sectores definidos se ajustaban a la distribución de vegetación freatófita (criptohumedales) del acuífero.

Posteriormente, se completó esta sectorización introduciendo nuevas variables que podrían condicionar la presencia de formaciones palustres en este área (González Bernáldez et al., 1989).

Área de estudio

Situada en la cuenca del río Tajo, el área de estudio tiene una superficie aproximada de 3.700 Km² (figura 1). Queda limitada al Norte por las

Sierras de Guadarrama y Gredos, mientras que al Sur queda difusamente delimitada por las formaciones evaporíticas del centro de la cuenca sedimentaria de Madrid. El límite oriental lo constituye el río Jarama y por el Oeste la zona de estudio se estrangula en el «Estrecho de Talavera» (Hernández Pacheco, 1955) lugar donde casi convergen el Sistema Central y los Montes de Toledo.

Su topografía suave y ondulada, con un descenso regional progresivo en dirección NE-SW, alcanza cotas máximas de 760 m. en el interfluvio Manzanares-Jarama y mínimos de 360 m. en la confluencia del Alberche con el río Tajo, en las cercanías de Talavera de la Reina.

En esta región domina un clima de tipo mediterráneo continental (Font, 1983), con régimen hídrico semiárido (Allúe, 1966), siendo la cuenca baja del Alberche la región más húmeda y cálida.

La mayor parte de los materiales geológicos del área de estudio son arenas arcósicas que rellenaron la fosa del Tajo durante el Mioceno (López Vera, 1977; Villarroya, 1977), apenas interrumpidos por formaciones más modernas: rañas pliocenas en el SW (Martín Escorza y Hernández Enrile, 1972; Martín Escorza, 1977) y terrazas y aluviales cuaternarios de los grandes ríos (Martín Escorza y Hernández Enrile, 1972; Rubio, 1984).

La potencia de los materiales del acuífero de Madrid y lo accidentado del relieve permiten la existencia de flujos a distintas escalas (figura 2) como los descritos en Canadá por Tóth (1972).

Numerosos estudios ponen en evidencia la existencia de dos procesos independientes de mineralización del agua subterránea aumenta rápidamente su mineralización por contacto con los materiales evaporíticos del borde Sur del área de estudio y *evolución geoquímica* por la que se produce un aumento progresivo de la salinidad del agua subterránea en flujos de largo recorrido a través de los materiales detríticos de la cuenca (Tóth, 1984).

Metodología

El método más empleado para delimitar unidades ambientales, consiste en seleccionar características físicas clave de un territorio y cartografiarlas en mapas temáticos de la misma escala, que se superponen posteriormente

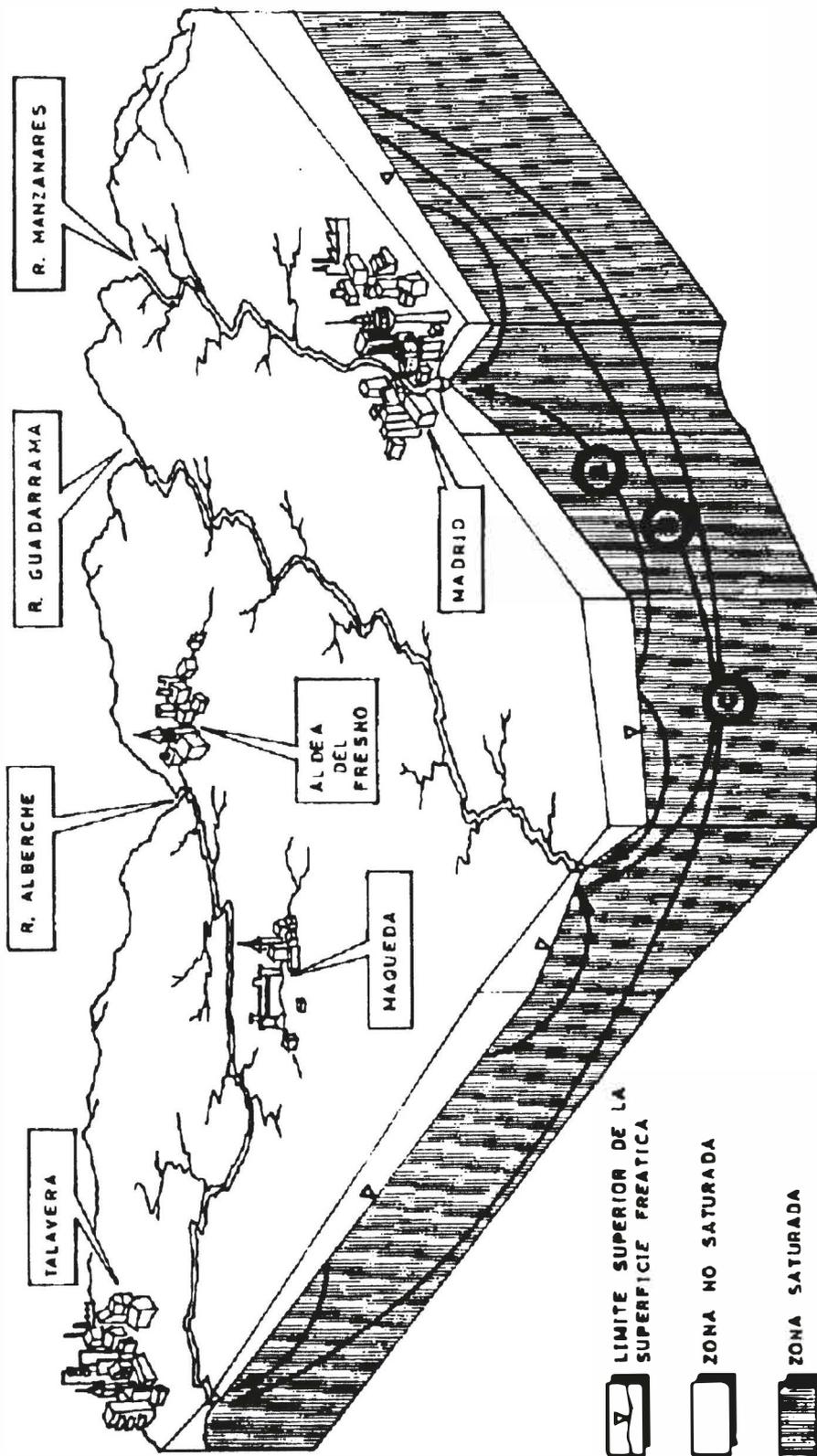


FIGURA 2.—Modelo de distribución de flujos locales (a), intermedios (b) y regionales (c) en el acuífero de Madrid

para delimitar regiones homogéneas (Ramos Fernández, 1979; Bailey, 1983; EPA, 1983; Llorca et al., 1988).

Sin embargo, este tipo de metodología presenta algunos problemas:

a) A la hora de su aplicación, ya que en numerosas ocasiones los mapas temáticos tienen que ser elaborados por los propios autores de la sectorización a partir de recopilaciones de datos dispersos, debido a la falta de cartografía ambiental a una escala de trabajo adecuada, para los objetivos de cada estudio concreto. Con todo ello, los límites definitivos de los sectores ambientales suelen ser subjetivos y en muchos casos dependen del conocimiento del área que posea el investigador (Vidal-Abarca et al., en prensa).

b) A la hora de su interpretación, ya que únicamente mediante la superposición de mapas no se consigue una auténtica integración de las características ecológicas de un territorio, al tratarse de una mera yuxtaposición de datos donde no se conocerán las interacciones entre los diferentes elementos del territorio (Llorca et al., 1988).

Mediante la aplicación de técnicas de estadística multivariante, en la sectorización ambiental que aquí se presenta quedan solventados, en parte, estos problemas, ya que se recurre a una visión global de todos los aspectos, sin considerar temas individualmente, quedando así mismo reducida la subjetividad inherente a estas sectorizaciones. Para el acuífero de Madrid, se ha realizado en las cuatro fases sucesivas que se detallan a continuación (figura 3):

Fase A. Selección de variables indicadoras.—La presencia de una formación palustre se explica por la ocurrencia indispensable de dos grandes grupos de procesos: los que dan lugar a una cubeta capaz de contener agua y los responsables de la alimentación hídrica de dicha cubeta. Para el acuífero de Madrid, se ha realizado una recopilación de parámetros que recogen la variabilidad de ambos elementos (tabla I).

1) Características físicas referentes a las cubetas y cuencas de recepción.—Mediante la *transmisividad* (T) expresada en $m^2/día$, se puede describir hidráulicamente un terreno. Los valores de este parámetro hidráulico para el acuífero de Madrid, han sido tomados de López Vera (1975), Martínez Alfaro (1977), Sastre (1978), Fernández Uría (1984), Rubio (1984).

La densidad de la red de drenaje que circula por un territorio es uno de

SECTORIZACIÓN ECOLÓGICA DEL ACUIFERO DE MADRID...

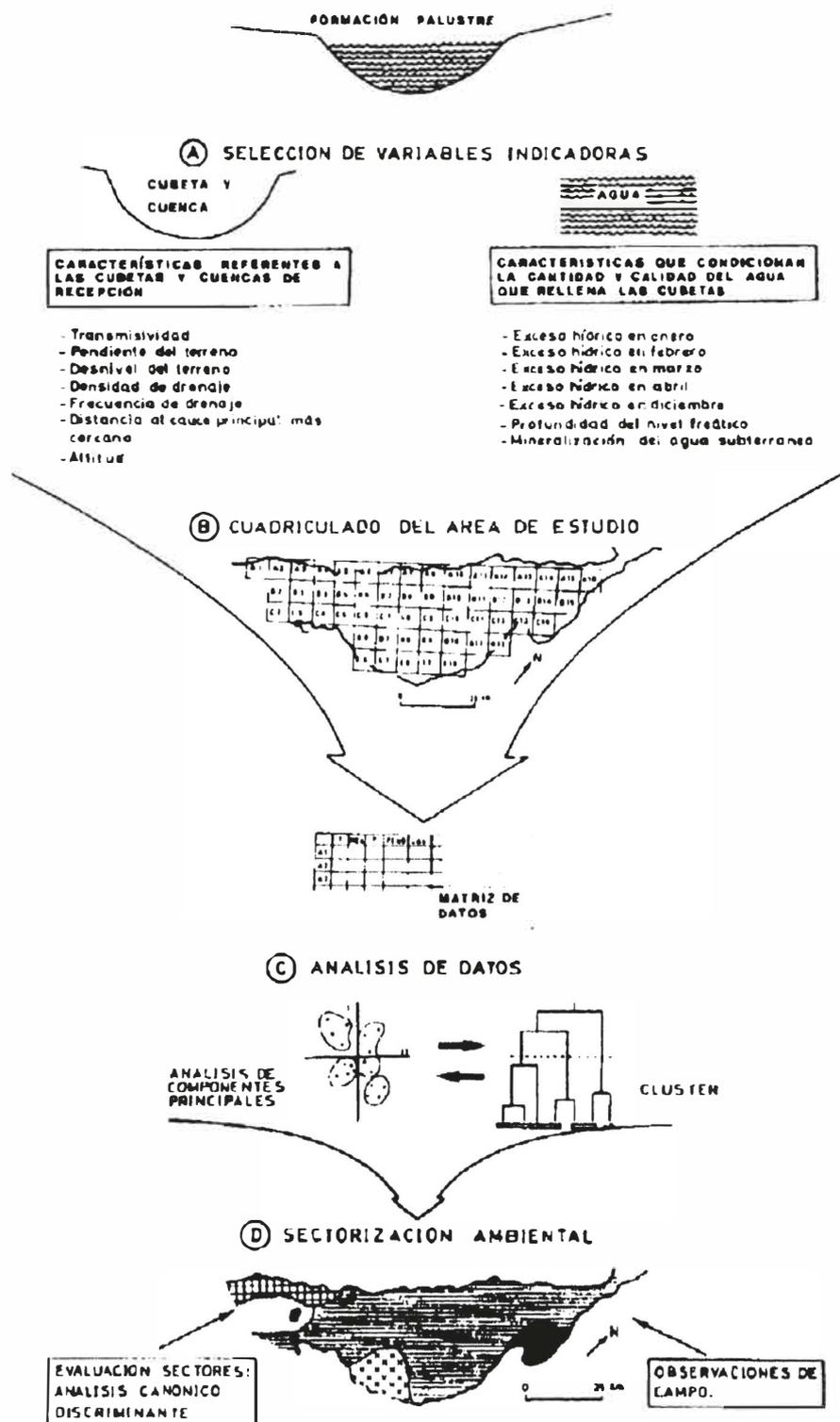


FIGURA 3.—Metodología empleada en el trazado de sectores ambientales en el acuífero de Madrid

TABLA I
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO EMPLEADAS EN LA ELABORACIÓN DE SECTORES AMBIENTALES HOMOGÉNEOS

NOMBRE DE LA VARIABLE	CODIGO	UNIDADES DE MEDIDA	CALCULOS
TRANSIMISIVIDAD	T	m ² /día	Ensayos de bombeo(*)
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS REFERENTES A LAS CUBERTAS Y CUENCAS DE RECEPCIÓN	PERM	nº curvas de nivel/cuadrícula	Recuento de número de curvas de nivel/cuadrícula.
	DESN	m	Diferencia entre máx y mín cota en cada cuadrícula
	DD	km	Longitud total de los cauces/superf. cuadrícula.
FRECUENCIA DE DRENAJE	FD	nº cauces/cuadrícula	Nº cauces/superf. cuadr
DISTANCIA AL CAUCE PRINCIPAL MAS CERCANO	DCNU	km	Distancia del centro de la cuadr. a cauce cercano
ALTITUD	AUT	m	Altitud media
CARACTERÍSTICAS QUE CONDICIONAN LA CANTIDAD Y CALIDAD DEL AGUA QUE LLENA LAS CUBERTAS	PROF	m	Altitud del pozo menos cota del nivel freático
	COND	µS/cm	Conductivímetro(*)
	Q1,Q2,Q3 Q4,Q12	mm	Balance hídrico (**)

(*) Medidas directas.

(**) Empleo del método de Thornthwaite.

los condicionantes de la presencia de zonas encharcadizas (González Bernáldez, 1987). Así, las regiones endorreicas, donde el agua se acumula con mayor facilidad formando lagunas y charcas de diferentes tamaños, se caracterizan por su tabularidad, ausencia de cauces (discurriendo sinuosamente los pocos que circulan) y el fenómeno denominado «drenaje impedido», originado por flujos ascendentes de agua subterránea que saturan el sustrato, facilitando la acumulación de agua meteórica (González Bernáldez, 1987).

En el acuífero de Madrid se midieron cinco variables indicativas del relieve y de la densidad de drenaje, factores que condicionan de forma importante la existencia de humedales (Custodio, 1987).

Sobre los mapas de la zona de escala 1:50.000 se procedió al encuentro del número de curvas de nivel con cotas diferentes por unidad de superficie. El valor de esta variable *PEND* indica la *pendiente* del terreno en cada área; así mismo, la diferencia entre la cota máxima y mínima por unidad de superficie se utilizó como indicativa del *desnivel (DESN)* y la *densidad de drenaje (DD)* la *frecuencia de drenaje (FD)* considerando en ambos casos los arroyos y ríos permanentes del área de estudio y la *distancia al cauce principal más cercano (DCAU)* como representativos de la potencia del drenaje en cada zona.

Otra medida fisiográfica utilizada fue la *altitud (ALT)*.

2) Características que condicionan la cantidad y calidad del agua que rellena las cubetas.—Para estimar las entradas y salidas de agua superficial meteórica en los terrenos estudiados se consideró la información aportada por las estaciones meteorológicas de la zona de estudio. Éstas se escogieron de entre las recopiladas por De Nicolás (1979) para un período que abarca como máximo desde 1930 a 1973.

A partir del cálculo de los balances hídricos teóricos, mediante el método de Thornthwaite (1948), para cada estación meteorológica seleccionada se consideraron cinco variables como indicativas del *exceso hídrico*, que sólo se produce en los meses de invierno y primavera, siendo el resto del año claramente deficitario. Se tomaron, por tanto, los datos de diciembre (*Q12*), enero (*Q1*), febrero (*Q2*), marzo (*Q3*) y abril (*Q4*).

Para estimar la entrada y salida de agua subterránea interesa delimitar las áreas de recarga y descarga en el acuífero regional, lo cual se realizó

a partir de la información de 171 pozos, recopilada de diversas fuentes (Martínez Alfaro, 1977; Rebollo, 1977; Sastre, 1978; Fernández Uría, 1984, y Rubio, 1984).

Se definió la variable *profundidad del nivel freático (PROF)* como la diferencia entre la altura topográfica del pozo y la cota del nivel piezométrico.

Para valores de PROF entre 0 y 5 m., se consideró que el pozo había sido instalado en áreas de descarga de agua subterránea; así mismo, valores de PROF >5 m. correspondían a zonas de recarga del acuífero. Este límite se estableció en función de la máxima profundidad a la que pueden llegar las raíces de algunas plantas freatofíticas indicadoras de descargas evapotranspirativas o criptohumedales (Herrera, 1987).

La concentración y composición iónica del agua que mantienen las cubetas dependen, sobre todo, de las características de los terrenos por los que circula el agua de escorrentía superficial y de la hidroquímica de las aguas subterráneas, si se trata de humedales influidos por dichos aportes hídricos.

Como ya se comentó, los materiales del área de estudio son fundamentalmente detríticos y el aporte de sales que estos depósitos aportan al agua de escorrentía es prácticamente nulo. Sin embargo, no ocurre así con el agua subterránea, que para el acuífero de Madrid posee características químicas diferentes según la situación dentro del sistema de flujo regional, debido al fenómeno de «evolución geoquímica» referido anteriormente.

De los 171 pozos considerados, se tomaron los valores de *conductividad (COND)* de sus aguas, como indicativo de su mineralización global.

Fase B. Cuadrículado del área de estudio.—Para recoger la máxima variabilidad de los parámetros descriptores seleccionados en el área de estudio, se subdividió ésta en parcelas de igual superficie, teniendo presente que el tamaño de cada una fuese coherente con la escala de los mapas con información más consistente y con el tiempo disponible. Por ello se dividió la zona en 55 cuadrículas de 8 x 8 Km., tomando como base mapas a escala 1:50.000. A cada cuadrícula se le adjudicó un único valor de los parámetros físicos seleccionados para el área, resultando una matriz de datos de 14 variables x 55 casos (apéndice I).

Fase C. Análisis de datos.—A la matriz obtenida se le aplicó para su análisis las técnicas multivariantes de ordenación y clasificación propuestas por Llorca y Ruiz (1987).

Se realizó un Análisis de Componentes Principales, con el programa P4M, para identificar las variables físicas que contenían más información para su posterior uso como descriptores de los sectores ambientales y un Cluster con el programa P2M, ambos del paquete estadístico BMDP (Dixon y Brown, 1987). Posteriormente se evaluó la sectorización obtenida mediante Análisis Discriminante paso a paso efectuado con el programa P7M del mismo paquete estadístico.

Fase D. Sectorización ambiental.—Los resultados obtenidos del Análisis de Componentes Principales permitieron confeccionar un cierto número de mapas temáticos que integraban, cada uno, el significado estructural y funcional de diversos grupos de variables altamente correlacionadas entre sí.

La posterior aplicación de técnicas de clasificación jerárquica a estos resultados permitió realizar un mapa provisional de unidades ambientales del acuífero de Madrid, que fue considerado como definitivo una vez comprobada la homogeneidad de las regiones obtenidas mediante un Análisis Discriminante.

Resultados

1. *Análisis de Componentes Principales (ACP).*—En la tabla II figuran los resultados del ACP efectuado con la matriz de datos, donde el primer eje o factor absorbe el 27% de la varianza total y queda definido por las variables que hacen referencia al exceso hídrico teórico calculado por cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas. Se distinguen, en los meses de exceso hídrico para este área (diciembre a abril) regiones más húmedas, de otras con menos cantidad de agua.

El eje II con una absorción del 16.15% de la variación total se caracteriza por distinguir áreas de altitud más elevada, nivel freático profundo y agua subterránea poco mineralizada: regiones de recarga del acuífero, frente a otras más bajas, y donde el agua subterránea se encuentra más próxima a la superficie del terreno y es más salina, correspondiendo a áreas de descarga del acuífero.

APÉNDICE I

VARIABLES DEL MEDIO FÍSICO DEL ÁREA DE ESTUDIO UTILIZADAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE SECTORES AMBIENTALES HOMOGÉNEOS

CUADRICULA	T (m ² /día) (1)	PEND DESN(m) (2)	DD (3)	FD(km) (5)	DCAU(km) (6)	ALT(m) (7)	Q1(m ³) (8)	Q2(m ³) (9)	Q3(m ³) (10)	Q4(m ³) (11)	Q12(m ³) (12)	PRCF(m) (13)	COND(µS/cm) (14)
A01	10	3	42	39	11	400	79	66	39	0	4	4	1259
A02	6	5	102	99	17	430	103	61	76	10	86	3	1377
A03	6	6	110	93	32	460	84	36	34	0	0	1	802
A04	6	5	170	71	27	530	84	36	34	0	0	1	715
A05	6	7	175	67	28	520	48	65	42	1	1	1	575
A06	6	6	163	84	24	530	48	65	42	1	1	1.5	328
A07	6	5	162	65	17	520	64	65	38	0	16	2.5	411
A08	6	9	30	60	13	480	64	65	38	0	16	3.5	301
A09	6	7	222	67	28	596	14	42	14	0	0	21	607
A10	76	6	147	67	25	640	14	42	14	0	0	30	512
A11	76	6	100	61	25	652	14	42	14	0	0	21	372
A12	76	4	73	51	26	660	58	58	38	13	14	48	334
A13	17	6	81	71	20	670	48	60	24	0	0	43	287
A14	17	8	52	58	14	680	48	60	24	0	0	99	306
A15	17	6	77	47	16	670	58	71	56	15	51	81	307
A16	17	7	119	46	10	680	8	29	17	1	0	66	332
B02	150	5	66	46	10	470	51	69	16	0	0	5	3072
B03	150	4	82	62	25	440	42	45	25	0	0	6	1436
B04	6	5	84	63	34	440	84	36	34	0	0	1	1145
B05	6	5	77	69	30	510	48	65	42	1	2	3.5	620
B06	6	6	144	52	25	530	64	65	38	0	16	15	456
B07	6	8	91	68	44	550	64	65	38	0	16	11	292
B08	76	6	54	95	18	600	40	57	31	0	0	41	250
B09	76	6	62	99	30	580	40	57	31	0	0	13	340
B10	76	5	66	64	33	630	14	42	14	0	0	65	408
B11	76	8	100	78	36	640	14	42	14	0	0	6	390
B12	17	5	60	88	8	710	39	30	27	0	0	39	317

B13	17	6	100	92	10	6	650	39	30	27	0	0	38	767
B14	17	4	80	12	8	4	720	44	52	27	9	0	98	541
B15	17	7	156	44	15	4	650	8	29	17	1	0	41	326
C02	6	5	100	26	5	8	520	2	50	16	0	0	6	912
C03	6	5	70	45	15	10	530	42	45	25	0	0	6	886
C04	6	4	47	23	13	11	500	42	45	25	0	0	4	1282
C05	6	3	43	45	14	10	520	15	50	20	0	0	6	525
C06	36	4	50	62	19	12	580	31	61	15	0	0	13	375
C07	76	4	48	49	20	14	630	31	61	15	0	0	11	325
C08	76	5	61	48	18	6	640	31	61	15	0	0	58	372
C09	76	8	69	57	11	0	640	40	57	31	0	0	85	261
C10	76	6	55	104	30	7	600	40	57	31	0	0	36	252
C11	76	6	105	44	18	7	650	35	44	17	13	0	26	241
C12	17	6	94	40	12	0	670	35	44	17	13	0	52	331
C13	5	6	66	31	5	8	630	0	9	14	0	0	66	1112
C14	17	3	22	7	3	19	680	0	20	22	0	0	35	499
D06	13	4	49	31	12	8	580	0	0	0	0	0	24	347
D07	76	4	71	47	11	2	590	0	0	0	0	0	4.5	301
D08	76	6	96	58	25	0	580	31	61	15	0	0	3	325
D09	76	7	74	61	27	4	610	23	38	18	0	0	1	344
D10	76	7	81	78	13	12	640	23	38	18	0	0	62	765
D11	17	6	50	46	17	7	670	17	40	13	9	0	39	888
D12	5	7	80	18	2	6	640	17	40	13	9	0	32	853
E06	13	5	78	19	3	6	530	19	41	25	0	0	1	469
E07	13	6	60	33	10	2	530	0	0	0	0	0	1	1197
E08	76	7	82	51	20	8	580	0	1	13	0	0	3	1271
E09	76	6	80	48	14	10	610	23	38	18	0	0	41	830
E10	13	6	70	35	13	6	640	7	34	13	0	0	38	774

(1)	Transmisividad	(6)	Distancia al cauce principal más cercano	(11)	Exceso hídrico en abril
(2)	Pendiente del terreno	(7)	Altitud	(12)	Exceso hídrico en diciembre
(3)	Desnivel del terreno	(8)	Exceso hídrico en enero	(13)	Profundidad del nivel freático
(4)	Densidad de drenaje	(9)	Exceso hídrico en febrero	(14)	Mineralización del agua subterránea
(5)	Frecuencia de drenaje	(10)	Exceso hídrico en marzo		

TABLA II
 FACTORES DE CARGA ROTADOS DE LOS TRES PRIMEROS EJES DEL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES DE LAS VARIABLES FÍSICAS CONSIDERADAS PARA LA DELIMITACIÓN DE SECTORES AMBIENTALES EN EL ACUÍFERO DE MADRID

	FACTOR I	FACTOR II	FACTOR III
Q3	0.907	0.000	0.000
Q1	0.824	-0.282	0.261
Q12	0.800	0.000	0.000
Q2	0.671	0.000	0.408
Q4	0.536	0.497	-0.349
ALT	-0.302	0.905	0.000
PROF	0.000	0.851	0.000
COND	0.000	-0.596	-0.463
FD	0.000	0.000	0.865
DD	0.270	0.000	0.766
Varianza explicada	27.00%	16.15%	15.36%

El componente III (15.36% de varianza absorbida) es definido por la frecuencia y densidad de drenaje, quedando así separadas regiones con poca pendiente y deficientemente drenadas de otras con pendientes más pronunciadas y con una red de drenaje más potente.

Los tres ejes obtenidos engloban tanto procesos superficiales o epigénicos (ejes I y III) como subterráneos o hipogénicos (eje II) según la terminología de Huguet del Villar (1983).

2. *Análisis de Clasificación jerárquica. Cluster.*—Mediante el Cluster realizado sobre las coordenadas que definen los tres primeros ejes del ACP, se agruparon las cuadrículas en que se dividió el acuífero de Madrid. El cartografiado de dichos grupos permite la identificación de unidades ambientales en una primera aproximación a la sectorización del área (figura 4).

3. *Análisis Discriminante.*—Para evaluar la homogeneidad intrínseca de cada sector, así como para contrastar las diferencias entre dichos sectores se realizó un Análisis Discriminante paso a paso, que demostró que la fiabilidad de la sectorización previa era del 92.7%. Los grupos de

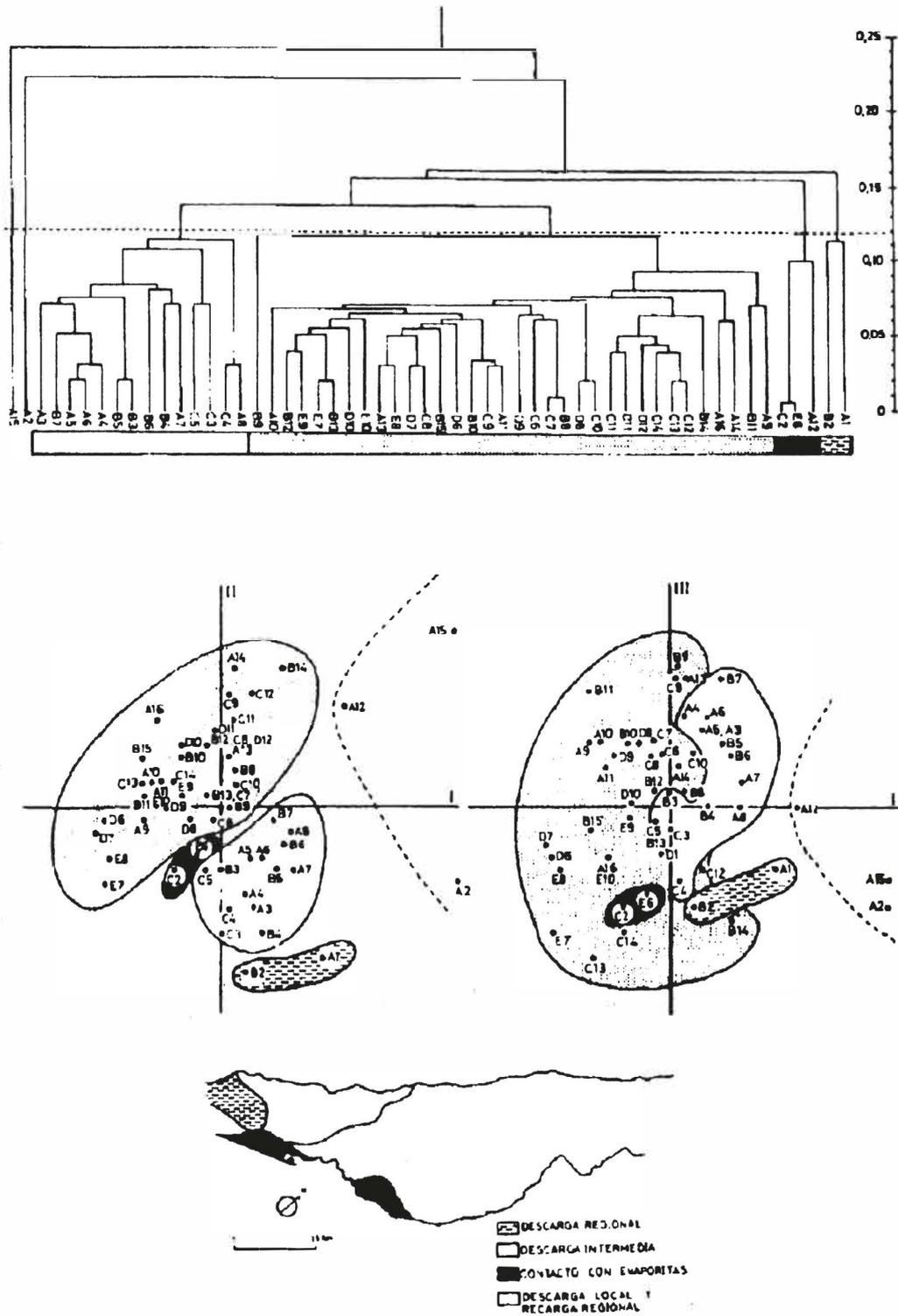


FIGURA 4.—Sectorización ambiental del acuífero de Madrid obtenida mediante el análisis de clasificación jerárquica realizado sobre el espacio definido por los tres primeros ejes del Análisis de Componentes Principales realizado sobre la matriz física original

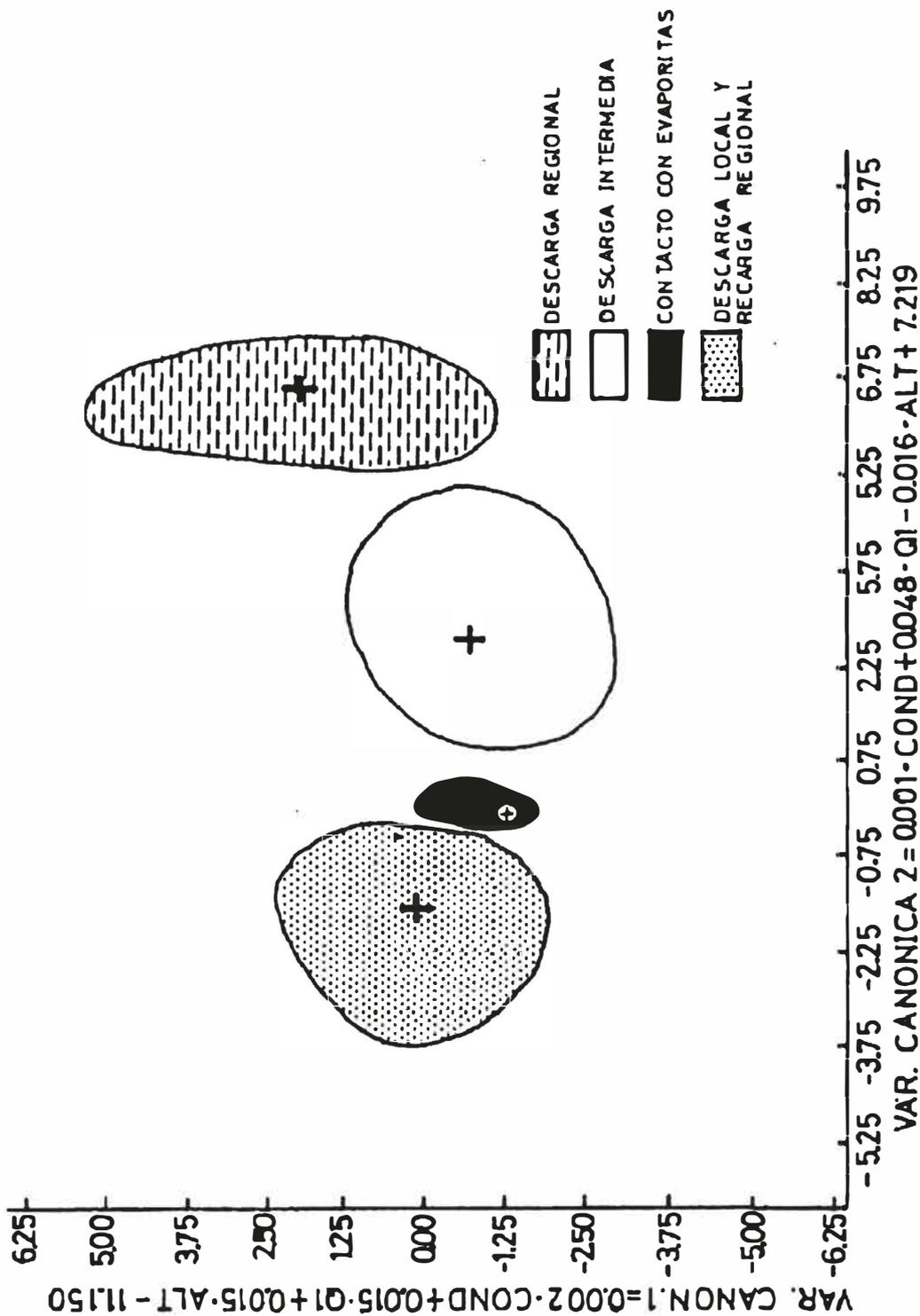


FIGURA 5.—Grupos de cuadrículas del acuífero de Madrid en función de las dos primeras variables canónicas del Análisis Discriminante

cuadrículas homogéneas en función de las dos primeras variables canónicas quedan representados en la figura 5. Sin embargo, un conocimiento profundo y detallado de la región obliga a diferenciar, desde una perspectiva limnológica, el área correspondiente a los afloramientos de raña del SW que, aunque inmersa en la zona correspondiente a la descarga intermedia del acuífero, tiene características limnológicas funcionales bien diferenciadas. En efecto, el mapa ambiental obtenido es resultado de una información precisa, pero muy general, de diferentes aspectos del acuífero. Así, se recogen en ellos tendencias globales claras, pero se omiten pequeñas áreas (como es el caso de las rañas) cuya diferenciación únicamente es posible realizando estudios a una escala mayor de trabajo, o mediante observaciones de campo que evidencien esas diferencias locales.

Por estas razones, consideramos conveniente añadir a la sectorización automática obtenida en esta nueva ecorregión, con la que quedará reflejada la variabilidad del área a diferentes escalas (figura 6).

Se han detectado 5 sectores ambientales en el acuífero de Madrid:

Sector 1 o sector de descarga regional. Se trata de un sector típicamente de descarga regional del acuífero, con agua subterránea muy mineralizada y donde la profundidad del nivel freático no supera los 5 m. Caracterizado por un balance hídrico altamente positivo en los meses de invierno, queda enmarcado por la confluencia de los ríos Tajo y Alberche en las cercanías de Talavera de la Reina. Se trata de terrenos con escaso drenaje, constituidos por materiales permeables (terrazas y arenas), por lo que el agua de lluvia quedará menos tiempo retenida en superficie pero también facilitará la descarga del agua subterránea muy mineralizada, por tratarse de flujos regionales los que convergen en este sector.

Sector 2 o sector de rañas.—Se trata de los afloramientos de raña pliocena existente en el terreno SW del área de estudio.

El tipo de materiales que lo constituye, se caracteriza por la existencia en profundidad de niveles más arcillosos y por consiguiente, más impermeables, que permiten la existencia de acuíferos colgados, independientes del acuífero regional. Estos mismos materiales, facilitan la retención del agua de lluvia, a la vez que impiden la descarga de agua subterránea en superficie.

Sector 3 o sector de descarga intermedia. También este sector presenta

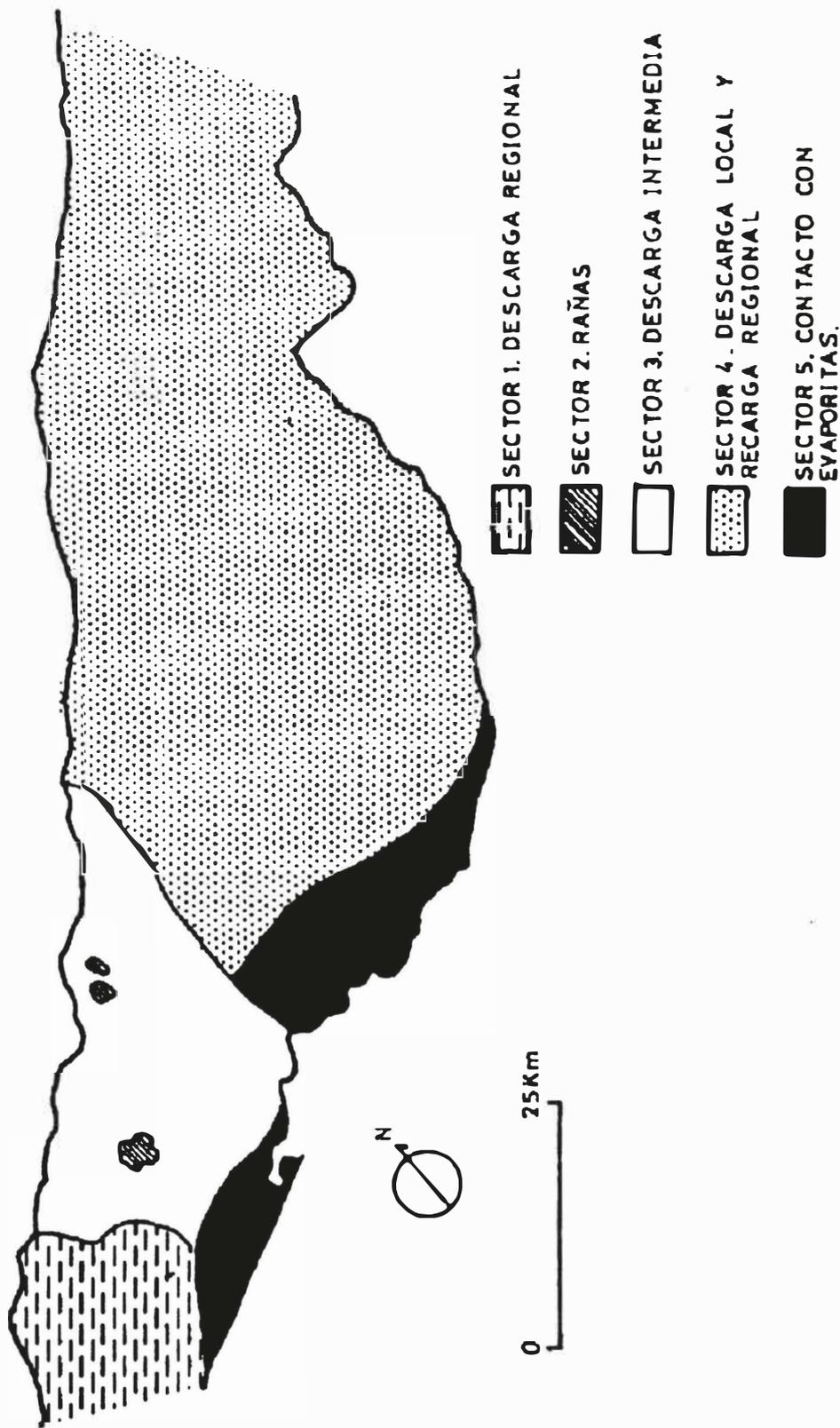


FIGURA 6.—Sectorización ambiental del acuífero de Madrid, obtenida mediante técnicas de análisis multivariante y observaciones de campo

rasgos similares a los del sector 1, produciéndose en él descarga de agua subterránea, aunque los valores de conductividad son ligeramente menores, ya que los flujos que llegan son de longitud intermedia.

Al igual que el sector 1, se trata de un área poco drenada y de naturaleza arenosa.

Sector 4 o sector de descarga local y recarga regional. Es el sector más extenso del acuífero de Madrid. Constituido fundamentalmente por la facies denominada Madrid, de carácter altamente arenoso.

Comprende tanto los interfluvios entre los grandes ríos que discurren por el acuífero, constituyendo la recarga del mismo, como los valles de los mismos ríos adyacentes a las áreas de recarga regional. Estas últimas áreas serán los puntos de descarga de flujos cortos según los modelos espaciales propuestos para este acuífero, aunque su incidencia en la sectorización que aquí se presenta es mínima debido a tratarse de fenómenos muy puntuales, indistinguibles de las áreas de recarga para la escala de trabajo utilizada.

Su hidrología superficial queda caracterizada por un escaso superávit en los meses de invierno.

Tanto la región de descarga local como la de recarga regional, son similares desde el punto de vista de las características químicas del agua subterránea. En ambos casos se trata de agua poco mineralizada al presentar un tiempo bajo de residencia en el subsuelo.

Sector 5 o sector de contacto con evaporitas.—Se trata de una pequeña área situada al SW, escasamente drenada y con un exceso hídrico bajo en los meses de invierno. La mineralización del agua subterránea es alta, debido presumiblemente a su contacto con los materiales evaporíticos que se extienden hacia el S. Sus características litológicas (arenas) junto a su escasa humedad hacen que la aparición de encharcamientos sea altamente improbable en esta región.

A partir de la presente sectorización se han evaluado las posibilidades de cada ecorregión para mantener formaciones palustres, así como sus características hidrológicas, mineralización de sus aguas y se han tipificado genética y funcionalmente los humedales en función de las características de cada sector ecológico homogéneo (tabla III).

TABLA III
PREDICCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS QUE PRESENTARÁN LOS HUMEDALES DE CADA SECTOR AMBIENTAL

	SECTOR 1	SECTOR 2	SECTOR 3	SECTOR 4	SECTOR 5
POSIBILIDAD DE QUE APAREZCAN ENCHARCAMIENTOS.	Alta	Alta	Alta	Baja-Media	Baja
ENTRADAS MAYORITARIAS DE AGUA	Subterr.	Superf.	Subterr.	Superf-Subt	Superf
PERMANENCIA DEL AGUA	Media-alta	Media	Media-alta	Baja	Baja
HIDROQUÍMICA	Mineralización alta	Dulce	Mineralización media	Dulce	Mineralizac. media
TIPOS GENÉTICO-FUNCIONALES DE HUMEDALES	Hipógenicos de flujos regionales mineralizados	Epigénicos sin sustrato impermeable en superficie	Hipógenicos de flujos regionales de mineralización media	Epigénicos con sustrato impermeable en superficie e hipogénicos de flujos corralizados	Epigénicos con sustrato impermeable en superficie.

Discusión

Las ventajas fundamentales del método que aquí se propone son claras a la hora de abordar estudios limnológicos de carácter regional. Por un lado, la utilización de sectorizaciones ambientales facilita la elección de áreas preferentes de muestreo, de forma que se recoja la máxima variabilidad regional con el mínimo esfuerzo (Bailey, 1984; MOPU, 1984); por otra parte, permite la realización de inventarios y clasificaciones ecológicas de humedales desde una perspectiva genético-funcional, que contribuyen en último término al desarrollo y gestión regional de estos sistemas (González Bernáldez, 1988).

En este sentido, la realización de dichas clasificaciones, atendiendo sobre todo a los factores del medio físico referentes a la hidrología superficial y subterránea, permitirá elaborar planes de minimización de los impactos producidos por la explotación de aguas subterránea.

Para el acuífero de Madrid, los factores indicadores que se consideran en el trazado de los sectores ecológicos y que condicionan la existencia y funcionamiento de los humedales hacen referencia tanto a la hidrología superficial que incidirá directamente en el grado de permanencia del agua en las formaciones palustres, como el grado de mineralización del agua subterránea que influirá decisivamente en las formaciones palustres que posean un aporte mayoritario de este tipo.

La geomorfología de los territorios del acuífero también resulta ser un factor decisivo en la génesis de los humedales: la ligera pendiente regional condiciona la existencia de flujos de agua subterránea de distinta longitud, que incide en la variabilidad palustre. Desde una perspectiva local, la diferenciación de áreas más deficientemente drenadas de otras con pendientes más acusadas favorece en las primeras la retención de agua, pudiendo aparecer humedales.

Por último, se ha comprobado que la escala utilizada en este tipo de trabajos regionales es fundamental para diferencias regiones ecológicamente homogéneas. En los casos en que la cartografía ambiental existente no tiene una escala de detalle suficiente para los objetivos del trabajo, las observaciones de campo resultan un complemento imprescindible para el trazado definitivo de los sectores.

Agradecimientos

A la Dra. I. Herráez, Dr. P. Herrera y M. Florín por sus sugerencias y revisiones de algunos aspectos que aparecen en este trabajo.

BIIBLIOGRAFÍA

- ALLUE, J. L.: *Subregiones fitoclimáticas de España*, Instituto Forestal de Inv. y experiencias, Dirección General de Montes, Caza y Pesca Fluvial, M. Agricultura, 1966.
- BAILEY, R. G.: «Delineation of ecosystem regions», *Env. manag.*, 7 (4), 1984, 365-373.
- «Testing an ecosystem regionalization», *J. Env. manag.*, 19, 1984, 239-248.
- CUSTODIO, E.: «Peculiaridades de la hidrología de los complejos palustres españoles», en *Bases Científicas para la Protección de los humedales españoles*, Real Academia de Ciencias Exactas, Física y Naturales, 1987.
- DE NICOLÁS, J. P.; CASADO, L. G.; SAN JUAN, J. G.: *Climatología básica de la subregión de Madrid*. MOPU. COPLACO, 1, 1979, 261 pp.
- DGOH: *Estudio de las zonas húmedas continentales de España. Inventario, tipificación y relación con el régimen hídrico general y medios de protección*. MOPU, 1990.
- DIXON, W. J. y BROWN, M. B.: *Biomedical Computer Programs*. P. series, University of California Press. Berkeley, 1987.
- EPA: *Technical support manual: wataerbody surveys and assessment for conducting use attainability analysis*, 1983.
- FERNÁNDEZ URÍA, A. J.: *Hidrogeoquímica de las aguas subterráneas en el sector oriental de la cuenca de Madrid*, tesis doctoral, Universidad Autónoma de Madrid, 1984.
- FLORIN, M.; MONTES, C.; RUEDA, F.: «Morphometric characteristics of La Mancha wetlands (central Spain) related to their origin and hidrological functioning. *Wetlands* (enviado).
- FONT, I.: *Climatología de España y Portugal*, Instituto Nacional de Meteorología, 1983.
- GONZÁLEZ BERNÁLDEZ, F.: «Las zonas encharcables españolas: el marco conceptual, en *Bases Científicas para la protección de los humedales españoles*, Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 1987.
- «Typology of wetlands and evaluation of they resources they represent», *Proc. Internat. Symp. on Hydrol. of wetlands in Semiarid and arid regions*, Sevilla, 1988, 7-36.
- GONZÁLEZ BERNÁLDEZ, F.; HERRERA, P.; LEVASSOR, C.; PECO, B.; SASTRE, A.: «Las aguas subterráneas en el paisaje», *Inv. y ciencia*, 127, 1987, 8-17.
- GONZÁLEZ BERNÁLDEZ, F.; MONTES, C.; BESTEIRO, A.G.; HERRERA, P.; PÉREZ, C.: *Los humedales del acuífero de Madrid: inventario y tipología según su origen y funcionamiento*, Canal de Isabel II, Madrid, 1989, 92 pp.
- HERNÁNDEZ PACHECO, E.: «Fisiografía del solar hispano», *Mem. R. Acad. Ciencias Fis. y Natu.* 16 (2), 1955, 1-793.
- HERRERA, P.: *Aspectos ecológicos de las aguas subterráneas en la facies arcósica de la cuenca de Madrid*, tesis doctoral, Universidad de Alcalá de Henares, 1987.
- HUGUET DE VILLAR, E.: *Geo-edafología*, Barcelona, Publicacions i edicions de la Universitat de Barcelona, Colección geocrítica, 1983.
- LLORCA, A. y RUIZ, M.: «Apuntes para una metodología objetiva de sectorización territorial», *Estudios territoriales*, 25, 1987, 109-119.

SECTORIZACIÓN ECOLÓGICA DEL ACUIFERO DE MADRID...

- LLORCA, A.; DE PABLO, C.; RUIZ, M.: «Caracterización ecológica del territorio: el empleo de procedimientos multivariantes. *Congreso Europeo de Ordenación de territorio*, Valencia, 1988.
- LÓPEZ VERA, F.: *Hidrología regional de la cuenca de río Jarama en los alrededores de Madrid*, tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 1975.
- «Modelo de sedimentación de los materiales detríticos de la Fosa de Madrid», *Tecniterrae*, 18, 1977, 64-69.
- MARTÍN ESCORZA, C.: «Aplicación de las imágenes LANDSAT al estudio de las relaciones entre la raña y la tectónica pliocena en la meseta central española», *Tecniterrae*, S-133, 1977, 1-15.
- MARTÍN ESCORZA, C. y HERNÁNDEZ ENRILE, J. L.: «Contribución al conocimiento de la geología del Terciario Occidental de la Fosa del Tajo», *Bol. R. Soc. Esp. Histo. Nat. (Geol.)* 70, 1972, 171-190.
- MARTÍNEZ ALFARO, P. E. *Hidrogeología de los materiales terciarios y cuaternarios de la cuenca del río Manzanares*, tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 1977.
- MONTES, C. y BIFANI, P.: *An ecological and economic analysis of current status of Spanish wetlands*, OCDE, 1990, 126 pp.
- MOPU: *Geografía y medio ambiente*, Monografías de la Dirección General de Medio Ambiente, 1984, 383 pp.
- RAMOS FERNÁNDEZ, A.: *Planificación física y ecológica. Modelos y métodos*, Ed. Magisterio Español, S.A., 1979, 216 pp.
- REBOLLO, L.: *Estudio hidrogeológico regional de la cuenca media y baja del río Guadarrama*, tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 1977.
- RUBIO, P. L.: *Hidrogeoquímica de las aguas subterráneas del sector occidental de la cuenca de Madrid*, tesis doctoral, Universidad Autónoma de Madrid, 1984.
- SASTRE, A.: *Hidrología regional de la cuenca terciaria del río Alberche*, tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 1978.
- THORNTHWAITE, C. W.: «An approach toward a rational classification of climate», *Geogr. Rev.* 38, 1948, 55-94
- TOTH, J.: «Properties and manifestations of regional groundwater movement», *24 th J.G.C.*, Section 11, 1972, 153-163.
- «The role of Regional Gravity Flow in the Chemical and thermal evolution of groundwater», *Proc 1. Canadian-American Conferen. on Hydrogeol.*, 1984.
- VIDAL-ABARCA, M. R.; MONTES, C.; SUÁREZ, M. L.; RAMÍREZ DÍAZ, L.: «Sectorización ecológica de cuencas fluviales: aplicación a la cuenca del río Segura (SE España)» (en prensa).
- VILLAROYA, F.: *Hidrogeología regional del Neogeno detrítico y cuaternario de la cuenca del río HERNANDES*, tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 1977.

RESUMEN.—Sectorización ecológica del acuífero de Madrid para una clasificación genética y funcional de humedales. Mediante el análisis cuantitativo de algunas variables del medio físico del acuífero de Madrid, que caracterizan tanto procesos superficiales como de aguas subterráneas, se han podido diferenciar unidades ambientales que muestran una cierta homogeneidad en cuanto a la posibilidad de mantener formaciones palustres con un origen y funcionamiento hidrológico similares.

PALABRAS CLAVE.—Sectorización ecológica. Aguas subterráneas. Clasificación de humedales. Acuífero de Madrid.