

Grado de dependencia de las aguas subterráneas, índice de funcionamiento hidrológico y principales amenazas en los principales humedales continentales de la depresión del Guadalquivir

M. Rodríguez-Rodríguez⁽¹⁾, F. Moral⁽¹⁾ y J. Benavente⁽²⁾

(1) Universidad Pablo de Olavide. Carretera de Utrera, km 1, 41013 Sevilla.
mrodrod@upo.es, fmormar@upo.es

(2) Instituto del Agua de la Universidad de Granada. Ramón y Cajal, 4, 18071 Granada.
jbenaven@ugr.es

RESUMEN

Se analizan los principales índices morfométricos, hidrogeoquímicos y climáticos en 26 lagunas de la depresión del Guadalquivir relacionadas con los materiales del frente subbético. Se ha comprobado que, en la mayoría de los casos, el ámbito de la cuenca vertiente superficial (CVS) es la unidad hidrológica a partir de la cual estos hidrosistemas reciben la recarga, tanto superficial como subterránea, de forma que son las unidades básicas para planificar su gestión hídrica. El área media de inundación (AMI) en cada laguna está condicionada por dos factores principales: la extensión de la CVS y la lluvia útil, excedente del balance hídrico del suelo, en cada complejo endorreico. Se constata que las AMIs se ajustan a estos dos factores en las lagunas endorreicas cuyo funcionamiento no está alterado por actividades antrópicas y que se ajustan al modelo conceptual propuesto. Así, se ha podido desarrollar un índice de funcionamiento hidrológico (IFH) que relaciona estas tres variables y que permite discriminar numéricamente las lagunas poco o nada alteradas y que se ajustan al modelo propuesto, del resto de sistemas. La morfología de la cubeta lacustre (profundidad máxima) es el factor fundamental relacionado con el hidroperiodo de las lagunas. Por otra parte, la hidrogeoquímica, que es altamente variable en estos sistemas, también se relaciona con el funcionamiento hidrogeológico de las lagunas y puede utilizarse como una variable más para determinar su funcionamiento hídrico. Finalmente, se han relacionado todas estas variables mediante análisis cluster y se han establecido agrupaciones que están en función del comportamiento hidrogeológico observado. Las principales modificaciones antrópicas que se han detectado en las lagunas aún poco alteradas, se relacionan con los procesos de colmatación de los vasos lacustres a consecuencia de cambios en los usos del suelo, a lo que se añaden los previsible cambios en las tendencias o patrones climáticos a corto-medio plazo, que afectarían a todos los humedales.

Palabras clave: Andalucía, funcionamiento hidrológico, lagunas endorreicas

Groundwater dependence degree, hydrological functioning index and main threats in the Guadalquivir basin continental wetlands

ABSTRACT

The main morphometric, hydrogeochemical and climatic indexes were analyzed in 26 ponds of the of the Guadalquivir basin, related to the materials of the subbetic front. It has been verified that, in most cases, the surface basin (CVS) is the hydrologic unit from which these ecosystems receive the surface and ground water inputs. Therefore, the CVSs can be considered as basic hydrological management units for the ponds studied. The average flooded area (AMI) in each pond is conditioned by two main factors: the extension of the CVS and the effective rainfall, which has been estimated as the surplus of the soil water budget. The AMIs adjusts to these two factors in the systems that are not altered by human activities and that are related to the conceptual model developed. Thus, it has been possible to create an index of hydrological functioning (IFH) that relates these variables and that allow us to discriminate the ecosystems that adjust to the proposed model from the rest of the ponds studied. The morphology of the basin (maximum depth) is the main factor related to the hydroperiod of the ponds. On the other hand, the hydrogeochemistry, highly variable, is partially related to the hydrogeological functioning of the ecosystems and can be employed as another variable to determine it. Finally, these variables have been related by statistical analysis and various clusters have been discriminated, that are in accordance with field observations. The main human modifications that have been detected in the systems are related to the filling of the basins as a result of changes in land uses, and future climate changes that would affect to all the ponds studied.

Key words: Andalusia, endorheic lakes, hydrological functioning

Introducción

El patrimonio de humedales de Andalucía es muy rico y su estado de conservación es relativamente bueno,

teniendo en cuenta, en primer lugar, los importantes cambios en los usos del suelo que han tenido lugar en este territorio y, en segundo lugar, que tradicionalmente las lagunas y marismas han sido sistemática-

mente drenadas para el uso agrícola o ganadero del suelo. Se estima que, en Andalucía, aproximadamente el 60% de la superficie ocupada por humedales ha sido drenada, fundamentalmente desde mediados del s.XIX (Moreira y Montes, 2005). Actualmente existen cerca de 200 lagunas o complejos lagunares incluidos en el Inventario de Humedales de Andalucía (Montes *et al.*, 2004), que se encuentran protegidos en su mayoría como Reservas, Parajes o Monumentos Naturales. Este número se incrementa progresivamente, ya que el Inventario de Humedales es abierto. De estos sistemas, 20 están también incluidos en la Lista de Ramsar, en la que sólo se incluyen los humedales que cumplan alguno de los Criterios de Importancia Internacional que fueron desarrollados por el Convenio de Ramsar, firmado en Irán en 1971. A pesar del grado de protección de que actualmente gozan estos humedales, es necesario un mayor conocimiento de su funcionamiento hídrico con objeto de enfocar la gestión de estas lagunas desde una perspectiva científica y no meramente política o administrativa, ya que, por ejemplo, los perímetros de protección en las lagunas, normalmente se establecieron de acuerdo con criterios administrativos tales como linderos, vías pecuarias, etc. Por otra parte, la legislación vigente, fundamentalmente la aplicación de las medidas establecidas en la Directiva Marco de Aguas de la

Unión Europea (WFD-CIS nº12, 2003), obliga a la caracterización hidrológica de estas masas de agua y al estudio de las relaciones hídricas con los acuíferos del entorno, es decir, la DMA exige establecer su posible dependencia de las aguas subterráneas (Rodríguez-Rodríguez y Benavente, 2008; Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2008) de cara a conocer los aportes hídricos necesarios para el mantenimiento de estos ecosistemas y de su funcionalidad.

Es el objetivo principal de este estudio comprobar, mediante el análisis de las variables básicas que inciden en su funcionamiento hídrico, el grado de dependencia de las aguas subterráneas en humedales relacionados con los materiales subbéticos. Para ello, se ha partido de un modelo conceptual de funcionamiento hidrológico y se han analizado conjuntamente, mediante técnicas estadísticas comunes y fácilmente reproducibles, las variables climáticas, morfométricas e hidrogeoquímicas que intervienen en este funcionamiento.

Área de estudio y modelo conceptual

Según su distribución geográfica, en Andalucía cabría distinguir entre las lagunas costeras (marismas o albuferas), cuyo funcionamiento se relaciona

Complejo	NOMBRE	UTM X	UTM Y	Altitud	Provincia	Municipio	Características del sustrato
Lucena	Dulce	357105	4131605	370	Córdoba	Lucena	Arcillas y carbonatos triásicos
	Amarga	357020	4131135	370	Córdoba	Lucena	Arcillas y carbonatos triásicos
	Rincon	356140	4147320	332	Córdoba	Moniles	Arcillas triásicas y margas miocenas
Alcaudete	Honda	389186	4161962	445	Jaén	Alcaudete	Arcillas, yesos y carbonatos triásicos
	Chinche	398329	4163840	449	Jaén	Alcaudete	Arcillas, yesos y carbonatos triásicos
	Conde	383812	4159648	413	Córdoba	Luque	Arcillas y yesos triásicos
	Gosque	327071	4111044	420	Sevilla	Martín de la Jara	Margas, arenas y conglomerados sobre sustrato triásico
	Jarales	360254	4130187	406	Córdoba	Lucena	Arcillas, arenas y margas sobre sustrato triásico
	Tíscar	338940	4144282	168	Córdoba	Puente Genil	Arcillas triásicas y margas miocenas
	Zóñar	350648	4150001	294	Córdoba	Aguilar	Arcillas triásicas y margas arenosas miocenas
Lantejuela	Ballestera	307314	4138111	150	Sevilla	Osuna	Margas, arcillas y arenas sobre sustrato triásico
	Calderín	312190	4137412	160	Sevilla	Osuna	Margas, arcillas y arenas sobre sustrato triásico
Utrera	Zarracatín	250830	4102627	40	Sevilla	Utrera	Arcillas y yesos triásicos
	Arjona	248946	4103037	40	Sevilla	Utrera	Arcillas y yesos triásicos
	Alcaparrasa	249630	4104532	20	Sevilla	Utrera	Arcillas y yesos triásicos
Lebrija - Las Cabezas	Chorroao	241297	4092114	60	Sevilla	Las Cabezas	Arcillas y yesos triásicos
	Cigarrera	240041	4087287	70	Sevilla	Lebrija	Arcillas y yesos triásicos
	Galiana	240522	4087473	60	Sevilla	Lebrija	Arcillas y yesos triásicos
	Peña	240472	4088020	60	Sevilla	Lebrija	Arcillas y yesos triásicos
	Pilon	241783	4088275	80	Sevilla	Lebrija	Arcillas y yesos triásicos
	Taraje	242813	4089905	130	Sevilla	Las Cabezas	Arcillas y yesos triásicos
Espera	Hondilla	245061	4084676	100	Cádiz	Espera	Arcillas y yesos triásicos
	Salada Zomilla	244538	4084160	100	Cádiz	Espera	Arcillas y yesos triásicos
	Dulce Zomilla	244891	4083003	110	Cádiz	Espera	Arcillas y yesos triásicos
	Tollos	231031	4081984	54	Cádiz	Jerez	Margas lacustres pliocenas
	Medina	227382	4056902	30	Cádiz	Jerez	Arcillas y yesos triásicos

Tabla 1. Localización y características del sustrato de las lagunas estudiadas
Table 1. Location and characteristics of the substratum of the systems studied

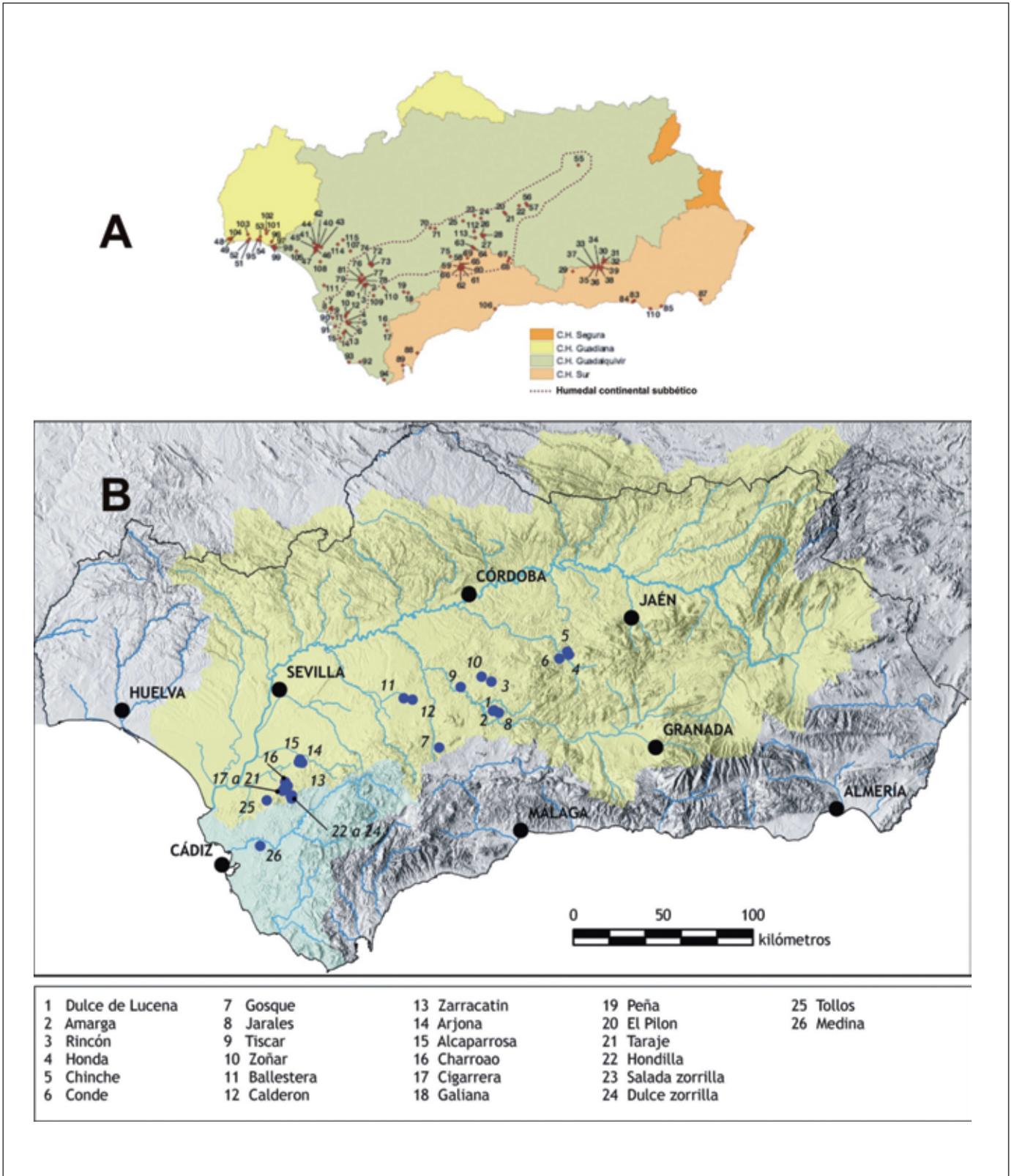


Figura 1 A. Localización de las lagunas continentales de la depresión del Guadalquivir (modificado de Montes et al., 2004). B. Localización de las 26 lagunas estudiadas
 Figure 1 A. Location of the continental ponds and pools of the Guadalquivir basin (modified from Montes et al., 2004). B. Location of the 26 systems studied

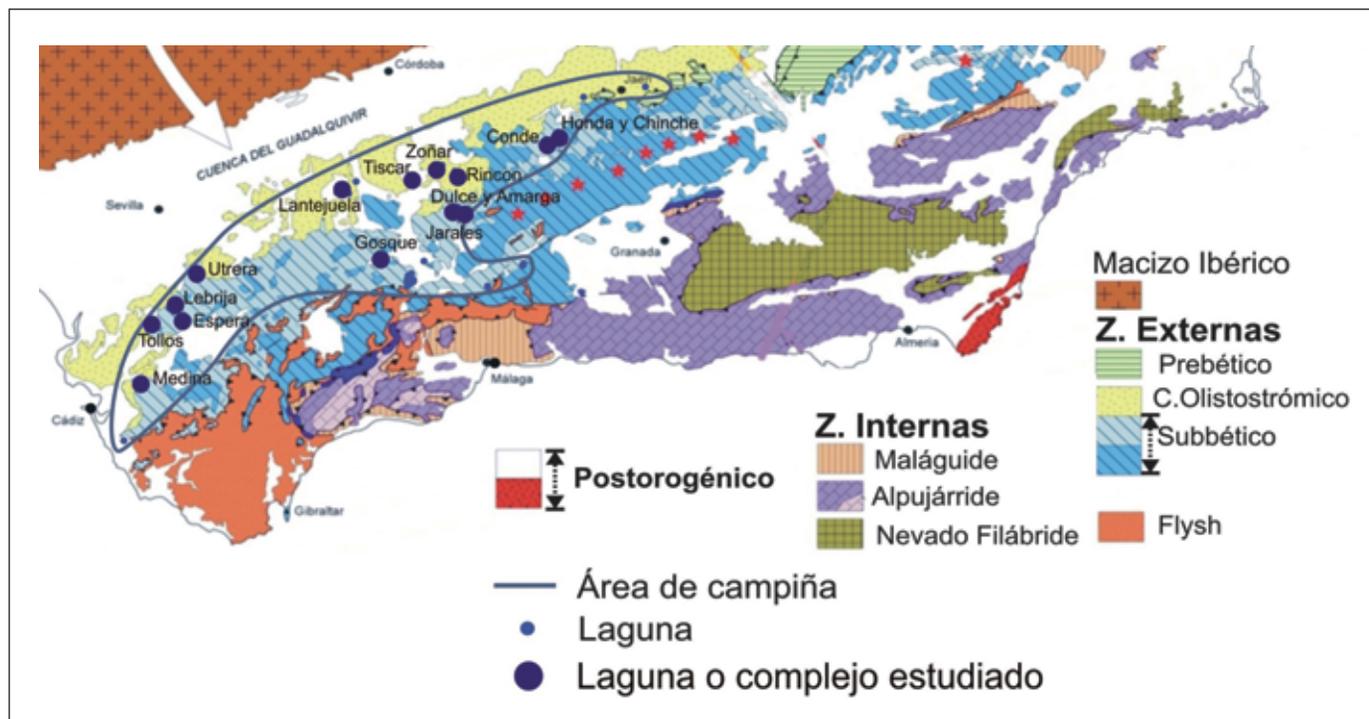


Figura 2. Contexto geológico. Obsérvese la coincidencia entre la posición de las lagunas, que muestra un marcado componente E-NE O-SO y la orientación del frente subbético (modificado de Vera, 2004). * Estrellas: Rocas volcánicas

Figure 2. Geological context. Observe the coincidence between the locations of the ponds, with a marked E-NE W-SW component and the orientation of the subbetic front (modified from Vera, 2004). * Stars: Volcanic rock

con la presencia, más o menos cercana, de la línea de costa y las lagunas continentales, cuyos aportes hídricos provienen de la precipitación directa sobre las cubetas y de la escorrentía generada en sus cuencas (figura 1). Dentro de este grupo, habría que diferenciar entre las lagunas de montaña de origen glacial y kárstico s.s. (karstificación en materiales carbonáticos) de la Cordillera Bética y las lagunas relacionadas con los materiales arcillosos subbéticos (figura 2), también denominadas “lagunas de campiña” (Moral *et al.*, 2008b; Moral *et al.*, 2008d) y que son las que se estudiarán en el presente trabajo (figura 1). Concretamente, se trata de las 26 lagunas continentales más importantes de las provincias de Cádiz, Sevilla, Córdoba y Jaén (tabla 1), cuya morfometría, clima y contexto hidrogeológico ha sido estudiado por los autores gracias a una serie de proyectos que se han llevado a cabo entre las universidades de Granada y Pablo de Olavide con organismos públicos y privados como la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (Benavente *et al.*, 2005a, b; Moral *et al.*, 2008d) o E.G.M.A.S.A. (Moral *et al.*, 2008a).

Las lagunas tienen superficies de inundación comprendidas entre $2 \cdot 10^4$ m² y más de $100 \cdot 10^4$ m² y sus

cuencas vertientes, en su mayoría endorreicas, tienen un tamaño que oscila entre $20 \cdot 10^4$ m² y $1800 \cdot 10^4$ m² (tabla 2). El origen de estas cuencas es discutido, si bien los procesos genéticos deben estar relacionados con fenómenos tectónicos y de tipo halocinético (Moral *et al.*, 2008b) en los materiales evaporíticos de origen triásico o con la karstificación de estos materiales, que constituyen el sustrato de las cuencas en la mayor parte de los casos (Calaforra, 2004; Calaforra y Pulido-Bosch, 1999).

Como se puede observar en la figura 2, las lagunas estudiadas se sitúan en relación con los materiales del frente subbético y los materiales del complejo olistostrómico de la depresión del Guadalquivir (Vera, 2004). En definitiva, se trata de una zona en la que abundan materiales de origen triásico de edad Keuper y de naturaleza marga - arcillosa, que pueden englobar olistolitos (i.e. bloques) de distintos tamaños (desde metros hasta varios kilómetros), de características litológicas heterogéneas (dolomías, areniscas, yesos, etc.) que se desplazaron gravitatoriamente en dirección N-NO hacia la cuenca marina miocena. En general, la mayor dureza y resistencia a la erosión de estos bloques con respecto a

NOMBRE	CVS	AMI	CVS/AMI	Lluvia útil (mm)	IAH	Salinidad mediana (g/l)	Prof. Máx.
Dulce	312.6	11.8	26.4	76.8	2.03	0.3	1.10
Amarga	255.4	5.0	50.7	76.8	3.90	4.0	4.30
Rincon	296.8	9.4	31.5	119.5	3.77	1.6	5.40
Honda	96.2	8.5	11.4	72.0	0.82	21.2	1.50
Chinche	49.3	3.4	14.5	72.0	1.04	1.0	0.30
Conde	1108.5	61.5	18.0	72.0	1.30	5.7	1.20
Gosque	1198.7	43.3	27.7	114.5	3.17	9.8	3.00
Jarales	88.5	5.5	16.1	76.8	1.23	7.0	1.80
Tiscar	272.3	11.9	22.9	50.5	1.16	16.5	1.12
Zoñar	1011.4	45.9	22.0	83.6	1.84	1.6	15.40
Ballestera	145.2	25.4	5.7	54.0	0.31	18.0	0.50
Calderón	80.7	5.9	13.7	54.0	0.74	22.1	0.50
Zarracatin	323.1	62.5	5.2	90.0	0.47	37.5	0.70
Arjona	148	9.3	15.9	90.0	1.43	1.2	3.50
Alcaparrosa	128.7	6	21.5	90.0	1.93	7.8	1.10
Charroao	72.5	4.9	14.8	101.8	1.51	0.3	0.20
Cigarrera	96.3	4.2	22.9	101.8	2.33	1.3	1.20
Galiana	30.7	1.7	18.1	101.8	1.84	2.0	1.10
Peña	106	5.7	18.6	101.8	1.89	1.8	2.65
Pilon	69	5	13.8	101.8	1.41	1.1	1.25
Taraje	154	11.4	13.5	101.8	1.38	1.1	3.60
Hondilla	37	2.6	14.2	102.0	1.45	1.3	3.00
Salada Zorrilla	119.7	12	10.0	102.0	1.02	3.8	2.00
Dulce Zorrilla	58.7	6.3	9.3	102.0	0.95	2.3	2.50
Tollos	500	54.7	9.1	127.0	1.16	2.7	0.30
Medina	1800	120	15.0	142.0	2.13	2.9	3.50

Tabla 2. Características morfométricas, climáticas y de salinidad mediana en las lagunas estudiadas. CVS, AMI (ha), Prof. Máx (m)
 Table 2. Morphometric and climatic characteristics and median salinity in the systems studied. CVS, AMI (ha), Máx Depth (m)

las arcillas de origen triásico, provoca que afloren en terrenos elevados (cerros). En contacto discordante sobre estos materiales, se disponen rocas marinas de diferentes edades depositadas durante el relleno de la cuenca. Entre el Oligoceno y el Mioceno superior se depositaron abundantes margas, algo arenosas, y margocalizas de colores blancos y grises y con abundantes microfósiles de composición silíceo (albarizas). De manera general, se consideran como materiales paraautóctonos, ya que se supone que sufrieron cierto desplazamiento durante la orogenia alpina. Los materiales autóctonos se depositaron durante y posteriormente al desplazamiento gravitatorio del complejo olistoestrómico. Son, fundamentalmente, materiales marinos correspondientes a una etapa de transgresión durante el Tortoniense (margas azules) y una posterior regresión Messiniense (are-

niscas bioclásticas, conocidas como albero). Durante el Plioceno y el Cuaternario, tras la emersión de la cuenca, abundan materiales de tipo continental: aluvial, coluvial o lacustre. Es en este contexto donde comienzan a formarse lagunas o humedales más extensos. Algunos de estos humedales más antiguos (finales del Plioceno) comenzaron siendo grandes albuferas y han permanecido hasta nuestros días, tras la retirada de la línea costera, como es el caso de la laguna de Los Tollos, entre las provincias de Sevilla y Cádiz (Moral *et al.*, 2008a). En otros casos, la mayoría, las cubetas endorreicas se formaron en un medio continental, siendo rellenadas progresivamente con materiales fluvio-lacustres. Estos materiales tienen una cierta porosidad de tipo intergranular y constituyen acuíferos de pequeño tamaño, pero de gran importancia para el funcionamiento hídrico de estos

ecosistemas; han sido denominados por diversos autores "acuífero de fondo de cubeta". Así, el modelo de laguna de campiña empleado en este trabajo y que se puede observar en la figura 3, se basa en la existencia de estos acuíferos bajo las lagunas. Este modelo se ha elaborado a partir de tres criterios fundamentales: en primer lugar, la interpretación de datos hidrogeológicos (medidas de nivel piezométrico y de parámetros hidroquímicos) en puntos de agua inventariados en cada sistema: pozos, sondeos, etc.; en segundo lugar, del análisis en campo y en la cartografía existente de las características y geometría de las rocas que afloran en las cuencas de las lagunas; y, finalmente, en la interpretación de resultados obtenidos de los balances hídricos de cada laguna tras la caracterización climática local. Según este modelo, las lagunas suelen situarse sobre materiales arcillosos o margo-arcillosos y, por tanto, poco permeables (acuitardos). En este caso, las entradas de agua a las lagunas provienen de la escorrentía superficial y subsuperficial generada en estas cuencas y de la precipitación sobre el vaso lacustre. De esta manera, la cuenca vertiente superficial (CVS) e hidrogeológica serían altamente coincidentes.

En este contexto hidrogeológico, los materiales

permeables, en general poco extensos, corresponden al acuífero de fondo de cubeta a los bloques de yesos o carbonatos (olistolitos) y a los estratos de areniscas del Mioceno Superior. No obstante, los aportes hídricos subterráneos pueden ser significativamente importantes, especialmente en lagunas situadas sobre cuencas vertientes de mayores dimensiones (del orden de 10^7 a 10^8 m²), como es el caso de las lagunas de El Gosque, en Sevilla o la laguna de Fuente de Piedra, en Málaga, entre otras. En estos casos, la salinidad media del agua suele ser sustancialmente superior (10 - 200 mS/cm). Según algunos autores (Briere, 2000; Rosen, 1994) estas lagunas con el fondo extremadamente plano, hipersalinas y temporales se denominan lagunas de tipo "playa". Estos playa-lakes, inicialmente definidos y estudiados en las regiones de clima semiárido del sur de los Estados Unidos, han sido también identificados en nuestro país, donde constituyen ecosistemas muy poco comunes en Europa (Castañeda y García-Vera, 2008; Castañeda *et al.*, 2005; Rodríguez-Rodríguez, 2007; Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2006; Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2007a). El hecho de que existan flujos subterráneos más importantes en estos sistemas ha provocado en algunos casos la explotación inten-

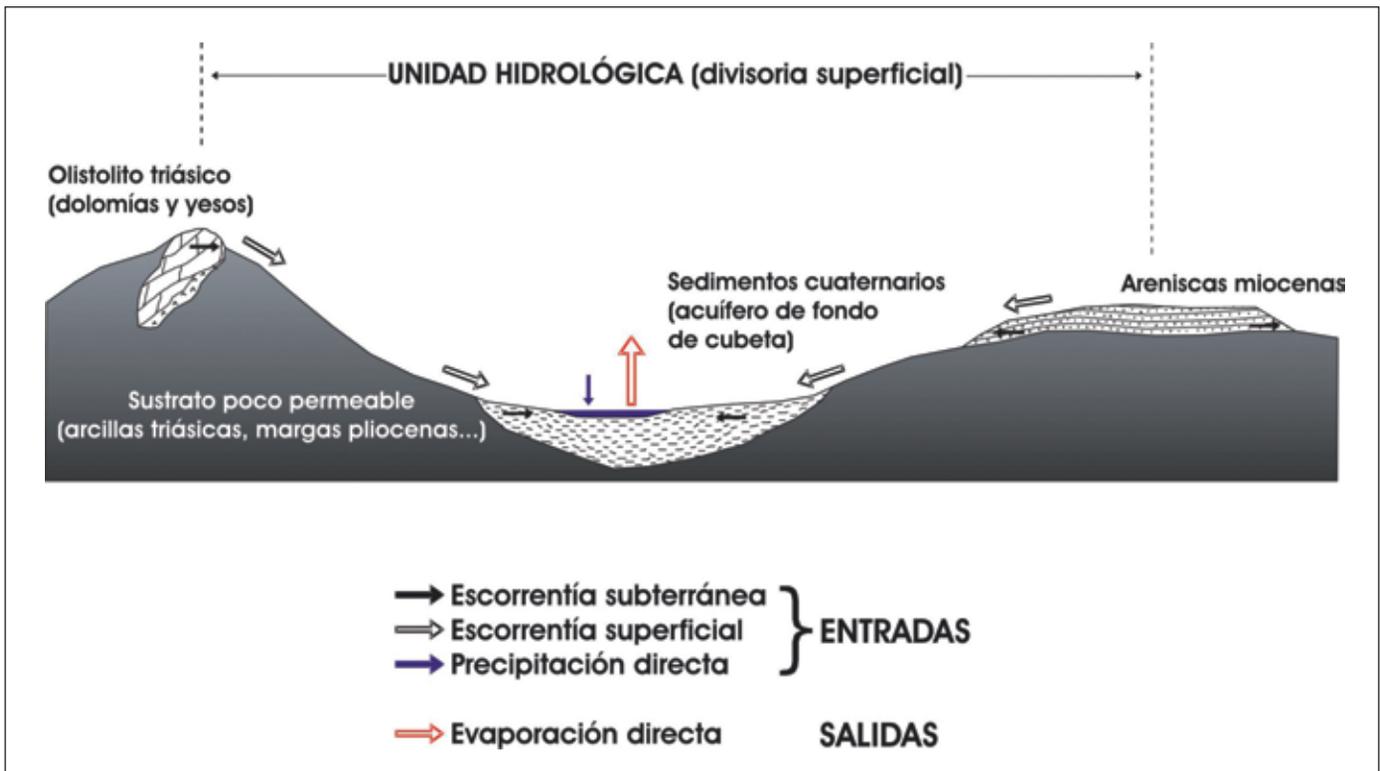


Figura 3. Modelo conceptual de laguna de campiña
Figure 3. Conceptual model of a lowland pond

siva de las aguas subterráneas en las cuencas vertientes, sobre todo a partir de la implantación del regadío en el olivar, lo cual está reduciendo los aportes subterráneos a estos humedales.

Metodología

Se ha realizado un análisis climático en todos los humedales estudiados con objeto de cuantificar los recursos hídricos medios anuales en cada zona. La lluvia útil (Ll.U.) se ha cuantificado a partir de balances de agua en el suelo en cada uno de los sistemas estudiados, calibrados en las lagunas de Jarales y Zóñar. La metodología de detalle para el cálculo de estas variables está disponible en la bibliografía (Moral *et al.*, 2008d). Los datos climáticos han sido proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología y la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Para el análisis hidroquímico se han empleado series temporales en las lagunas estudiadas desde el año 1997 hasta la actualidad (datos proporcionados por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía). Dado que la mayoría de estos sistemas son temporales, los valores máximos de salinidad son muy elevados. Por tanto, la distribución de la variable salinidad es asimétrica hacia la derecha en la mayor parte de los casos (i.e. coeficiente de asimetría positivo; ej. 1,2 en Tíscar; 1,8 en Cigarrera ó 2,1 en Zarracatín). Por esta razón, se considera más adecuado utilizar la mediana como valor central de la distribución de frecuencias de la salinidad para la caracterización de las lagunas. Para ello, se han calculado las salinidades medianas en todas las lagunas para las series temporales consideradas. Se ha obtenido un coeficiente salinidad mediana / salinidad media de 0,72 para las lagunas estudiadas.

Respecto a la morfometría, las áreas medias de inundación y cuencas vertientes se han determinado mediante el análisis del Modelo Digital del Terreno de Andalucía (C.M.A., 2005) y posterior revisión en campo. Las profundidades máximas de las cubetas lacustres se han determinado a partir de los mapas batimétricos en algunos casos (Zóñar ó Tollos), medidas en campo (Chinche ó Charroao) y revisión bibliográfica (Montes *et al.*, 2004; Moreira y Montes, 2005). El Índice de Funcionamiento Hidrológico (IFH) se ha calculado a partir de las variables morfométricas y climáticas mediante la ecuación $IFH = (CVS/AMI) \cdot (Ll.U./1000)$. Este índice nos permite conocer el ajuste del sistema al modelo conceptual considerado y contribuye al conocimiento del funcionamiento hídrico del humedal. Asimismo, permite diagnosticar si la laguna puede estar afectada por

actuaciones en la cuenca vertiente tales como explotación de los acuíferos asociados, drenajes subterráneos, etc. La ventaja de este índice es que, para detectar un posible desajuste en el hidropereodo de un determinado humedal, no es necesario el análisis de series largas de variaciones de nivel de la lámina de agua (la mayoría de los humedales andaluces carece de estas series, o son incompletas). Además, la evolución de nivel está condicionada por el régimen de precipitaciones, que es muy variable.

La metodología estadística ha consistido en un análisis descriptivo (obtención de la mediana) y un análisis de conglomerados (cluster) mediante el método de agregación de Ward y utilizando la distancia euclídea. Se han tenido en cuenta todas las variables que aparecen en la tabla 2, ya que el objetivo básico de esta metodología estadística es el de agrupar las observaciones (lagunas) de forma que los datos sean muy homogéneos dentro de los grupos (mínima varianza) y que estos grupos sean lo más heterogéneos posible entre ellos (máxima varianza). De este modo, se obtiene una clasificación de los datos multivariante con la que podemos comprender mejor los mismos y si las variables elegidas son realmente las más influyentes en el comportamiento (en este caso, el funcionamiento hídrico) de la población analizada. Es conveniente señalar que, para una correcta aplicación de esta metodología, no se deben elegir variables indiscriminadamente ya que el resultado final (dendrograma) es muy sensible a la inclusión de alguna variable irrelevante. Así, la inclusión indiscriminada de variables aumenta la probabilidad de atípicos o tipologías erróneas.

Resultados y discusión

Parámetros morfoclimáticos y salinidad del agua

En la tabla 2 se pueden observar los principales valores morfoclimáticos y de salinidad mediana obtenidos para las lagunas estudiadas, así como el índice de funcionamiento hidrológico calculado. Las únicas cuatro lagunas con cuencas vertientes de más de $1000 \cdot 10^4$ m² son las del Gosque, Conde, Zóñar y Medina. Las lagunas tienen una superficie media de $20 \cdot 10^4$ m², valor que oscila entre $1,7 \cdot 10^4$ m² (laguna de Galiana) y $120 \cdot 10^4$ m² (laguna de Medina). La relación cuenca / laguna (CVS/AMI) se sitúa en un rango entre 5 y 50, con un valor medio de 17,8. La lluvia útil calculada a partir del balance de agua en el suelo para cada humedal es muy variable. Se ha observado un marcado gradiente entre los mínimos valores obtenidos en los humedales del sur de la provincia de

Córdoba (Tiscar) y este de la de Sevilla (Calderón, Ballestera), con valores anuales de lluvia útil cercanos a 52 mm, y los máximos obtenidos en las lagunas de la provincia de Cádiz, mayores en función de la cercanía a la costa: 127 mm/año en Los Tollos y 147 mm/año en Medina. En función de la salinidad mediana, únicamente dos lagunas (Charroao y Dulce) son de aguas dulces (i.e. salinidad < 0,5 g/l). El resto, salvo de laguna de Zarracatín, de aguas salinas (i.e. salinidad > 30 g/l), presentan aguas salobres (salinidad: 0,5-30 g/l). Respecto a la profundidad máxima destaca la laguna de Zóñar, con 15,4 m. A partir de esa cota rebosa hacia la cercana laguna Chica. El resto de los humedales estudiados son relativamente someros y, salvo la laguna de Rincón con 5,4 m, tienen menos de 5 m de profundidad máxima.

Finalmente, el índice de funcionamiento hidrológico (IFH) propuesto permite la caracterización del estado de cada humedal, en función de relaciones morfométricas (CVS/AMI) y climáticas (lluvia útil). Para las 26 lagunas estudiadas, varía entre 3,90 (laguna Amarga) y 0,31 (Ballestera). Según el modelo propuesto, únicamente la escorrentía (superficial y subterránea) generada en la cuenca vertiente alimenta al sistema. El 70% de las lagunas tienen un IFH cercano al intervalo entre 1 y 2. Se interpreta que este intervalo indica que la laguna no tiene una alteración significativa del funcionamiento hídrico, ya que el vaso lacustre se ajusta al tamaño de la cuenca vertiente para los recursos disponibles en esa zona (que vienen determinados por la lluvia útil) y que, además, estos recursos provienen exclusivamente de las cuencas superficial e hidrogeológica, que son coincidentes

(figura 3). En estos casos (laguna los Jarales, Honda, Arjona, Pilón, Taraje, Hondilla, etc.) la gestión del humedal debe centrarse en la superficie ocupada por la cuenca vertiente, que debería preservarse como zona especial de protección hídrica (figura 4). Un IFH entre 2 y 3 indica que la laguna tiene un cierto grado de alteración, que puede ser debido a un drenaje o un pequeño rebosadero (Cigarrera, Medina). Si el IFH es mayor de 3, esto podría indicar que la laguna pierde buena parte de sus recursos hídricos por otras vías, aparte de la evapotranspiración desde la cubeta. Así, la laguna puede ser "perdedora" y recargar al acuífero (laguna Amarga). En otros casos, los recursos pueden estar siendo extraídos mediante explotación intensiva de las aguas subterráneas (laguna del Gosque). Un IFH entre 0 y 1 indica lo contrario: lagunas que podrían estar recibiendo aportes externos a su cuenca vertiente superficial. Estos aportes pueden ser naturales, por descarga subterránea de un acuífero extenso (lagunas Ballestera, Calderón o Zarracatín) o podrían deberse a regadíos con aguas superficiales (figura 5).

Análisis estadístico de las variables morfoclimáticas y la salinidad

En la figura 6 se puede observar el dendrograma obtenido al relacionar las variables que tienen una mayor importancia en el funcionamiento hidrológico y, por tanto, definen el régimen hídrico de las lagunas estudiadas. Estas variables son de tipo morfométrico: profundidades máximas que, en última instancia,

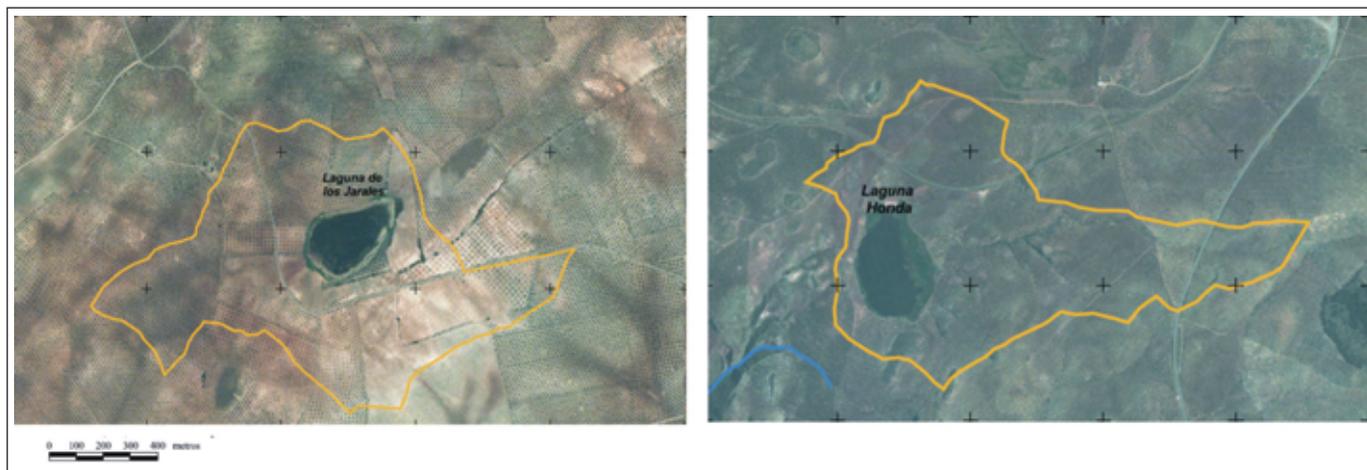


Figura 4. Ortofotografía (vuelo fotogramétrico 1:60000, año 1998-99) y cuenca vertiente de las lagunas de los Jarales (Lucena) y Honda (Alcaudete)

Figure 4. Aerial photograph (photogrametric flight 1:60000, years 1998-99) and surface basin of Jarales (Lucena) and Honda (Alcaudete) pools



Figura 5. Laguna de La Ballestera (Complejo Endorreico de La Lantejuela) en marzo de 2008
Figure 5. Ballestera playa-lake (Lantejuela complex) in march 2008

están en función de la batimetría de detalle del vaso; AMIs y CVSs; climáticas: lluvia útil media a partir de balances de agua en el suelo; e hidroquímicas: medianas de la salinidad a partir de registros analíticos suficientemente largos. El análisis conjunto de este reducido número de variables ha permitido, mediante métodos estadísticos comunes, establecer una serie de agrupaciones que relacionan a los humedales con un comportamiento hídrico semejante (menor distancia o “disimilaridad”) y segregan los sistemas cuyo funcionamiento está menos ajustado al modelo conceptual de humedal continental propuesto en este trabajo. Así, en función de la distancia de corte elegida, se pueden diferenciar varios grupos de humedales (clusters). El primer rasgo que se observa en el dendrograma es que los dos principales grupos que se segregan, se separan a partir de un grado de disimilaridad relativamente alto, aproximadamente 50, (figura 6). Las 14 lagunas que se agrupan según el modelo conceptual propuesto (E) tienen un funcionamiento muy diferenciado de las 12 restantes (D y R), que no se ajustan al modelo conceptual propuesto o estarán alteradas antrópicamente, como se comentará más adelante. Dentro del grupo E, las diferencias entre el resto de clusters (1, 2, 3 y 4) no tienen que ver con el régimen o funcionamiento hídrico general, sino con otras características, como pueden ser el hidroperiodo o la litología del sustrato.

El grupo D está formado por 5 lagunas. De éstas, 2 (Calderón y Ballestera) pertenecen al complejo endorreico de la Lantejuela. Estas lagunas se sitúan sobre un acuífero detrítico muy extenso, que fue definido por vez primera por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y el Instituto Geológico y Minero en 2001

(CHG-IGME, 2001) y se denomina “Los Llanos de Osuna – La Lantejuela”. Las relaciones hídricas de las aguas subterráneas del acuífero y el complejo endorreico de La Lantejuela han sido constatadas recientemente en varios informes y publicaciones (Moral *et al.*, 2008c; Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2008). De estos trabajos se deriva que, si bien actualmente el acuífero está sometido a una explotación intensa de sus recursos subterráneos y sus niveles han descendido, en régimen natural estas lagunas son dependientes de las aguas subterráneas y, por tanto, en parte reciben agua (descarga subterránea) que proviene de un ámbito más extenso que el de su cuenca vertiente superficial (figura 9). Por otra parte, tanto la laguna de Tíscar (Córdoba) como la de Zarracatín (Sevilla), reciben también aportes externos a sus respectivas cuencas vertientes (figura 7). En el primer caso debido a excedentes de riegos (Moral *et al.*, 2008d) y en el segundo a partir de un manantial salino que surge de un escarpe de yesos triásicos en su orilla sur (Benavente *et al.*, 2005b). Por tanto, este grupo de lagunas se alimentan por escorrentía generada tanto en su propia cuenca como a partir de recursos externos a la misma, ya sean éstos de origen subterráneo o superficial. El comportamiento hídrico del siguiente grupo (el más numeroso) se ajusta estrictamente al modelo conceptual propuesto, sus recursos provienen de la escorrentía (E) generada en su cuenca vertiente. En este caso se han diferenciado lagunas en función del hidroperiodo, desde lagunas con un hidroperiodo temporal como las del grupo 1 (Alcaparrosa, Cigarrera) a lagunas semipermanentes (grupo 3). Hay que señalar que algunas de las lagunas efímeras (grupo 2) están parcialmente drenadas,

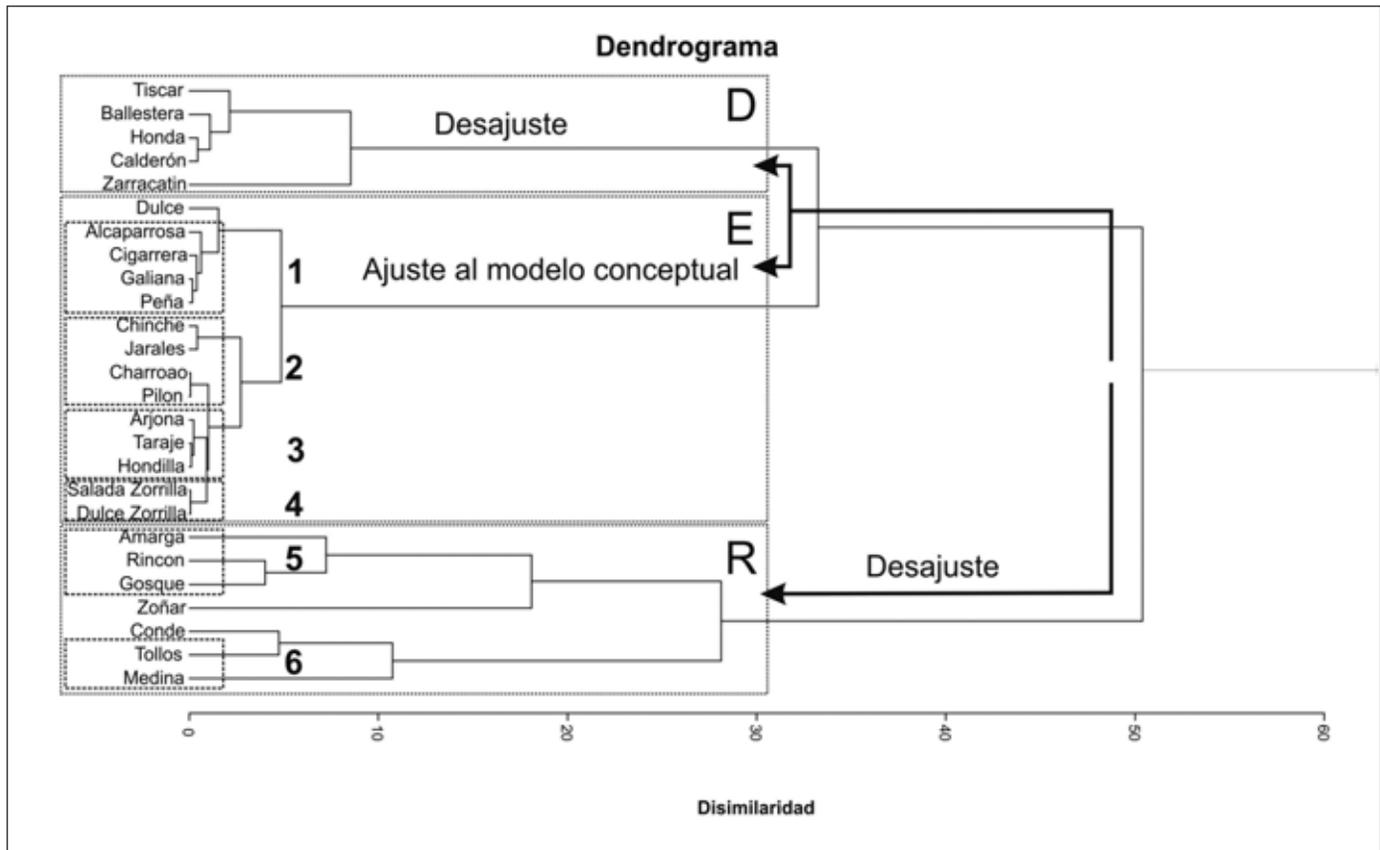


Figura 6. Dendrograma (cluster) por individuos obtenido al relacionar las variables morfoclimáticas e hidroquímicas de las lagunas estudiadas
 Figure 6. Dendrogram (cluster) by cases obtained from the relation of the morphoclimatic and hydrochemical variables of the systems studied

como la laguna del Chinche (Jaén) o Charroao (Sevilla). De esta manera, el grupo se segrega de los demás, en parte, debido a esta razón. Las lagunas del grupo 4 pertenecen al complejo de Espera (Cádiz). El grupo de lagunas de Lebrija y Espera tienen un comportamiento hidrológico similar y, de hecho, se ajustan todas al modelo conceptual propuesto. Su situación, sobre materiales triásicos subbéticos muy poco permeables, puede observarse en el perfil de la figura 9. La topografía es muy accidentada, propia de estas litologías triásicas, y las lagunas ocupan el fondo de estas depresiones, cuando el drenaje está impedido. La ausencia de materiales permeables en esta zona, como carbonatos o areniscas, hace difícil plantearse que estos sistemas sean dependientes de aguas subterráneas regionales. Más bien al contrario, deben ser dependientes de la escorrentía superficial y subterránea desde sus cuencas.

Las 7 lagunas restantes (figura 6), que son del tipo R, están situadas en contextos geológicos muy diferentes: lagunas sobre materiales triásicos s.s., como

la laguna Amarga (Córdoba) o Medina (Cádiz), sobre margocalizas pliocenas como la laguna de Los Tollos (Sevilla-Cádiz) o en zonas con rellenos detríticos cuaternarios de importancia, como la laguna del Gosque (Sevilla). Asimismo, la morfometría del vaso lacustre es muy diferente en cada una de ellas, desde lagunas profundas y permanentes como Zóñar a lagunas someras y efímeras, como la del Conde. Las facies hidroquímicas del agua de estos sistemas son, por otra parte, muy dispares.

En el caso de las lagunas Amarga y Gosque (subgrupo 5), se sitúan sobre cuencas vertientes extensas y deberían tener superficies medias de inundación de mayor tamaño. Esta situación implica, necesariamente, que las salidas se producen por evaporación (como en el resto), pero también por infiltración profunda (recarga) hacia el acuífero, rebosaderos o salidas "forzadas" (bombeos). En el primer caso se encuentra la laguna Amarga (Córdoba), que efectivamente es una laguna de recarga que cede parte de sus recursos mediante flujos subterráneos (Moral et



Figura 7. Surgencia salina en el borde oriental de la laguna de Zarracatin (Complejo Endorreico de Utrera) en diciembre de 2004
Figure 7. Saline spring in the eastern end of Zarracatin playa-lake (Utrera complex) in December 2004



Figura 8. Ortofotografía (vuelo fotogramétrico 1:60000, año 1998-99) y cuenca vertiente de la laguna del Gosque (Martín de la Jara). Se incluye el AMI actual de laguna
Figure 8. Aerial photograph (photogrametric flight 1:60000, years 1998-99) and surface basin of Gosque (Martín de la Jara) playa-lake. Actual surface basin of the playa-lake is included

al, 2008c). En el segundo, las salidas “forzadas” ocurren en la laguna del Gosque, en Sevilla, cuya cuenca vertiente está siendo sometida a una intensa explotación de sus recursos subterráneos mediante bombos para regadío de olivar (figura 8). Por otra parte, la laguna de Los Tollos, (subgrupo 6) está gravemente alterada por la actividad minera (Benavente *et al.*, 2005a; Moral *et al.*, 2008a). El esquema de esta grave alteración se puede observar en la figura 9. Finalmente, las lagunas de Medina (Cádiz), Rincón y Zóñar (Córdoba) tienen rebosaderos que son activos durante periodos de lluvias intensas (Moral *et al.*, 2008c).

Implicaciones hidrogeológicas: dependencia de las aguas subterráneas

Una de las implicaciones hidrogeológicas que se obtienen de estos resultados es que, contrariamente a lo que normalmente se piensa, las lagunas permanentes o semipermanentes no han de tener, necesariamente, una alimentación proveniente de flujos subterráneos regionales que exceden los límites de las cuencas. Más bien, el hidroperiodo de estas lagunas debe estar relacionado con la morfometría del vaso lacustre, sobre todo con la profundidad máxima, y las características climáticas de la zona. Es el caso de las lagunas Hondilla, Arjona o Taraje. Otras lagunas permanentes, como Amarga, Rincón o Zóñar, si

bien pueden recibir escorrentía subterránea generada en sus cuencas vertientes, pierden incluso parte de su alimentación por recarga o rebosaderos. Las lagunas continentales con aportes subterráneos externos a sus cuencas superficiales suelen ser hipersalinas y temporales, como Zarracatin o Ballestera, estando este hidroperiodo condicionado por la escasa pendiente de las cubetas.

Por último, cabría señalar que todas las lagunas que han sido objeto de estudio podrían ser clasificadas como dependientes de las aguas subterráneas, dado que en todos los casos se ha observado un acuífero en relación con cada cubeta endorreica. Sin embargo, la escala y la productividad de los acuíferos de los que dependen estos ecosistemas es diferente. De acuerdo con los resultados obtenidos, se distinguen lagunas relacionadas con los acuíferos de relleno de fondo de cubeta y situadas en cuencas endorreicas constituidas por materiales acuitardos y, por tanto, de baja permeabilidad (figuras 3 y 6-E). En estos casos, las cuencas constituyen verdaderas trampas de sedimentos, agua y sales. Los aportes de

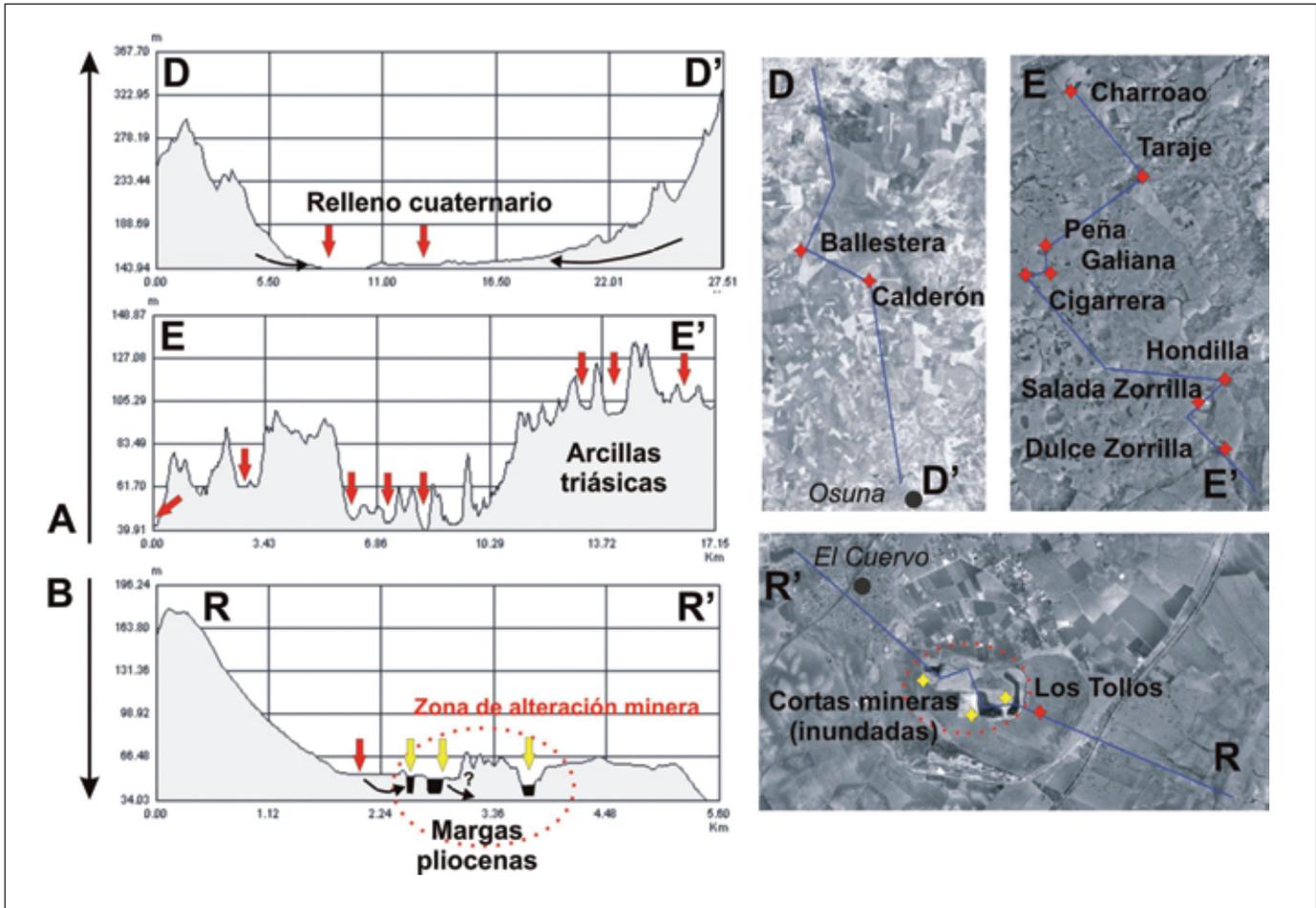


Figura 9. Ejemplos de humedales que se ajustan a cada uno de los tres modelos de funcionamiento hidrológico propuestos: lagunas D (corte D-D'), lagunas E (corte E-E') y lagunas R (corte R-R')

Figure 9. Examples of ponds and pools related to the three models proposed: systems D (cross section D-D'), systems E (cross section E-E') and systems R (cross section R-R')

agua subterránea que les llegan desde estas cuencas son variables. En este sentido, la fracción de escorrentía subterránea oscila entre un 40% de la lluvia útil en las cuencas con materiales más permeables (caso de la cuenca de la laguna de Zóñar) y un 10% de la lluvia útil, en las cuencas constituidas por materiales arcillosos (lagunas de Lebrija y Espera). En cualquier caso, es importante recalcar dos aspectos fundamentales: el ámbito espacial a partir del que llega este recurso: que es la propia cuenca vertiente y, por otro lado, la zona donde se encuentran las principales reservas subterráneas: el acuífero de fondo de cubeta, que permite el mantenimiento de la vegetación freatófítica durante el estiaje.

En otros sistemas, la cuenca vertiente superficial no coincide con la subterránea. Es en estos sistemas donde debe establecerse con detalle la cuenca subte-

rránea mediante estudios hidrogeológicos, para prevenir afecciones si se realizan captaciones de aguas subterráneas en los alrededores del sistema. En este sentido, el proyecto realizado en la zona de La Lantejuela (Moral *et al.*, 2008c) podría servir como ejemplo para aplicar a otros humedales posiblemente afectados, como la laguna del Gosque.

Conclusiones

La mayoría de los humedales continentales de la depresión del Guadalquivir se relacionan con los materiales del complejo olistostrómico y los del frente subbético, ambos caracterizados por su baja permeabilidad. Estos humedales se suelen encontrar formando parte de complejos endorreicos constituidos

por entre 2 y 7 lagunas. Las cuencas vertientes a estos sistemas tienen un tamaño que oscila entre $1 \cdot 10^5$ m² y más de $1 \cdot 10^7$ m². El área media de inundación (AMI) de cada humedal depende de dos factores: el tamaño de la cuenca vertiente (CVS) y los recursos hídricos de la zona.

En este sentido, se ha desarrollado un Índice de Funcionamiento Hidrológico (IFH) que relaciona las AMIs con las CVSs y la lluvia útil a partir de balances de agua en el suelo para condiciones climáticas medias. Con este índice se ha podido establecer si las lagunas reciben agua sólo por escorrentía generada en su CVS ($IFH \geq 1$) o si, por el contrario, también reciben descargas a través de cuencas hidrogeológicas sensiblemente mayores ($IFH < 1$). Asimismo, si las salidas del agua recibida se producen exclusivamente por evapotranspiración desde la cubeta ($IFH [0.3-2]$) o si también se producen salidas a través de bombeos, recarga natural o drenajes ($IFH \geq 2$). Es necesario añadir que, por tanto, en las lagunas alteradas por bombeos, drenajes o rebosaderos, este índice no es un buen indicador de la similitud/desviación respecto a un modelo conceptual de funcionamiento en régimen natural. Por desgracia, un alto porcentaje de lagunas de campiña se encuentran actualmente alteradas por la acción antrópica.

Aún así, y teniendo en cuenta lo anterior, las observaciones de tipo hidrogeológico y los resultados del análisis de variables morfoclimáticas e hidroquímicas que se han llevado a cabo han permitido constatar que, en el caso general, el comportamiento hidrológico de estos ecosistemas se ajusta a un modelo en el que la unidad hidrológica viene definida por la cuenca vertiente superficial y que esta cuenca superficial es altamente coincidente con la cuenca hidrogeológica. De esta manera, los materiales que afloran en las cuencas tendrían un comportamiento de acuitardo y los materiales detríticos y, por tanto, porosos, acumulados en el centro de las mismas por la escorrentía generada, almacenarían esa agua, funcionando como un pequeño acuífero de fondo de cubeta. En otros sistemas se han detectado variaciones respecto a este modelo de funcionamiento general, en algunos casos debido a que existen entradas de agua (subterránea o superficial) que proviene de fuera de la cuenca vertiente y en otros porque hay salidas de agua diferentes a la evapotranspiración (bombeos, rebosaderos o drenajes). En cualquier caso, todas las lagunas estudiadas se relacionan con las aguas subterráneas, ya que el acuífero de fondo de cubeta se ha detectado en cada uno de los humedales estudiados. En ese sentido, las lagunas continentales estudiadas se consideran ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas en ambientes semiáridos y, como tales, se les

debe aplicar la legislación vigente, tanto a nivel nacional como europeo.

Por último, el análisis cluster por individuos de las variables morfoclimáticas anteriormente mencionadas y la salinidad mediana del agua ha permitido reconocer agrupaciones de lagunas similares y discriminar sistemas cuyo funcionamiento se aleja del modelo propuesto anteriormente. Se han podido establecer tres grandes grupos de humedales: en el primer caso (E) las lagunas se ajustan al modelo conceptual propuesto. Poseen cuencas superficial e hidrogeológica altamente coincidentes, entradas a partir únicamente de escorrentía generada en la cuenca vertiente y salidas por evaporación desde la cubeta. En segundo lugar, humedales que reciben aportes hídricos externos a su cuenca (D). Algunas de estas lagunas son dependientes, en parte, de flujos subterráneos externos a su cuenca vertiente superficial y, por tanto, en estas zonas debe controlarse la extracción de aguas subterráneas ya que los descensos generalizados de niveles pueden afectar al funcionamiento del ecosistema. Finalmente (R), humedales que tampoco se ajustan al modelo conceptual, debido a que están gravemente alteradas o a que parte de sus recursos hídricos se pierden del sistema en forma líquida y no exclusivamente por evapotranspiración desde la cubeta.

En general, se ha constatado que la mayoría de los humedales estudiados son muy sensibles a cualquier modificación de las cubetas o las cuencas como pequeños drenajes o rebosaderos y a la colmatación de las cubetas.

Agradecimientos

Este trabajo ha estado parcialmente financiado por los convenios suscritos entre las Universidades de Granada y Pablo de Olavide (Sevilla) y la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir titulados "Caracterización hidrológica de los humedales de las provincias de Sevilla Cádiz" y "Caracterización hidrogeológica de humedales de la cuenca del Guadalquivir". Las revisiones del manuscrito original, realizadas por J.M. Calaforra, han mejorado la calidad del trabajo presentado.

Referencias

- Benavente, J., Moral, F. y Rodríguez-Rodríguez, M. 2005a. *Definición del contexto hidrogeológico de humedales andaluces*. Lagunas de Cádiz. 182 pp. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, Sevilla.

- Benavente, J., Moral, F. y Rodríguez-Rodríguez, M. 2005b. *Definición del contexto hidrogeológico de humedales andaluces*. Lagunas de Sevilla. 175 pp. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, Sevilla.
- Briere, P. R. 2000. Playa, playa lake, sabkha: Proposed definitions for old terms. *Journal of Arid Environments*. 35,1-7.
- Calaforra, J. M., 2004. Un modelo conceptual para el karst del triás de Antequera, *Taller sobre la hidrogeología de los sedimentos triásicos y su control sobre los sistemas lagunares del norte de la provincia de Málaga*. IGME.
- Calaforra, J. M. y Pulido-Bosch, A., 1999. Gypsum karst features as evidence of diapiric processes in the Betic Cordillera, Southern Spain. *Geomorphology*, 29; 251 - 264.
- Castañeda, C. y García-Vera, M. A. 2008. Water balance in the playa-lakes of an arid environment, Monegros, NE Spain. *Hydrogeology Journal*. 16,87-102.
- Castañeda, C., Herrero, J. y Casterad, M. A. 2005. Facies identification within the playa-lakes of the Monegros desert, Spain, from field and satellite data. *Catena*. 63,39-63.
- CHG-IGME. 2001. *Norma de Explotación de la Unidad Hidrogeológica 05.69 (Osuna - La Lantejuela)*. 21 pp. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- C.M.A. (2005). *Modelo Digital del Terreno de Andalucía*. Relieve y Topografía. Junta de Andalucía. Consejería de Medio Ambiente, Sevilla.
- Montes, C., Gonzalez-Capitel, E., Molina, F., Moreira, J. M., Rubio, J. C., Rodriguez, M., Gonzalez, C. y Rodriguez, I. 2004. *Plan Andaluz de Humedales*. Junta de Andalucía, Consejería de Medio Ambiente, Sevilla.
- Moral, F., Rodríguez-Rodríguez, M. y Beltrán, M. 2008a. *Estudio hidrogeológico de la laguna de Los Tollos y otros humedales de la provincia de Cádiz*. I Laguna de Los Tollos. 128 pp. EGMASA, Sevilla.
- Moral, F., Rodríguez-Rodríguez, M., Beltrán, M. y Cifuentes, V. 2008b. *Calibración de un modelo de balance hídrico aplicado a las lagunas de la campiña andaluza*. p 749-759. *Hidrogeología y aguas Subterráneas* (25). IGME, Madrid.
- Moral, F., Rodríguez-Rodríguez, M., Benavente, J. y Beltrán, M. 2008c. *Relaciones hidrogeológicas entre el acuífero de los Llanos de Osuna - La Lantejuela y el Complejo endorreico de La Lantejuela*. 72 pp. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, Sevilla.
- Moral, F., Rodríguez-Rodríguez, M., Benavente, J., Beltrán, M. y Ortega, F. 2008d. *Caracterización hidrogeológica de las lagunas de la campiña andaluza central*. 334 pp. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, Sevilla.
- Moreira, J. M. y Montes, C. 2005. *Caracterización ambiental de humedales en Andalucía*. Junta de Andalucía, Sevilla.
- Rodríguez-Rodríguez, M. 2007. Hydrogeology of ponds, pools and playa-lakes from southern Spain. *Wetlands*. 27,819-830.
- Rodríguez-Rodríguez, M. y Benavente, J. 2008. Definition of a wetland typology for hydro-morphological elements within the WFD. A case study from southern Spain. *Water Resources Management*. 22,797-821.
- Rodríguez-Rodríguez, M., Benavente, J., Cruz-San Julián, J. y Moral, F. 2006. Estimation of groundwater exchange with semi-arid playa lakes (Antequera region, southern Spain). *Journal of Arid Environments*. 66,272 - 289.
- Rodríguez-Rodríguez, M., Moral, F. y Benavente, J. 2007a. Anthropogenic alterations and hydrological functioning of a semi-arid playa-lake complex and related detritic aquifer (Seville province, Spain). Pages 97-98. XXXV *International Association of Hydrogeologists Congress*. Groundwater and Ecosystems., Lisboa, Septiembre 2007.
- Rodríguez-Rodríguez, M., Moral, F. y Benavente, J. 2008. Hydrogeological characteristics of a groundwater dependant ecosystem (La Lantejuela, Seville, Spain). *Water and Environment Journal*. 22,137-147.
- Rosen, M. R. 1994. The importance of groundwater in playas: A review of playa classifications and the sedimentology and hydrology of playas. *Geological Society of America Special Paper*, 289,1 - 18.
- Vera, J. A. 2004. *Geología de España*. Sociedad Geológica de España-Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- WFD-CIS n°.12 2003. *The role of wetlands in the Water Framework Directive*. Directorate General Environment of the European Commission, Brussels.

Recibido: julio 2008

Revisado: abril 2009

Aceptado: julio 2009

Publicado: octubre 2009