

ANÁLISIS HIDROGEOGRÁFICO DE LAS LAGUNAS VOLCÁNICAS DE LA PENÍNSULA IBÉRICA

RAFAEL UBALDO GOSÁLVEZ REY, ELENA GONZÁLEZ CÁRDENAS,
ESTELA ESCOBAR LAHOZ, RAFAEL BECERRA RAMÍREZ.
Grupo de Investigación GEOVOL. Departamento de Geografía y Ordenación
del Territorio. Facultad de Letras (UCLM).
Contacto: RafaelU.Gosalvez@uclm.es

1. INTRODUCCIÓN

La morfometría analiza las formas y dimensiones del terreno a partir de la aplicación de procedimientos matemáticos que sirven para su estudio y catalogación (PEDRAZA GILSANZ, 1996). A finales del siglo XIX Forel y Delebecque aplicaron por primera vez la morfometría a lagos y estudiaron las relaciones entre ésta y su génesis geomorfológica (CASTILLO JURADO, 2004).

En la región volcánica del Campo de Calatrava se han inventariado decenas de lagunas cuya génesis resulta controvertida en la actualidad (GOSÁLVEZ, 2003). El estudio de la morfología y morfometría de las cuencas de drenaje y de las cubetas de las lagunas presentes en esta región volcánica puede, además de explicar la variabilidad de sus características ambientales, aportar interesantes datos sobre su origen.

El objetivo de esta comunicación es presentar un avance de los trabajos que se están desarrollando en las lagunas calatravas a partir de esta línea de investigación en geomorfología.

2. ÁREA DE ESTUDIO

En la Península Ibérica se han identificado cuatro áreas principales de volcanismo reciente (Cenozoico): la del NE o de Girona, la Central o del Campo de Calatrava, la del SE o de Almería-Murcia y la del Levante o del Golfo de Valencia (ANCOCHEA, 2004:671; figura 1), integradas a su vez en la llamada “provincia volcánica cenozoica europea” (FOULGER y MEYER, 2007).

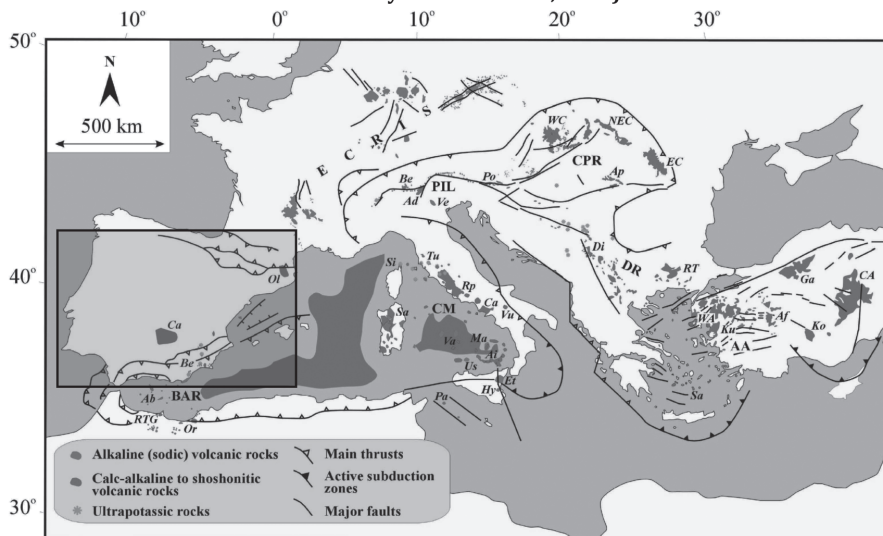
Una vez identificadas las regiones volcánicas cenozoicas peninsulares, el siguiente paso es determinar las lagunas existentes en cada una de ellas. Lo primero que

llama la atención es el elevado número de lagunas presentes en la región volcánica del Campo de Calatrava frente al resto de espacios volcánicos ibéricos, lo que está relacionado con la intensa actividad hidromagmática desarrollada en esta región volcánica (GOSÁLVEZ, 2003).

A continuación se describe para cada región volcánica las lagunas identificadas:

- *Lagunas en la Región volcánica del NE o de Girona*: Las principales masas de agua identificadas en esta área volcánica se corresponden con el Estany de Banyoles y los estanyoles vinculados a éste (del Vilar, d'en Montalt, de la Cendra) (figura 2a), atribuyéndosele una génesis kárstica (CASADO Y MONTES, 1995:81). Sin embargo, el análisis de depósitos interpretados como de origen lacustre en el área volcánica de Girona nos indican un pasado de humedales relacionados con la actividad eruptiva de este territorio, la mayoría de ellos vinculados a antiguas lagunas generadas por la interferencia y el represamiento de arroyos o ríos por conos de piroclastos o por coladas de lava. Dentro del primer caso, tenemos que destacar los depósitos lacustres de interferencia producidos por los volcanes Estany y Bellare, Santa Margarida, Puig de la Medes o Puig de Adri (PUJADAS *et. al.*, 1997). En el caso de interferencia por coladas de lava, al menos una antigua zona de encharcamiento se ha reconocido por el represamiento del río Fluvià en el área de vall d'en Bas, por una colada emitida por el volcán del Croscat (MARTÍ *et al.*, 2001). Finalmente, cabe mencionar la existencia de un número reducido de maeres que aunque han podido albergar agua en el pasado actualmente no lo hacen. En este sentido, podemos mencionar los maeres de la Crosa de Sant Dalmai o Clot de l'Olmera, entre otros.
- *Lagunas en la región volcánica del Levante o Golfo de Valencia*: No se ha detectado ninguna masa de agua natural en el entorno de los dos únicos afloramientos (Picassent y Cofrentes) existentes en la parte continental de esta zona volcánica (Figura 2c), ni depósitos o morfología que indiquen áreas encharcadas en el pasado.

Figura 1. Localización de las áreas de volcanismo cenozoico de la Península Ibérica y su relación con la Provincia Volcánica Cenozoica Europea. (Tomado de ANCOCHEA, 2004:671 y HARANGI *et al.*, 2006).



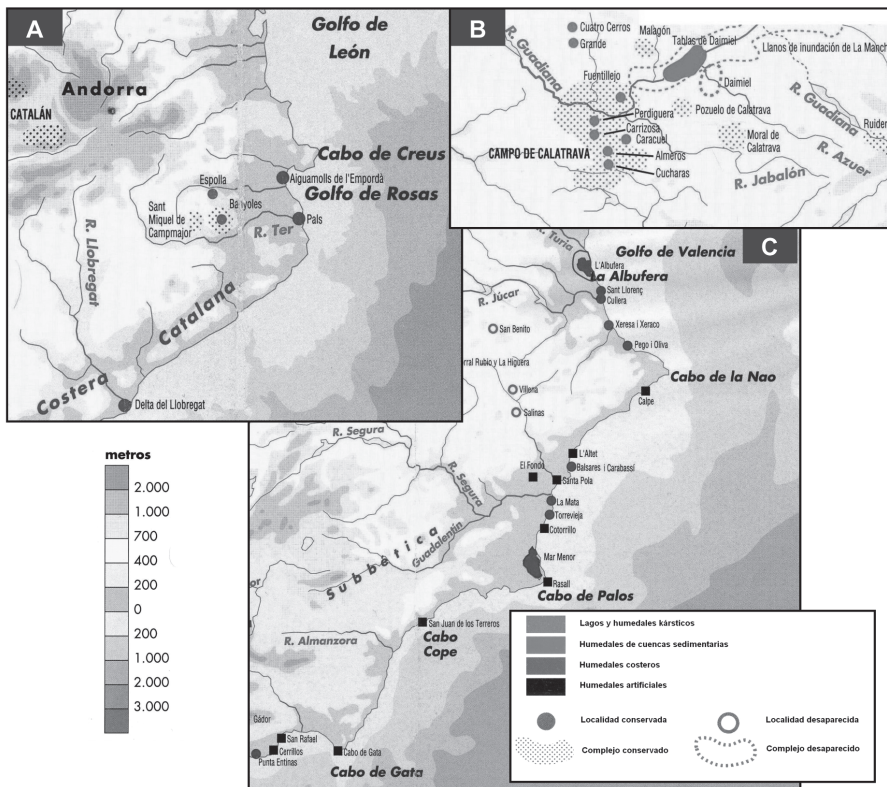
Las áreas en azul oscuro indican la corteza oceánica.
ECRIS= European Cenozoic Rift System,
BAR=Betic-Alboran-Rif province (Ab=Alboran, Be=Betic, RTG=Gourougou-Trois Furches-Ras Taf (Rif), Or=Oranie, Ca=Calatrava, Ol=Olot),
CM=Central Mediterranean (Sa=Sardinia, Si=Sisco, Tu=Tuscany, Rp=Roman province, Ca=Campania, Vu=Vulture, Va=Vavilov, Ma=Marsili, Us=Ustica, Ai=Aeolian Islands, Et=Etna, Hy=Hyblei, Pa=Pantelleria),
PIL=Periadriatic-Insucric Line (Be=Bergell, Ad=Adamello, Po=Pohorje, Ve=Veneto),
CPR=Carpathian-Pannonian region (WC=Western Carpathians, NEC=Northeastern Carpathians, EC=Eastern Carpathians, Ap=Apuseni),
DR=Dinarides and Rhodope (Di=Dinarides, RT=Rhodope-Thrace),
AA=Aegean-Anatolia (Sa=Santorini, WA=Western Anatolia, Ku=Kula, Af=Afyon, Ko=Konya, Ga=Galatia, CA=Central Anatolia)



- *Lagunas en la región volcánica SE o de Almería-Murcia:* Los cuerpos de agua que aparecen en esta región volcánica están relacionados mayoritariamente con balsas destinadas a la agricultura. El inventario regional de humedales de la región de Murcia (BALLESTER, 2003) ha reconocido la existencia de 98 humedales en este territorio, correspondiendo la mayoría a criptohumedales y charcas y pozas. En cualquier caso, ninguno de ellos está relacionado con la actividad volcánica (Figura 2c). En el caso de la comunidad autónoma de Andalucía, el Plan Andaluz de Humedales (CMA, 2002) indica que no se han encontrado en todo el territorio andaluz lagunas de génesis volcánica (CMA, 2002:101).

- *Lagunas en la región volcánica Central o del Campo de Calatrava*: En esta región aparece un complejo palustre compuesto por más de veinticinco lagunas vinculadas directamente a la actividad volcánica (Figura 2b y tabla 1), alojadas todas ellas en el fondo de cráteres de explosión hidromagmática (maeres). Es en esta zona sobre la que se han centrado nuestros esfuerzos de investigación, al constituir las únicas lagunas de la Península Ibérica cuya génesis es atribuible directamente a la actividad volcánica y cuya funcionalidad sigue activa, aunque otras muchas han desaparecido por la actividad humana.

Figura 2. Localización de las lagunas inventariadas en las regiones volcánicas recientes de la Península Ibérica. A) NE o de Girona. B) Central o del Campo de Calatrava. C) Golfo de Valencia y Almería-Murcia. Tomado de CASADO y MONTES, 1995.



3. MÉTODOS

En la presente comunicación se caracteriza la morfometría de las cubetas, cuencas y redes de drenaje de las lagunas volcánicas del Campo de Calatrava. Para ello se ha llevado a cabo un trabajo de fotointerpretación del vuelo interministerial de 1978 (escala 1:18.000), de ortofotografías aérea del año 2006 procedente del PNOA (escala 1:2.000) y se ha consultado el mapa MTN-25 del IGN.

La información cuantitativa generada ha sido implementada en un sistema de información geográfica, lo que ha facilitado las tareas de medición y cálculo de las variables morfométricas. En este sentido, para cada laguna se han medido las siguientes variables: para la *cubeta lagunar*, superficie, perímetro, longitud y anchura máxima del vaso, profundidad máxima y desarrollo de la línea de costa; para la *cuenca de drenaje*, área, perímetro, desnivel absoluto, factor de circularidad, razón relativa de relieve y, finalmente, para la *red de drenaje*, diversas variables relacionadas con la geometría (orden y número del cauce y cociente de bifurcación), longitud (total de cauces, media de cauces, del curso principal y cociente de longitud), relieve (área de la cuenca de drenaje) e intensidad fluvial (densidad de drenaje)

4. PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS Y MORFOLOGÍA DE LA CUBETA LAGUNAR.

En la tabla 1 se muestra un resumen estadístico de las medidas de los parámetros morfométricos calculados para cada una de las cubetas de las lagunas incluidas en este estudio.

Tabla 1. Resumen de estadístico de las variables morfométricas de la cubeta lagunar de las lagunas del Campo de Calatrava. *Elaboración propia.*

Estadísticos	A (km ²)	P (m)	L (km)	W (km)	DLC	Zm (m)
Media	0,329	2,094	0,773	0,495	1,135	0,674
Nivel de confianza (95,0%)	0,127	0,465	0,200	0,096	0,049	0,164
Error típico	0,062	0,226	0,097	0,047	0,024	0,080
Mediana	0,203	1,803	0,677	0,424	1,103	0,50
Desviación estándar	0,322	1,174	0,505	0,243	0,124	0,414
Varianza	0,104	1,379	0,255	0,059	0,015	0,171
Curtosis	1,750	1,683	5,264	0,704	5,480	3,498
Coficiente de asimetría	1,511	1,135	1,872	0,836	2,291	1,880
Rango	1,211	5,084	2,405	1,023	0,518	1,700
Valor mínimo	0,018	0,492	0,175	0,143	1,010	0,300
Valor máximo	1,229	5,576	2,580	1,166	1,528	2,000
Total	8,874	56,526	20,861	13,367	30,653	18,200
Nº de lagunas	27	27	27	27	27	27

A=Superficie; P=Perímetro; L=Longitud máxima; W=Anchura máxima; DLC=Desarrollo de la línea de costa; Zm=Profundidad máxima.

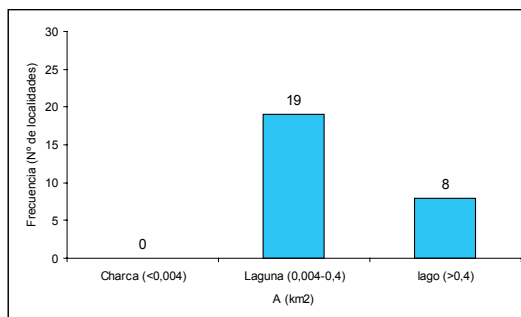
4.1. Análisis de los valores del área (A).

El área es la variable más utilizada en geografía y limnología para referirse al tamaño de un lago (Castillo Jurado, 2004:109), sirviendo para estimar diversos factores ambientales. Respecto a este parámetro, en las lagunas calatravas lo primero que llama la atención es su alta variabilidad, lo que se atribuye a la elevada temporalidad funcional de este tipo de lagunas, predominando los años que permanecen completamente secas. Las cifras que damos aquí se corresponden con el área de máxima inundación registrada en el año 1997, incluyendo el cinturón perimetral de vegetación higrófila.

Las lagunas del Campo de Calatrava se caracterizan por un tamaño de área intermedio, presentando un promedio de $0,329 \pm 0,322 \text{ km}^2$ y mediana de $0,203 \text{ km}^2$. La distribución presenta un claro sesgo positivo, debido a que la mayor parte de los valores se encuentran por debajo del valor promedio. El valor máximo medido para este parámetro morfométrico es de $1,229 \text{ km}^2$ (Nava Grande de Malagón), mientras que el valor mínimo es de $0,018 \text{ km}^2$ (Navazo de Abenójar), por lo que el rango total es de $1,211 \text{ km}^2$. El conjunto de las 27 lagunas estudiadas suma una superficie total de $8,874 \text{ km}^2$, pero hay que destacar que las ocho lagunas mayores (con $A > 0,4 \text{ km}^2$) suman una superficie de $5,981 \text{ km}^2$, lo que representa casi el 70% de las localidades estudiadas.

Si se compara con otras áreas volcánicas del planeta con lagos de génesis volcánica (por ejemplo: Camerún, Auvernia en Francia y Cuenca Oriental en México), se comprueba que los valores promedios de este parámetro morfométrico para las lagunas del Campo de Calatrava (media= $0,329 \text{ km}^2$, $n=27$) se asemejan a la de los lagos volcánicos hidromagmáticos de Auvernia (media= $0,287 \text{ km}^2$, $n=5$; PNRVA, 2003) y se encuentran por debajo de los valores promedios de los lagos volcánicos de Camerún (media= $0,875 \text{ km}^2$, $n=39$; KLING, 1988) y de Cuenca Oriental (media= $0,680 \text{ km}^2$, $n=6$; ARREDONDO *et al.*, 1983). Atendiendo a la escala relativa de tamaños según la clasificación de hábitats de ELTON y MILLER (1954), la gran mayoría de los enclaves húmedos calatravos pueden considerarse como lagunas (figura 3).

Figura 3. Clasificación de las lagunas del Campo de Calatrava en función de su extensión superficial (A) atendiendo a los criterios de ELTON y MILLER (1957). Elaboración propia.



4.2. Análisis de los valores de la longitud y anchura (L y W).

La longitud máxima se define como la línea que conecta los dos puntos más alejados de la costa de un lago, siendo la anchura máxima la línea perpendicular a la longitud. En el Campo de Calatrava la longitud máxima varía entre 0,175 km (Navazo de Abenójar) y 2,58 km (Cucharas, en Villamayor de Calatrava), presentando un valor promedio de $0,773 \pm 0,505$ km y una mediana de 0,677 km. El 26% de las lagunas tiene menos de 0,5 km de longitud, el 48% tiene una longitud comprendida entre 0,5 y 1 km de longitud y otro 26% presenta una longitud máxima superior a 1 km.

En cuanto a la anchura máxima, este parámetro morfométrico varía entre 0,143 km (Navazo de Abenójar) y 1,166 km (Nava Grande de Malagón), presentando un valor promedio de $0,495 \pm 0,243$ km y una mediana de 0,424 km. El 41% de las lagunas tiene menos de 0,4 km de anchura máxima, el 37% tiene una anchura comprendida entre 0,4 y 0,7 km de longitud y el 22% presenta una anchura máxima que supera los 0,7 km.

4.3. Análisis de los valores del perímetro (P).

El perímetro se define como la intersección de la tierra con la superficie del lago siendo en el caso de las lagunas calatravas un parámetro muy fluctuante debido a la ya mencionada temporalidad de las láminas de agua.

En el Campo de Calatrava el valor promedio de este parámetro morfométrico es de $2,094 \pm 1,174$ km y la mediana es de 1,803 km, siendo el valor máximo de 5,576 km (Las Cucharas) y el mínimo de 0,492 km (Navazo de Abenójar). Hay diecisiete lagunas con menos de dos kilómetros de costa y diez lagunas por encima de ese valor. El conjunto de las 27 lagunas estudiadas suma un perímetro total de 56,526 km

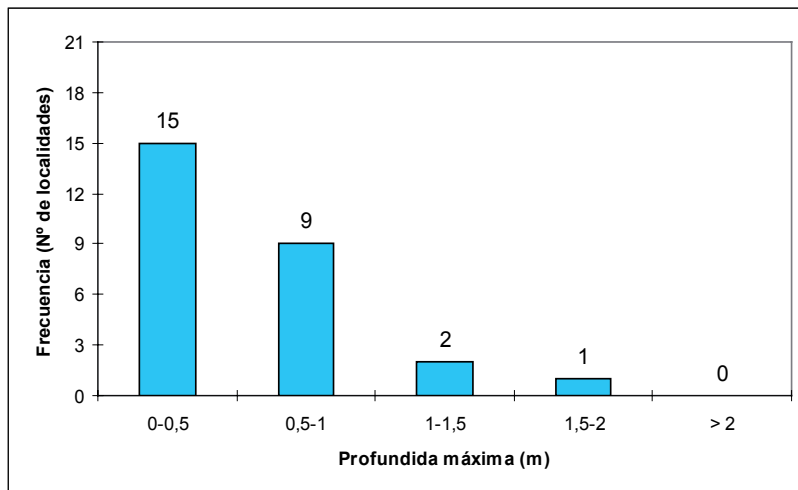
4.4. Análisis de los valores de la profundidad (Zm).

La profundidad es una variable morfométrica clave para entender la capacidad productiva de las lagunas y de amortiguación de las consecuencias de la evaporación, al tiempo que favorece la estabilidad en las condiciones de vida de estos geosistemas

Las lagunas calatravas presentan una profundidad máxima (Zm) relativamente baja, con un promedio de $0,674 \pm 0,414$ m y mediana de 0,5 m. Profundidades máximas se dan en las lagunas de Calderón, Nava Grande y Caracuel, con 1,5-2 m; registrándose el valor mínimo en la laguna de Cervera, con 0,3 m. Quince lagunas presentan columnas de agua por debajo de 0,6 m, siete lagunas sitúan su lámina de agua entre 0,6 y 1 m y tan solo cinco lagunas llegan a superar el metro de profundidad máxima, pero debemos advertir que estas cifras se producen en hidroperiodos extraordinariamente húmedos que han resultado ser los menos frecuentes en el periodo temporal de observación de este trabajo (el decenio 1997-2007).

Aplicando el criterio de profundidad de la columna de agua para diferenciar entre sistemas acuáticos palustres y lacustres de la iniciativa europea (COSTA *et al.*, 1996), la totalidad de las lagunas calatravas deben considerarse como geosistemas palustres al encontrarse el valor de la profundidad máxima por debajo de 2 m (figura 4)

Figura 4. Clasificación de las lagunas del Campo de Calatrava en función de la profundidad máxima de la lámina de agua (Zm). Elaboración propia.



4.5. Análisis del Índice de desarrollo de la línea de costa (DLC).

El “desarrollo de la línea de costa” (DLC) es un parámetro morfométrico que mide la regularidad del contorno de un lago en relación con la semejanza a un círculo. Este índice pone en relación el perímetro del lago, es decir, la línea de costa, con el perímetro de un círculo de igual área que el lago. Su valor mínimo es 1, correspondiendo a un círculo perfecto, y su valor máximo no tiene en principio una cota máxima, aunque el lago conocido que presenta un valor más elevado para este parámetro se corresponde con el lago Inari en Finlandia (CASTILLO JURADO, 2004:59).

Las lagunas del Campo de Calatrava presentan en su mayor parte valores bajos de este índice, con un promedio de $1,135 \pm 0,12$, y mediana de 1,103, cifras que se aproximan a una interpretación de su génesis vinculada a la actividad volcánica del Campo de Calatrava. En este sentido, HUTCHINSON (1975) al referirse a otros lagos cráter del mundo indica que éste índice varía entre 1,02 y 1,88. Así, para los lagos maars de Eifel (Alemania) oscila entre 1,04 y 1,15, en los de Auvernia (Francia) entre 1,02 y 1,04 y, finalmente, en los lagos maars de Cuenca Oriental (México) varían entre 1,06 y 1,88 (Arredondo *et al.*, 1983:44).

En el Campo de Calatrava los valores extremos elevados se dan en las lagunas de Calderón y Cucharas, ligeramente por encima de 1,5; mientras que los valores más bajos se han medido en las lagunas de Barondillo, Michos, Navazo de Abenójar, La Perdiguera, Saladilla y La Laguna de Moral de Calatrava, en todas ellas cifras iguales o inferiores a 1,06 para este índice. Valores entre 1 y 1,5 se corresponden con lagos de forma circular o subcircular, que HUTCHINSON (1957) o TIMMS (1993) atribuyen

a una morfogénesis volcánica, kárstica, eólica o glaciaria. Para el Campo de Calatrava solo es posible la existencia de los dos primeros, volcánicos o kársticos.

5. PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS Y MORFOLOGÍA DE LAS CUENCAS DE DRENAJE

5.1. Análisis de la geometría de la cuenca: Área, perímetro y cociente de circularidad:

La compartimentación del relieve en las lagunas calatravas se traduce en divisoria de aguas relativamente bien marcadas, más claras en las unidades geomorfológicas de sierra y de piedemonte y algo más desdibujadas en las cuencas sedimentarias. En la tabla 2 se muestra un resumen estadístico de las medidas de los parámetros morfométricos calculados para cada una de las cubetas de las lagunas incluidas en este estudio.

Tabla 2. Resumen de estadístico de las variables morfométricas de las cuencas de drenaje de las lagunas del Campo de Calatrava. *Elaboración propia.*

Estadísticos	Geometría			Relieve	Intensidad fluvial
	A (km ²)	P (km)	R _C	Da (m)	RR
Media	4,21	7,74	0,71	130,00	20,00
Nivel de confianza (95,0%)	2,89	2,85	0,07	43,21	5,92
Error típico	1,39	1,37	0,04	20,72	2,84
Mediana	1,72	6,18	0,75	124,00	18,78
Desviación estándar	6,36	6,26	0,16	94,93	13,00
Varianza de la muestra	40,39	39,22	0,03	9011,70	169,08
Curtosis	5,86	4,18	-0,05	3,39	-1,05
Coefficiente de asimetría	2,53	1,98	-0,65	1,46	0,38
Rango total	23,75	25,56	0,62	412,00	41,95
Valor mínimo	0,23	1,72	0,36	7,00	2,34
Valor máximo	23,98	27,28	0,98	419,00	44,29
Suma	88,35	162,58	14,90	2730,00	420,08
Nº de lagunas	21	21	21	21	21

A= Área de la cuenca; P= Perímetro de la cuenca; Da=Desnivel absoluto (diferencia entre la cota altitudinal máxima y mínima de la cuenca); R_C= Razón de circularidad; RR= Razón relativa de relieve.

Salvo las cuencas de drenaje de los complejos lagunares de Moral de Calatrava y de las Navas de Malagón, que tienen una superficie vertiente de 27,28 km² y de 20,21 km² respectivamente, el resto de cuencas presentan un tamaño reducido, inferior a 20 km². La superficie total para las cuencas analizadas se ha estimado en 88,35 km², siendo el valor promedio de 4,21±6,34 km² y la mediana de 1,72 km², con un rango total de 23,75 km². Precisamente, este tamaño tan pequeño para la mayoría de las cuencas lagunares puede servir de explicación a la baja densidad de drenaje de las mismas.

El perímetro, por otra parte, está estrechamente relacionado con la extensión superficial de la cuenca de drenaje puesto que aumenta o disminuye en relación directa con ella. El valor de este parámetro morfométrico para el total de las lagunas calatravas es de 162,58 km, presentando un promedio de 7,74±6,26 km y elevándose el valor de la mediana a 6,18 km. La cifra más elevada se corresponde con la cuenca de drenaje del complejo palustre de Moral de Calatrava (27,18 km) y la más baja con la laguna de La Dehesa con 1,72 km de longitud.

En relación con la forma de la cuenca, se ha calculado el cociente de circularidad (R_c) de MILLER (1953), que pone en relación el área de la cuenca y el área de un círculo con igual perímetro. Este factor presenta valores extremos de 0,36 y 0,98 para las lagunas calatravas, aunque en la mayoría de los casos se sitúa en torno a 0,7, lo que indica cuencas en las que predominan las formas subcirculares o subelípticas. Las cuencas que presentan los valores más altos (por encima de 0,8) corresponden a las lagunas de La Posadilla, La Dehesa, Los Navazos de Abenója, Michos y la Laguna de la Hoya de Cervera; mientras que los valores más bajos (por debajo de 0,5) aparecen en las lagunas de Almodóvar, Los Garbanzos y el complejo de Moral de Calatrava. Valores medios (0,5-0,8) se dan en el resto de las lagunas de Calatrava (Cañada, Caracuel, Los Lomillos, La Laguna de Piedrabuena, etc.).

Desde el punto de vista hidrológico, la circularidad de las cuencas representa una concentración brusca y unos “picos” de crecida importantes y, por tanto, en teoría, mayor posibilidad erosiva que en una cuenca elongada (SENCIALES, 1999). Por otra parte, las cuencas más circulares suelen presentar menores relaciones de bifurcación, lo que genera un mayor retardo y altas concentraciones de la escorrentía en pocos cauces, tal y como se comprobará en el análisis de la red de drenaje de las lagunas calatravas, muy desdibujada, careciendo en la mayoría de los casos de cauces de drenaje claros.

En este sentido, hay que tener en cuenta la influencia que ejerce la litología y la cobertura vegetal sobre el comportamiento hidrológico de la cuenca, de manera que áreas de litología permeables (cuencas sedimentarias, por ejemplo) evacúan por escorrentía menor cantidad de agua que áreas de litología impermeables (serratas paleozoicas), requiriendo un número menor de canales de drenaje para eliminar el exceso hídrico. Además, áreas de elevada cobertura vegetal, generalmente vinculadas a las laderas serranas, retienen más agua que zonas desprotegidas de esa cobertura, casi siempre por acción del hombre y coincidiendo con áreas deprimidas, presentando redes de drenaje menos jerarquizadas.

5.2. Análisis del relieve: Desnivel absoluto (Da).

El desnivel absoluto nos indica la diferencia máxima de cotas altitudinales para una cuenca de drenaje expresada en metros sobre el nivel del mar, siendo un indicador indirecto de la pérdida anual de sedimentos, pues valores elevados en este parámetro para una cuenca van a aumentar la energía potencial y cinética de la red de drenaje.

En las lagunas del Campo de Calatrava este parámetro presenta un valor promedio de 130 ± 124 m, por lo que presenta una alta variabilidad, tal y como lo viene a ratificar el rango total que es de 412 m (valor mínimo de 7 m en Navazo de Abenójar y el máximo de 419 m en las Navas de Malagón). Seis lagunas presentan un desnivel absoluto inferior a 100 m, doce lagunas presentan desniveles comprendidos entre 100 y 200 m y, finalmente, seis lagunas se hallan por encima de los 200 m.

5.3. Análisis de la intensidad fluvial: Razón relativa de relieve (RR).

Los índices morfométricos relacionados con la pendiente de la cuenca presentan la ventaja de su utilidad para el análisis del comportamiento hidrológico, toda vez que la pendiente es un factor modificador de la velocidad de escorrentía y, por lo tanto, de la energía cinética de ésta al desplazarse en su recorrido. El parámetro morfométrico que se ha aplicado a las Lagunas del Campo de Calatrava es la “Razón relativa de relieve” (RR) según el procedimiento de MELTON (1957), lo que a su vez proporciona la pendiente media de la cuenca. Este índice sirve, además, para estimar de una forma aproximada la pérdida anual de sedimento (SALA y GAY, 1981) y, en consecuencia, permite evaluar los procesos de colmatación de las cubetas en las lagunas calatravas. Valores elevados de este parámetro evidencian mayores desniveles y, con ello, un potencial erosivo mayor en función de las pendientes que han de salvar estos desniveles, con el consiguiente riesgo de aumento de los procesos de colmatación.

El rango de valores hallados para este parámetro en las lagunas calatravas oscila entre 2,34 y 44,29, con un promedio de 20 ± 13 , lo que indicaría valores medios en relación con la pérdida anual de sedimentos. Los valores más elevados de este parámetro (por encima de 35) se localizan en las cuencas hidrológicas de las Navas de Malagón y de las lagunas de Almodóvar, Doña Elvira, Perabad, Michos y la Posadilla, es decir, en enclaves situados en el interior de las sierras paleozoicas y en las situadas en los piedemonte. En este sentido, hay que señalar que SANTOS CIRUJANO, ya en el año 1986, llamaba la atención acerca de los riesgos de desaparición que se cernía sobre la Nava de Enmedio como consecuencia de los procesos naturales de colmatación.

Los valores más bajos de la “Razón relativa de relieve” (por debajo de 6) se han calculado en las lagunas de La Inesperada, Blanca, La Dehesa y Los Navazos de Abenójar, es decir, en enclaves situados en el centro de las cuencas sedimentarias o en las zonas más distales de los piedemontes, áreas donde las paredes internas de las cuencas presentan una pendiente más suave.

6. PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS Y MORFOLOGÍA DE LA RED DE DRENAJE

6.1. Análisis de la topología y de la longitud de la red: Orden, número y longitud de cauces.

Determinada la red de drenaje a partir de la cartografía y de la fotografía aérea, se comprueba que sólo en 9 de las 27 cuencas estudiadas aparecen cauces que drenen sus aguas hacia la laguna correspondiente, en todos los casos de carácter temporal. Siguiendo la clasificación de tipos de redes de drenaje de HOWARD (1967), se concluye que todas las cuencas hidrológicas de las lagunas calatravas presentan una red de tipo centripeta. Las lagunas del complejo de Moral de Calatrava presentan una red de tipo dendrítico aunque el comportamiento global es centripeto hacia las propias lagunas. El origen de las redes centripetas se atribuye habitualmente a causas climáticas (glaciarismo y periglaciarismo) o litológicas (áreas kársticas o volcánicas).

En una parte importante de las localidades analizadas se han modificado estas redes centripetas por la acción humana, a través de obras de canalización y drenaje destinadas a desecar estos enclaves húmedos, lo que ha supuesto la pérdida de agua vía superficial mediante conexiones a arroyos próximos o a “minas”. Por citar algunos ejemplos, tenemos en esta situación a las lagunas de Moral de Calatrava, las Navas de Malagón o las lagunas del entorno de Villamayor de Calatrava. En la tabla 3 se recogen los parámetros que sirven para analizar la red fluvial.

Tabla 3. Parámetros morfométricos de la red de drenaje de las lagunas del Campo de Calatrava¹. Elaboración propia.

Nombre	Geometría			Longitud				Relieve	Intensidad fluvial
	u	Un	RB	Ltu	Lmu	LU	RL	Ad	DD
Almodóvar	I	2	2	0,813	0,406	1,879	1,730	1,715	1,297
	II	1		1,413					
Calderón	I	13	2,41	11,306	0,869	6,748	0,882	23,978	0,995
	II	4		3,654	0,913				
	III	2		8,135	4,067				
	IV	1		0,778					
Cañada de Calatrava	I	1	0	1,620		1,620	0	4,345	0,372
Caracuel	I	2	0	2,917	1,458	2,650	0	6,471	0,450
Cervera	I	1	0	0,519		0,52	0	0,945	0,549

Los Garbanzos	I	1	0	2,486			0	4,051	0,613
La Laguna (Moral de Cva.)	I	6	2	2,897	0,482	5,729	1,512	11,000	0,920
	II	2		2,220	1,110				
	III	2		5,010	2,505				
Los Lomillos	I	2	0	1,172	0,586	0,586	0	2,292	0,511
Nava Grande	I	2	0	1,901	0,950	0,950	0	20,571	0,092

u: Orden del cauce; Un:Número de cauces; Ltu:Longitud total de cauces; Lmu: Longitud media de cauces;LU: Longitud del curso principal; RB: Cociente de Bifurcación; RL: Cociente de Longitud; Ad:Área de la cuenca de drenaje de una laguna; DD: Densidad de drenaje

¹: Solo aparecen las lagunas que cuentan con líneas o cauces de drenaje.

El primer parámetro a considerar determinante de las condiciones morfométricas de la red de drenaje es el orden de los cauces, que sirve para interpretar el grado de desarrollo de la red, de manera que cuanto mayor es éste, resulta superior la categoría fluvial de las mismas. La jerarquización de los cauces se ha realizado según el método de STRAHLER (1974). Los órdenes hallados oscilan entre 1 y 4, siendo el mayoritario el de primer orden (seis de las nueve cuencas que cuentan con cauces de drenaje). La laguna de Calderón y la laguna de Moral de Calatrava comparten red de drenaje como consecuencia de la apertura de canales de drenaje que conectan una con otra. En realidad, La Laguna de Moral de Calatrava comparte parte de esa cuenca, la drenada por el arroyo Colorado, mientras que a la laguna de Calderón termina llegando toda la red fluvial que drena a La Laguna de Moral, más la propia de la laguna de Calderón, representada por el arroyo del Cerrillo de los Cantuesos.

En cualquier caso, para el conjunto de las lagunas calatravas queda claro el escaso carácter incisivo de la erosión fluvio-torrencial, pues las líneas de drenaje son prácticamente inexistentes, a pesar de encontrarnos en un sistema morfoclimático que se comporta la mayor parte de los años como semiárido.

El grado de desarrollo de la red de drenaje, definido a partir del número de orden de cauces, parece estar relacionado con el tamaño de las cuencas de drenaje. Esta relación vendría a ratificar la ley de áreas definida por HORTON, aunque esto sucede siempre que exista un relieve de una cierta potencia, tal y como ocurre en la red de drenaje del complejo lagunar de Moral de Calatrava, que presenta cauces de orden 3 y de orden 4, coincidiendo con la cuenca de drenaje más extensa de todo el conjunto palustre del Campo de Calatrava ($Ad=23,978 \text{ km}^2$).

Otro dato interesante se infiere del análisis del número y longitud de los cauces de cada orden. Para el conjunto de las cuencas lagunares calatravas estudiadas se han contabilizado un total de 30 tramos de cauces de primer orden, 7 de segundo orden, 4 de tercer orden y 1 de cuarto orden. La longitud total de los cauces es de 46,481 km y la longitud media de 1,33 km. Los órdenes más frecuentes en la totalidad de las cuencas calatravas, son los de primer y segundo orden, siendo estos además los más cortos

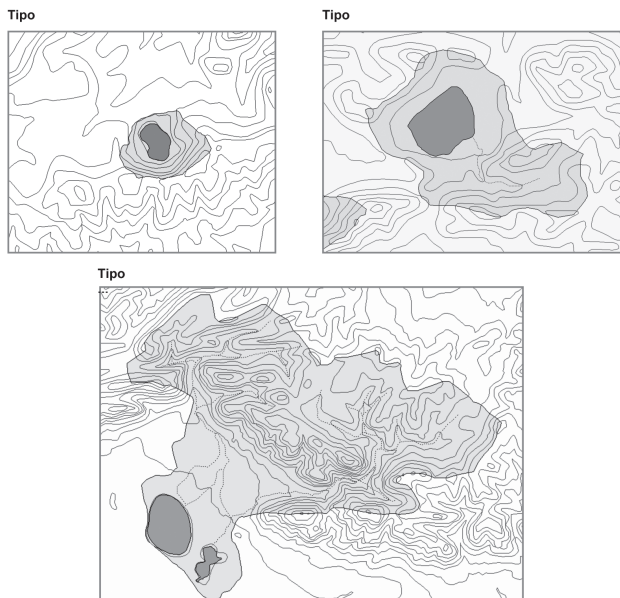
debido a condicionantes litológicos y estructurales que favorecen el abarrancamiento de las laderas que drenan a las cubetas lagunares.

La cuenca que drena a las lagunas de Moral de Calatrava posee 13 tramos de primer orden, 4 de segundo orden, 2 de tercer orden y 1 de cuarto orden. El recorrido total es de 23,783 km, con una media de 1,95 kilómetros por tramo. Las longitudes medias de cada orden son, sin embargo, muy contrastadas, pasando de 0,869 km en los tramos de primer orden a 4,067 km en los de tercer orden. En consecuencia, una característica general de las redes de las lagunas del Campo de Calatrava es la escasa longitud de los cauces.

En función del número de cauces y su jerarquización atendiendo al método de STRAHLER, se pueden clasificar las redes que drenan a las lagunas del Campo de Calatrava en tres categorías (figura 5):

- *Lagunas sin redes de drenaje definidas*: son la mayoría, englobando a 18 lagunas.
- *Lagunas con cauces de orden 1*: son siete lagunas, pues también se ha incluido la laguna de Almodóvar.
- *Lagunas con cauces de orden 3 y 4*: Se corresponde solamente con la amplia cuenca que drena a las lagunas de Moral de Calatrava.

Figura 5. Tipología de las lagunas del Campo de Calatrava en función de la red de drenaje. Tipo I: lagunas sin red de drenaje definida (La Posadilla). Tipo II: Lagunas con cauces de orden 1 (Cañada). Tipo III: Lagunas con cauces de orden 3 y 4 (complejo palustre de Moral de Calatrava). *Elaboración propia.*



Leyenda: Superficie azul oscura: cubetas; superficie celeste: cuenca de drenaje; líneas azules discontinuas: cauces de drenaje; línea continua marrón: curvas de nivel de equidistancia 20 m.

La relación de bifurcación o ley del número de cauces de HORTON (1945) es un parámetro complementario del tamaño de la cuenca y de la densidad de drenaje, que se define como la proporción existente entre el número de segmentos o tramos de cauce de un orden dado y los del orden inmediato superior (HORTON, 1945; STRAHLER, 1964). En esta relación, el número de tramos de órdenes sucesivamente inferiores de una cuenca dada tiende a seguir una progresión geométrica que comienza con el tramo de orden más elevado y crece según una relación constante de bifurcación.

La relación de bifurcación constituye, por otra parte, un indicador indirecto de la capacidad de descarga o crecida de la red estudiada. De esta manera, en igualdad de condiciones (mismas características morfológicas y densidad de drenaje similar) a valores reducidos de este parámetro corresponden tiempos menores de concentración y un riesgo mayor de inundación.

Los valores más bajos, 2, en las lagunas calatravas se corresponden con las lagunas de Almodóvar del Campo y La Laguna de Moral de Calatrava, que son precisamente las que presentan las mayores densidades de drenaje, por encima de 0,9 km/km², por lo que son las que presentan mayor riesgo de inundación. El valor más elevado, 2,41, se ha hallado en la laguna de Calderón de Moral de Calatrava. Hay que advertir que para el resto de lagunas, al no presentar líneas de drenaje o al ser de orden 1, no es posible aplicar este parámetro morfométrico, hecho que también sucede con la relación de longitud.

En cuanto a este nuevo parámetro morfométrico, la relación de longitud se define como la proporción existente entre la longitud media de los tramos de un orden dado y las de los tramos o segmentos del orden inmediato inferior. Por ello, la longitud media acumuladas de tramos de cauces de ordenes sucesivos tiende a formar una progresión también geométrica según una relación de longitud constante, progresión que es completamente inversa a la del número de cauces. Así, mientras el número de cauces mantiene una relación inversamente proporcional al aumento del orden jerárquico, su longitud es directamente proporcional, al aumentar a la par que el orden jerárquico.

Los valores medios que se suelen obtener en la relación de longitud varían entre 1,5 en cuencas en las que se incrementa poco la longitud de los cauces y 3 para cuencas en las que los órdenes superiores presentan grandes longitudes.

Para las lagunas del Campo de Calatrava, los valores más elevados, por encima de 1,5, se encuentran en la laguna de Almodóvar del Campo y La Laguna de Moral de Calatrava, mientras que el valor más bajo se ha hallado en la laguna de Calderón (0,882). Estamos, por lo tanto, ante cuencas en las que se incrementa poco la longitud de los cauces en los órdenes superiores, por lo que su comportamiento torrencial y su poder erosivo son de nivel intermedio, aunque son los más elevados para el conjunto de las lagunas del Campo de Calatrava.

6.2. Análisis de la intensidad fluvial: Densidad de drenaje.

La densidad de drenaje DD se define como la relación existente entre la longitud de los cauces y el área de la cuenca vertiente (HORTON, 1932), siendo un parámetro muy condicionado por los factores de escorrentía (topografía, litología, edafología y los usos del suelo). Se trata, por lo tanto, de un índice que revela el estado erosivo de

una red hidrográfica. Valores inferiores a 10 nos indican una baja densidad de drenaje y una textura gruesa, lo que suele suceder en zonas de gran masividad litológica y abundante cubierta vegetal o bien en materiales muy permeables y con elevada infiltración. Un valor comprendido entre 10 y 16 nos indica una densidad de drenaje media y una textura media, típica de zonas erosionables y con una cobertura vegetal de bosque poco denso. Zonas de abarrancamiento, muy erosionables y sin cobertura vegetal presentan valores comprendidos entre 200 y 500 km/km² para este parámetro morfométrico.

Para el conjunto de las cuencas lagunares del Campo de Calatrava con una red de cauces reconocibles, la densidad de drenaje presenta un valor medio muy bajo, de tan solo 0,644 km/km². La cuenca más drenada se corresponde con la de la laguna de Almodóvar del Campo (DD=1,297 km/km²), seguida de la cuenca de las lagunas de Moral de Calatrava (DD en torno a 0,95 km/km²), mientras que la cuenca de las lagunas de las Navas es la que presenta el valor mínimo, con 0,092 km/km², el más bajo si no tenemos en cuenta las 18 lagunas que carecen de red de drenaje jerquizada.

Las redes de las cuencas lagunares con mayor densidad de drenaje se corresponden con los espacios que se asientan sobre una litología diferenciada y con pendientes acusadas, por lo que son las más adecuadas para el desarrollo de procesos erosivos lineales (cuenca de las lagunas de Moral de Calatrava), así como las que son capaces de movilizar más sedimentos acelerando los procesos de colmatación de las cubetas de las lagunas.

7. CONCLUSIONES.

- Los valores promedios de la superficie de las lagunas del Campo de Calatrava se asemejan a la de los lagos volcánicos hidromagmáticos de Auvernia (PNR-VA, 2003).
- Estos enclaves húmedos pueden conceptualizarse como lagunas (área: 0,004 y 0,4 km²) y como geosistemas palustres (profundidad máxima: inferior a 2 m).
- Presentan valores del índice de desarrollo de la línea de costa que son compatibles con una génesis vinculada a la actividad volcánica al presentar formas subcirculares.
- Se han analizado un total de 24 cuencas de drenaje que se caracterizan por presentar divisorias de aguas relativamente bien marcadas, presentando tamaños inferiores a 20 km², lo que condiciona a su vez una baja densidad de drenaje.
- El cociente de circularidad de MILLER (1953) indica que estamos ante cuencas en las que predominan las formas subcirculares (de nuevo indicador de origen volcánico).
- La razón relativa de relieve oscila entre 2,34 y 44,29, con un promedio de 20±13, lo que indicaría valores medios en relación con la pérdida anual de sedimentos. Los valores más elevados de este parámetro (por encima de 35) se localizan en enclaves donde los desniveles absolutos son más elevados (sierras y piedemonte).

- Sólo en 9 de las 27 cuencas de drenaje estudiadas aparecen cauces que drenen sus aguas hacia la laguna correspondiente, en todos los casos de carácter temporal. La jerarquización de los cauces se ha realizado según el método de STRAHLER (1974), oscilando los órdenes de cauces entre 1 y 4, siendo el mayoritario el de orden 1, calculándose la longitud total en 46,481 km. La densidad de drenaje presenta un valor medio muy bajo, de tan solo 0,644 km/km².
- Siguiendo la clasificación de tipos de redes de drenaje de HOWARD (1967), se concluye que todas las cuencas hidrológicas de las lagunas calatravas presentan una red de tipo centrípeta (indicador de origen volcánico).
- En función del número de cauces y su jerarquización se han clasificado las redes que drenan a las lagunas del Campo de Calatrava en tres categorías: lagunas sin redes de drenaje definidas, lagunas con cauces de orden 1 y lagunas con cauces de orden 3 y 4.
- Los valores más bajos de la relación de bifurcación se corresponden con las lagunas de Almodóvar del Campo y La Laguna de Moral de Calatrava, que son las que presentan las mayores densidades de drenaje, por encima de 0,9 km/km², por lo que son las que presentan mayor riesgo de inundación.
- En cuanto a los valores de la relación de longitud, estamos ante cuencas en las que se incrementa poco la longitud de los cauces en los órdenes superiores, por lo que su comportamiento torrencial y su poder erosivo son de nivel intermedio.
- Para las lagunas calatrava con una red de cauces reconocibles, la densidad de drenaje presenta un valor medio muy bajo, de 0,644 km/km². La cuenca más drenada se corresponde con la laguna de Almodóvar del Campo (DD=1,297 km/km²), seguida de la cuenca de las lagunas de Moral de Calatrava (DD en torno a 0,95 km/km²), mientras que la cuenca de las Navas de Malagón presenta el valor mínimo, con 0,092 km/km².
- Las redes de las cuencas lagunares con mayor densidad de drenaje se corresponde con los espacios que se asientan sobre una litología diferenciada y con pendientes acusadas, por lo que son las más adecuadas para el desarrollo de procesos erosivos lineales (cuenca de las lagunas de Moral de Calatrava), así como las que son capaces de movilizar más sedimentos acelerando los procesos de colmatación de las cubetas.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANCOCHEA, E. (2004). "Canarias y el vulcanismo neógeno peninsular", en VERA, J.A.. (Ed.) *Geología de España*, Madrid, SGE-IGME, pp.635-682.
- ARREDONDO, F.J.L.; BORREGO, E.L.E.; CASTILLO, D.R.M. y VALLADOLID, L.M.A. (1983): "Batimetría y morfometría de los lagos "maars" de la cuenca de Oriental, Estado de Puebla, México", en *Biótica*, 8 (1), pp. 37-47.
- BALLESTER, R. (Coord.) (2003). *Humedales y ramblas de la Región de Murcia*, Murcia, Dirección General del Medio Natural/Región de Murcia.
- CASADO, S. y MONTES, C. (1995): *Guía de los lagos y humedales de España*, Madrid, J. M. Reyero.

- CASTILLO JURADO, M. de. (2004): *Morfometría de lagos. Una aplicación a los lagos del Pirineo*, Tesis doctoral, Barcelona, Universitat de Barcelona.
- C.M.A. (2002). *Plan Andaluz de humedales*, Consejería de Medio Ambiente/Junta de Andalucía, Sevilla .
- COSTA, L. T.; FARINHA, J. C.; HECKER, N. y TOMÁS VIVES, P. (1996): *Mediterranean Wetland Inventory: A Reference Manual, Volume I.*, Lisboa (Portugal), MedWet/ Instituto da Conservação da Natureza /Wetlands International publication.
- ELTON, C.S. y MILLER, R.S. (1954): “The ecological survey of animal communities: with a practical system of classifying habitats by structural characters”, en *Journal of Ecology*, 42, pp. 460-96.
- GOSÁLVEZ REY, R.U. (2003): *Las lagunas de la región volcánica del Campo de Calatrava: Inventario y tipología genético-funcional*, Proyecto de investigación DEA, Ciudad Real, UCLM.
- HARANGI, S.; DOWNES, H. y SEGHEDI, I. (2006): “Tertiary-Quaternary subduction processes and related magmatism in the Alpine-Mediterranean region”, en *Geological Society, London, Memoirs*, 32(1), pp. 167-190.
- HORTON, R.E. (1932): “Drainage basin characteristics”, en *Transactions of the American Geophysical Union*, nº 13, pp. 350-361.
- HORTON, R.E. (1945): “Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology”, en *Bulletin of the Geological Society of America*, nº 56, pp. 275-370.
- HOWARD, A.D. (1967): “Drainage Analysis in geologic interpretation: A summation”, en *Am Assoc. Petr. Geol. (AAPG)*, vol. 51/11, pp. 2246-2259.
- HUTCHINSON, G. E. (1975): *A treatise on limnology. Volume I. Geography, physics and chemistry*, New York, John Wiley & Sons, INC.
- KLING, G. W. (1988): “Comparative transparency, depth of mixing, and stability of stratification in lakes of Cameroon, West Africa”, en *Limnol. Oceanogr.*, 33, pp.27-40.
- MARTÍ, J.; PUJADAS, A.; FERRES, D.; PLANAGUMÀ y MALLARACH, J.M. (2001): *El vulcanismo. Guia de camp de la Zona Volcànica de la Garrotxa*, 2ª edició, Barcelona, Parc Natural de la Zona Volcànica de la Garrotxa (Departament de Medi Ambient, Generalitat de Catalunya).
- MELTON, M.A. (1957): *An Analysis of the Relation among Elements of Climate, Surface Properties and Geomorphology*, Tech. Rep. No. 11, New York, Department of Geology, Columbia University.
- MEYER, R. y FOULGER, G. R. (2007): *The European Cenozoic Volcanic Province is not caused by mantle plumes*, en: www.mantleplumes.org/Europe.html
- MILLER, V.C. (1953): *A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee*, Office of Naval Research, Geography Branch, Project NR 389-042, Technical Report, 3, Columbia University.
- PEDRAZA GILSANZ, J. de. (1996): *Geomorfología. Principios, métodos y aplicaciones*, Madrid, Editorial Rueda, S.L.

- P.N.R.V.A. (2003): *Lacs des volcans d'Auvergne*, Aydat (France), Publication du Parc Natural Regional des Volcans d'Auvergne.
- PUJADAS, A., PALLÍ, L., BRUSI, D. y ROQUÉ, C. (1997). *El vulcanisme de la vall de Llémena*, Girona, Col·lecció *Dialogant amb les Pedres*, núm. 5. Àrea de Geodinàmica de la Universitat de Girona.
- SALA, M. y GAY, R. (1981): "Algunos datos morfométricos de la cuenca del Isábena", en *Notes de Geografia Física*, nº 4, pp. 41-65.
- SENCIALES GONZÁLEZ, J. M. (1999): *Redes fluviales. Metodología de Análisis*, Málaga, UMA.
- STRAHLER, A.N. (1964): "Quantitative geomorphology of drainage basins and channel Networks", en CHOW, V.T. (Ed.) *Handbook of applied hydrology*, 4-39/4-76.
- STRAHLER, A.N. (1974): *Geografia física*, Barcelona, Omega.
- TIMMS, B. V. 1993. *Lake Geomorphology*. Adelaide (Australia), Gleneagles.