

VULNERABILIDAD DE LAS MASAS DE AGUA FRENTE AL MEJILLÓN CEBRA

Antoni Palau

Dirección de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, Endesa
Crta. Tarragona, km 89,300, 25191-Magraners (Lleida)
antonio.palau@endesa.es

Concha Durán, Rafael Romeo

Confederación Hidrográfica del Ebro
Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino
Paseo Sagasta, 24-28, 50007-Zaragoza

Resumen: Por su origen y por sus capacidades, el mejillón cebra es una especie invasora típica, que gracias a la actividad humana, ha acelerado extraordinariamente su dispersión a nivel mundial. Entró en la Península Ibérica en 2001, en los embalses del bajo Ebro y se ha ido extendiendo a otras cuencas, causando problemas ambientales y socioeconómicos notables. Hoy por hoy no existen opciones de control eficientes en medios abiertos. El análisis de la vulnerabilidad de las masas de agua frente a la especie es una herramienta de control en la medida en que contribuye a identificar los ambientes de más riesgo y permite centrar sobre ellos la máxima atención. El IVMC (Índice de Vulnerabilidad frente al Mejillón Cebra) se elaboró con esta finalidad, y para conocer sus capacidades, se ha aplicado en 89 masas de agua de la cuenca del Ebro, consiguiendo identificar las muy vulnerables, y dentro de estas, todas las que tienen presencia comprobada de mejillón cebra. En sentido contrario, las masas de agua muy poco o nada vulnerables, han quedado también adecuadamente definidas.

INTRODUCCIÓN

El mejillón cebra en España

El mejillón cebra (*Dreissena polymorpha*, Pallas, 1771) tiene su origen biogeográfico en la región ponto-cáspica, en el mediterráneo oriental y al sur de Rusia; en la zona hoy ocupada por los mares de Aral, Caspio y Negro. Por su origen y por sus capacidades, el mejillón cebra es una especie invasora típica (Margalef, 1977) que, no obstante y gracias a la actividad humana, ha acelerado extraordinariamente su dispersión. Se empezó a extender hacia Europa, desde el Este, a partir el siglo XVIII (Kinzelbach, 1992) con la navegación fluvial de ríos y canales, llegando a casi toda la Europa occidental ya en el siglo XIX (Holanda, Bélgica, Alemania, Francia, Inglaterra,...), y prodigándose el pasado siglo hacia la casi totalidad del resto de países europeos (Suiza, Italia,...). La Península Ibérica permanecía al margen de la invasión, debido a su aislamiento geográfico de las principales vías de colonización de la especie (ríos navegables, canales,...). Este hecho es una clara evidencia de que el mejillón

cebra se ha dispersado y se dispersa de la mano del hombre.

En los años ochenta del siglo XX, el mejillón cebra llegó a América del Norte, a la zona de los Grandes Lagos, con las aguas de lastre de grandes embarcaciones dedicadas al transporte marítimo de mercancías, que cargaban en puertos fluviales europeos (MacMahon y Tsou, 1990). Los antecedentes y capacidades invasoras de la especie pueden encontrarse en Palau *et al.* (2004).

El mejillón cebra se descubrió por primera vez y de forma fehaciente en España, en el año 2001, en el tramo inferior del Ebro (Ruíz-Altaba *et al.*, 2001). Desde entonces su presencia se ha ido prodigando por toda la cuenca del Ebro (Figura 1) y ha pasado a otras cuencas (Figura 2).

Son varias las vías posibles de entrada del mejillón cebra en un ecosistema acuático libre (Palau *et al.*, 2004; Minchin *et al.*, 2005), pero la más habitual suele ser la suelta de agua con larvas de este molusco invasor, bien transportada como lastre de grandes embarcaciones, bien en viveros para el transporte de cebo vivo para la pesca, con aguas procedente de otro lugar donde

esté presente, o bien con las aguas de transporte de especies exóticas de peces, que se introducen ilegalmente con fines recreativos y económicos. Esta última parece ser la causa más probable de

la presencia de la especie en España, posiblemente vinculada a la introducción del alburno (*Alburnus alburnus*) y la lucioperca (*Stizostedion lucioperca*).

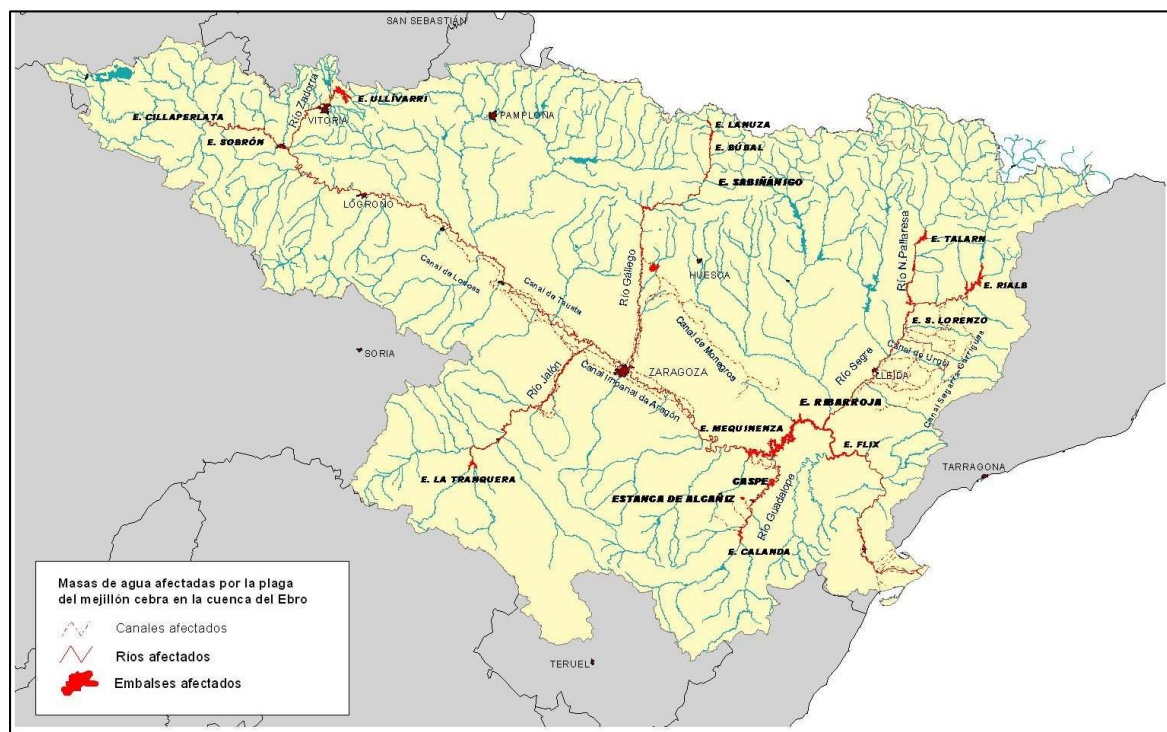


Figura 1. Mapa de distribución (afecciones) del mejillón cebra en la Cuenca del Ebro

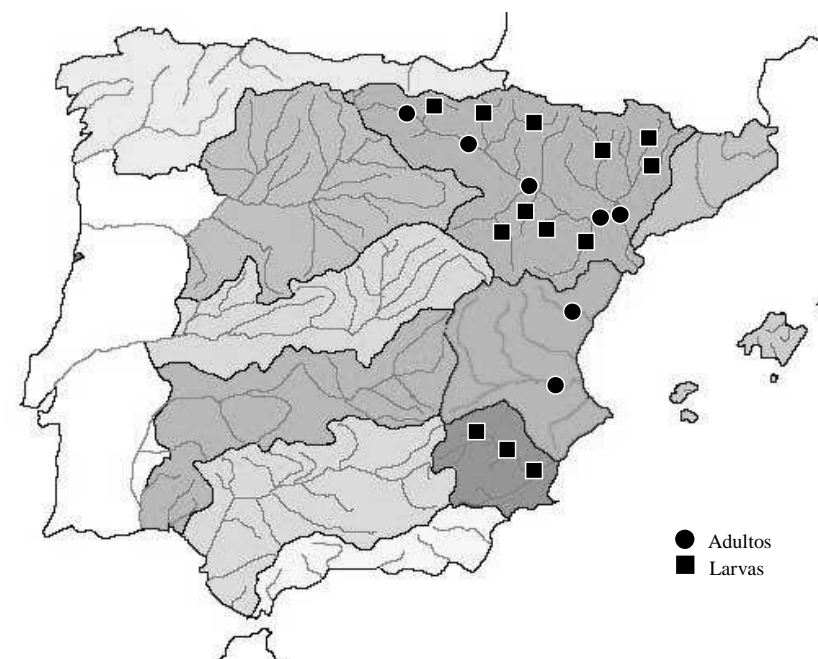


Figura 2. Distribución general del mejillón cebra en la Península Ibérica, a nivel de Cuencas Hidrográficas y de los principales cursos de agua, según datos recopilados de diversas fuentes

Una vez la especie se instala en un medio acuático nuevo, la interacción de diversos factores ambientales, hará que la adaptación (naturalización) pueda llevarse a cabo o fracase. Desde el momento en que se introduce el mejillón cebra, parece ser que se requieren unos 5-6 años para que alcance sus máximas densidades, siguiendo el modelo asintótico característico de las especies estrategas de la "r", de gran capacidad reproductora y vida breve (Margalef, 1977). Cuando la especie está consolidada, su progre-

sión es imparable e irreversible (Hunter y Bailey, 1992), dando lugar a un muy grave problema ambiental de índole ecológico y socioeconómico a corto o a medio plazo (Palau *et al.*, 2003).

Actualmente en la cuenca del Ebro, las afecciones principales se están detectando en el eje del Ebro, que es donde se ha constatado la presencia de ejemplares adultos y de colonias bien desarrolladas. Algunas de estas afecciones pueden observarse en la Figura 3.



Figura 3. Efectos del mejillón cebra sobre distintas obras e infraestructuras en la Cuenca del Ebro, así como sobre especies acuáticas. (A) Captación de la Estación de Alerta de la CHE en Cabriana; (B) Embalse de Puentelarrá; (C) Ejemplar de *Anodonta* "colonizado" de mejillón cebra; (D) Rejas de la central hidroeléctrica de Riba-roja, en el embalse del mismo nombre; (E) ejemplar de carpa muerto por infección de la vías urinarias con un parásito de peces (*Phyllodistomum folium*; Helminto) introducido por el mejillón cebra

A nivel económico, los efectos perjudiciales del mejillón cebra, se concretan en la obturación de captaciones y conducciones de agua, en limitaciones a los usos recreativos de cursos y masas de agua y en el aumento de los costes de mantenimiento de obras hidráulicas, fundamentalmente. Algunas estimaciones indican que los daños económicos causados en Estados Unidos, en los primeros años de presencia de la especie, ya ascendieron a unos 5.000 millones de dólares al año, sólo en la zona de los Grandes Lagos (Ludyskiy *et al.*, 1993). En España se desconoce la totalidad de afecciones, pero pueden suponerse importantes. Sólo en la cuenca del Ebro hay 223 abastecimientos urbanos y unos 300 industriales. El hecho es que entre 2003 y 2008, la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) ha gastado un total de 1.609.052,63 euros (Tabla 1). Una síntesis de los trabajos realizados y de los proyectados por parte de la CHE para el trienio 2007-2010, se recoge en la Tabla 2.

Año	Gasto anual euro (€)
2003	88.876,40
2004	144.296,29
2005	64.956,66
2006	95.912,00
2007	419.831,90
2008	860.136,04
TOTAL	1.609.052,63

Tabla 1. Distribución anual de los gastos de la Confederación Hidrográfica del Ebro, con relación a las actuaciones y medidas adoptadas frente al mejillón cebra

En el sector privado, Endesa ha sido hasta el momento la empresa más afectada por la presencia del mejillón cebra. Para el mismo periodo (2003-2008), los costes ocasionados por la especie, en los embalses hidroeléctricos del bajo Ebro (Mequinenza-Ribarroja-Flix), se cifran en unos 2,2 millones de euros. En esta partida se incluyen las pérdidas de producción de energía, los costes de adecuación de instalaciones, los gastos de mantenimiento y los trabajos de investigación desarrollados.

Posibilidades reales de erradicación y control

En cuanto a erradicación, existe abundante bibliografía sobre tratamientos eficaces de la invasión en el interior de instalaciones. Una recopilación de ellos puede encontrarse en Palau y Cia (2006), con resultados sobre diferentes ensayos,

así como en CHE (2007). Sin embargo, en el caso de espacios abiertos, como cursos y masas de agua, las líneas de actuación deben dirigirse hacia la prevención y el control ya que la erradicación es inviable, de momento. Los dos principales problemas de la erradicación del mejillón cebra en espacios acuáticos abiertos son, por un lado la magnitud (concentración de producto, intensidad de tratamiento,...) que hay que alcanzar para conseguir resultados y la falta de especificidad de tales productos o tratamientos, en lo que a sus efectos se refiere. Sobre este último particular, se lleva ya años trabajando en la búsqueda de actuaciones selectivas sobre el mejillón cebra, sin efectos en el resto de la biocenosis. Una opción es el uso de biocidas de origen bacteriano, como la cepa modificada de *Pseudomonas fluorescens* (CL0145A) desarrollada por el Departamento Nacional de Energía de los Estados Unidos, que está siendo estudiada y ensayada desde el 2005 con aparentes buenos resultados sobre el mejillón cebra y nula incidencia sobre otras especies. Otra línea de investigación son las llamadas "biobalas encapsuladas" (Aldridge *et al.*, 2006), consistentes en unas microcápsulas del tamaño específico de partícula que filtra el mejillón cebra y que contienen cloruro de potasio, un tóxico potente para los bivalvos de agua dulce. El mejillón cebra ingiere las cápsulas sin detectar su toxicidad, que una vez en su aparato digestivo, se van disolviendo y liberando el tóxico.

En sistemas cerrados, los tratamientos con cloro son los más frecuentes, por su eficacia y su bajo coste. Aunque el cloro tiene el peligro de provocar la aparición de compuestos organoclorados, muchos de los cuales están considerados como sustancias prioritarias, tóxicas, persistentes y bioacumulables, lo cierto es que a las dosis de aplicación para el tratamiento frente al mejillón cebra y salvo en casos de aguas con gran cantidad de materia orgánica, no deberían darse problemas. En todo caso y dado que existe un peligro potencial en el uso de productos clorados, es recomendable buscar en cada caso, las mejores técnicas disponibles y obligar desde la administración a su uso.

La Confederación Hidrográfica del Ebro dispone de una línea de asesoramiento a usuarios afectados, sobre tratamientos y productos compatibles con el medio acuático. Endesa ha realizado ensayos con productos químicos no oxidantes (aminas cuaternarias), más caros que el cloro pero activos a muy bajas concentraciones, con tiempos de aplicación breves y de muy bajo impacto ambiental (Palau *et al.*, 2006).

CLASIFICACIÓN	ACTUACIONES	OBJETIVOS	CRONOGRAMA	ESTADO ACTUAL
Investigación científica y técnica	Proyectos I+D+i	Mejora del conocimiento de la especie y medidas de control	2 años	TF
	Estudio de la vulnerabilidad de las masas de agua	Aplicación práctica	1 año	TF
	Pruebas de nuevas metodologías de arrastre	Pruebas en embalses y ríos afectados.	4 años	TR
	Centro de Rescate y Reproducción de la <i>Margaritifera</i>	Construcción del Centro (Canal Imperial)	2 años	TP
Actuaciones en navegación	Nuevo sistema de vigilancia de la navegación	Cumplimiento de las normas	Control anual	TP
		Seguimiento y control remoto de embarcaciones	2 años (control anual)	TP
	Nueva normativa de navegación	Elaboración	6 meses	TF
	Estaciones de limpieza en los embalses navegables	Facilitar y asegurar el cumplimiento desinfección	1 año (según prioridades)	TR
	Accesos y embarcaderos	Inventario en todos los embalses navegables	9 meses con revisión anual	TR
	Control accesos incontrolados y adecuación de los controlados	Cierre de accesos no controlados	9 meses con revisión anual	TR
Seguimiento de la población del mejillón cebra	Seguimiento de adultos en OOHs explotadas por la CHE.	Análisis de la evolución de colonias en testigos	Seguimiento diario	TF
	Detección precoz de adultos en canales y embalses de la CHE	Instalación de testigos	1 año	TR
	Seguimiento larvario de mejillón cebra en ríos y embalses	Evolución de la densidad y distribución de la especie	Seguimiento estacional	TF
Actuación sobre infraestructuras	Limpieza de canales e instalaciones	Eliminación de adultos y evaluación de afecciones	Periodicidad anual	TP
	Modernización y adecuación de instalaciones en riesgo	Protección de instalaciones y OOHs	1 año (control anual)	TP
	Convenio con las CCAA con municipios afectados	Ayuda a municipios (sistemas de abastecimiento)	Periodicidad anual	TP
Difusión y formación	Plan de comunicación	Concienciación	2 años	TR
		Concurso IDEA sobre usos posibles del mejillón cebra	Anual	TP
	Diseño y mantenimiento de una web del mejillón cebra	Centralizar y canalizar toda la información generada	6 meses con revisión anual.	TR
	Colocación de paneles en los 70 embalses navegables	Información de restricciones y concienciación de usuarios	9 meses	TF
	Edición de un manual de técnicas de control y erradicación	Dar respuesta a cuestiones y dudas de los usuarios del agua	1 año con revisión anual	TF
	Elaboración de un documento sobre biología del mejillón cebra	Dar respuesta cuestiones y dudas de los usuarios del agua	1 año con revisión anual	TF
	Diseño de folletos divulgativos, carteles, pegatinas...	Dar respuesta a cuestiones y dudas de los usuarios del agua	1 año con revisión anual	TF
	Difusión de la nueva normativa de navegación	Edición de folletos informativos.	1 año con revisión anual	TF
	Jornadas de formación e información	Participación de usuarios potencialmente afectados	1 año Acto puntual	TP
	Campañas de concienciación en centros escolares	Concienciación del peligro de las especies exóticas	1 año revisión anual	TF
	Campañas de concienciación por los medios de comunicación	Anuncios publicitarios en diferentes soportes	1 año	TP

Tabla 2. Plan de choque (2007 - 2010) de la Confederación Hidrográfica del Ebro. Balance a diciembre de 2008. (TF) Trabajos finalizados; (TR) Trabajos en realización; (TP) Trabajos pendientes de realización

Aunque es posible en un futuro el conseguir productos selectivos para el mejillón cebra, lo cierto es que su aplicación en espacios abiertos, difícilmente será viable por las dosis de producto o intensidades de tratamiento que pueden requerirse para eliminar el mejillón cebra, de forma eficiente y selectiva, por ejemplo, en un gran embalse o en un río.

Por tanto, descartada al menos a corto plazo la erradicación total de la especie en medios abiertos, hay que centrarse en las opciones de control poblacional. En esta línea, un aspecto clave es la detección rápida de la presencia de la especie, dado que permite actuar con aún bajas densidades de población y por tanto con más posibilidades de control (e incluso de erradicación rápida, según el caso), con actuaciones menos intensas o drásticas. Hoy por hoy la detección de presencia se lleva a cabo a través de la identificación de larvas, dado que se trata de una metodología sencilla y relativamente rápida, muy similar a la que se utiliza para el estudio del plancton. La observación de adultos es aún más fácil, siempre y cuando estos se distribuyan en zonas poco profundas y bien visibles (orillas de lagos y embalses, ríos vadeables,...); sin embargo si la población adulta se encuentra en el fondo de una masa de agua de cierta profundidad, su detección sólo es posible mediante buceo o mediante técnicas hidroacústicas multihaz, como las que está desarrollando experimentalmente Endesa y también la Confederación Hidrográfica del Ebro. Estas técnicas permiten identificar, a partir de la emisión de ondas de sonido hacia el seno de una masa de agua, las señales acústicas producidas por la presencia de cualquier elemento vivo o inerte existente en la columna de agua o en el fondo, que genere un eco distinto al del agua. De poder ponerse a punto esta metodología, sería posible inspeccionar grandes masas y cursos de agua profundas, de forma rápida y barata, sin necesidad de trabajos subacuáticos.

Aún sobre la detección rápida de larvas, actualmente también existen ya desarrollos de técnicas de detección de ADN de distintas especies acuáticas invasoras y se está trabajando en España para su aplicación al mejillón cebra. Esta técnica de detección rápida, se basa en la amplificación de ADN mediante la reacción en cadena de la ADN polimerasa (PCR; "Polymerase Chain Reaction"). En esencia se trata de amplificar *in vitro* un fragmento de ADN específico, replicándolo una y otra vez, y comparándolo con una secuencia conocida específica del organismo objetivo que hace de patrón.

Finalmente, otra línea de trabajo de interés, también aplicada al control de las poblaciones de mejillón cebra, es la gestión de embalses y ríos regulados. A partir del estudio de la distribución espacial de los adultos (de vida sésil sobre el sustrato) y de la distribución temporal de las larvas (de vida planctónica), se trata de manejar la hidrodinámica del curso o masa de agua objetivo de forma que perjudique el máximo posible a la población de mejillón cebra residente. La modificación de niveles de embalse, tiempos de residencia del agua o caudales circulantes, en determinadas épocas del año clave, se ha revelado como una forma de ayudar a los ecosistemas acuáticos a deshacerse de densidades masivas de especies invasoras en general, y del mejillón cebra en particular. Endesa, junto con la Universidad Politécnica de Cataluña y la Universidad de Barcelona, están llevando a cabo un estudio en este sentido, aplicado al sistema de embalses del bajo Ebro y el tramo de río regulado asociado, que finalizará en 2009.

Vulnerabilidad de las masas de agua frente a la especie

De los antecedentes hasta ahora expuestos, se deduce que el mejillón cebra es una grave amenaza ecológica y económica para la conservación y el aprovechamiento sostenible de los ecosistemas acuáticos ibéricos. Se deduce también que la introducción de la especie es irreversible, que no existen opciones de erradicación total en medios abiertos y que por tanto todo lo que permita prevenir la presencia o el desarrollo de la especie, resulta esencial para su control. Ya se ha hablado de la identificación precoz. Queda sin embargo otro elemento a tener en cuenta: la vulnerabilidad de las masas de agua frente al mejillón cebra.

A la hora de enfrentarse a una especie invasora, un aspecto clave ciertamente es el reconocimiento previo de los ambientes que van a ser más vulnerables. De esta forma se puede tener una idea del alcance espacial que la especie invasora va a tener, y al mismo tiempo, de los enclaves prioritarios, más vulnerables, donde centrar los mayores esfuerzos de preservación y control. En el caso del mejillón cebra, la Universidad de Lleida desarrolló, por encargo de la CHE, un índice capaz de medir la vulnerabilidad de cualquier masa de agua, el IVMC (Índice de Vulnerabilidad al Mejillón Cebra; Palau, 2007). A continuación se expone la estructura del IVMC, así como una muestra de su aplicación práctica.

MATERIAL Y MÉTODOS

Composición y organización del IVMC

El IVMC está compuesto de cuatro bloques básicos de descriptores (BB) y de dos coeficientes correctores (Rd, Ve).

Para la elaboración de los bloques básicos, en primer lugar se identificaron los descriptores, bien fueran cualitativos o cuantitativos, que se consideró que intervenían de forma significativa en favorecer la entrada y el asentamiento del mejillón cebra en un lago, laguna o embalse. También se tuvieron en cuenta aquellas características de la masa de agua, que aportaban gravedad en el caso de que el mejillón cebra llegase a colonizarla.

Una vez identificados los descriptores, se procedió a agruparlos, lo que dio como resultado cuatro bloques, quedando conformados en cuanto a contenidos, del siguiente modo:

- Bloque básico 1 (BB1). Referido a las características ecológicas propias de la masa de agua. Incluye los siguientes descriptores:
 - Estabilidad de la masa de agua, que se cuantifica a partir de su tasa de renovación y de la amplitud y frecuencia de las oscilaciones del nivel de agua.
 - Morfología de la cubeta, que se valora a partir su desarrollo de volumen y su profundidad relativa (Wetzel, 1981).
 - Régimen térmico. Se trata de un parámetro clave en el ciclo biológico de la especie. El IVMC tiene en cuenta la temperatura mínima anual de la masa de agua y su amplitud de variación.
 - Estado trófico, que se mide a partir de un índice clásico de oligotrofia-eutrofia, como es el TSI ("Trophic State Index"; Carlson, 1974).
 - Contenido en calcio. Este catión es esencial para el mejillón cebra. Se determina directamente a partir de su concentración en el agua o del valor de conductividad eléctrica.
- Bloque básico 2 (BB2). Se refiere a los usos recreativos que acoge la masa de agua. Incluye, como descriptores, los siguientes aspectos y actividades:
 - Distancia al foco contaminante de mejillón cebra, más próximo.
 - Accesibilidad a la cubeta. Valora el número de accesos y su nivel de control de paso.
 - Navegabilidad. Tiene en cuenta la intensidad de uso náutico.
 - Pesca deportiva o recreativa. Al igual que en el caso anterior, pero aplicado a la intensidad de pesca.
 - Presencia de especies exóticas de peces. Dado que la introducción ilegal de peces con fines recreativos se baja como la principal causa de introducción y posterior dispersión del mejillón cebra en España, este descriptor tiene en cuenta el número y el tipo de especies exóticas de peces presentes.
- Bloque básico 3 (BB3). Mide la conectividad fluvial y el tipo de masa de agua. Tiene en consideración los siguientes descriptores:
 - Situación dentro de la red hidrográfica. Cuanto más aguas arriba se encuentre la masa de agua afectada, mayor es su incidencia, como foco emisor de la especie, sobre el resto de la cuenca.
 - Conexión con otras masas de agua. A más interconectividad mayor efecto amplificador en la dispersión de la especie.
 - Volumen y origen de la masa de agua (natural o artificial). Hace referencia a las posibilidades de gestión de la masa de agua, una vez colonizada por el mejillón cebra. Así, una gran masa de agua admite menos opciones de manejo que una de pequeña y un embalse es siempre más versátil que un lago.
- Bloque básico 4 (BB4). Afectación socio-económica y ecológica generada por la presencia del mejillón cebra. Incluye los descriptores que se indican a continuación:
 - Tipos de uso del agua y finalidad del uso. Discrimina entre usos consuntivos y no consuntivos, y en cada caso establece una gradación en función de cómo la presencia de mejillón cebra puede afectar a la finalidad de uso o destino del agua (urbano, industrial, regadíos,...).

- Afectación a espacios naturales y especies protegidas. Es probablemente el descriptor más difícil de concretar dada la complejidad de establecer la afectación del mejillón cebrá sobre el conjunto de un espacio natural protegido o sobre las especies protegidas residentes. Para cuantificar la afectación a las especies protegidas, se establecieron tres posibles niveles. Así, todos los ecosistemas acuáticos naturales y de condición o vocación oligotrófica, junto con los que se sabe que albergan especies sensibles o de interés especial, se les asigna una valoración intermedia directamente. Los ambientes acuáticos de más valor de conservación, considerados como tales los que están adscritos a alguna categoría de protección o disponen de un reconocimien-

to científico, junto con los que albergan especies vulnerables o en peligro de extinción, asumen la mayor puntuación. El resto de masas de agua se quedan con la puntuación mínima. En cuanto a los espacios protegidos afectables, la valoración se plantea en función de si la masa de agua afectable es o no un espacio natural protegido y, dado el caso, la categoría de espacio protegido a la que pertenece.

Una condición fundamental en la selección de los descriptores, era que se pudiesen cuantificar de forma rápida y sencilla a partir de información fácilmente accesible. En los casos en que esta condición no era del todo alcanzable por las características del descriptor, el propio IVMC establece el criterio de cuantificación alternativo.

VARIABLES	ACRÓNIMOS	ESCALA DE VALORACIÓN				
		1	2	3	4	5
Tiempo de residencia (días)	Tr	< 15	15 a 28	29 a 35	36 a 60	>60
Oscilación nivel de agua (Oa)	Oa	> 0,7	0,7 a 0,0	0,0 a -0,7	< -0,7	---
Amplitud oscilación (% Zmáx)		< 8	8 a 16	17 a 32	> 32	---
Régimen térmico	Rt	< 8,5	8,6 a 12,0	12,1 a 16,0 > 28,0	16,1 a 20,0 24,1 a 28,0	20,1 a 24,0
Estado trófico	Et	0 a 10 ó 90 a 100	11 a 25 ó 71 a 90	26 a 35	36 a 55 ó 61 a 70	56 a 60
Profundidad relativa (%)	Zr	---	< 2	2 a 4	> 4	---
Desarrollo del volumen	Dv	---	< 0,3	0,3 a 0,5	> 0,5	---
Conductividad eléctrica (µS/cm)	Cc	< 42	42 a 69	70 a 162	163 a 222	> 222
Ca ⁺² (mg/l)		< 6	6 a 10	10,1 a 25	25,1 a 35	> 35
pH (a 20 °C)	pH	< 6,9		6,9 a 8,0		> 8,0
Distancia al foco principal (km)	Df	0 a 100	101 a 300	301 a 500	>500	---
Nº accesos	Na	---	Bajo (< 5)	Moderado (5-10)	Alto (>10)	---
Control de los accesos	Ca	Nulo o Bajo	Moderado o Alto y/o desinfección posible	---	---	---
Navegabilidad	Nv	---	Nula o Baja	Moderada	Alta	---
Intensidad de pesca	Ip	---	Nula o Baja	Moderada	Alta	---

Tabla 3. Distribución de los valores de las variables que intervienen en el IVMC, sobre la escala de 5 niveles propuesta para su discretización. En gris oscuro se indican los valores indicativos de una mayor susceptibilidad frente a la presión de colonización del mejillón cebrá, y en gris claro los propios de unas condiciones más desfavorables para dicha especie

VARIABLES	ACRÓNIMOS	ESCALA DE VALORACIÓN				
		1	2	3	4	5
Especies exóticas	Ee	Ninguna	Black-bass	Siluro	Alburno o Rutilo	Lucioperca
Tipo de masa de agua	Tm	---	Lagunas y/o represas	Embalses	Lagos/lbones/GMAN ^a	---
Conectividad y volumen de la masa de agua	Co	Aislada	No aislada pequeña (< 5 hm ³)	No aislada media (5 a 20 hm ³)	No aislada grande (21 a 50 hm ³)	No aislada muy grande (> 50 hm ³)
Situación de la masa de agua en la red hidrográfica	Sx	Tramo alto	Tramo medio	Tramo bajo o Sistema endorreico	---	---
Captaciones	Tc	Ninguna	Consuntivas	No consuntivas	---	---
Usos del agua ^b	Us	Ninguno (no específico)	Riego	Hidroeléctrico	Industrial	Abastecimiento urbano
Efectos ecológicos negativos en la biocenosis	Ab	Menores (bajos)	Mayores (altos)	---	---	---
Tipo de especies afectables	Ae	No protegidas (ENP)	De interés especial y/o sensibles (EIS)	Vulnerables y/o En peligro de extinción (EVP)	---	---
Espacios protegidos afectables	Ep	Ninguno	---	Alguno	---	---
Tipo de espacios protegidos afectables ^c	Tp	Ninguno protegido	---	Espacios de Interés Natural, IBA	LIC's, Reservas Naturales, ZEPA, Zonas Húmedas	Parques Naturales y Nacionales. Zonas Húmedas Ramsar

(a) GMAN: Gran masa de agua natural.

(b) En "usos del agua", se entra por el nivel de puntuación más alto posible de la escala de valoración.

(c) En "Tipo de espacios protegidos afectables", se entra por el nivel de protección más coincidente y de mayor puntuación posible, de la escala de valoración

Tabla 3. (Continuación). Distribución de los valores de las variables que intervienen en el índice VMC, sobre la escala de 5 niveles propuesta para su discretización. En gris oscuro se indican los valores indicativos de una mayor susceptibilidad frente a la presión de colonización del mejillón cebra, y en gris claro los propios de unas condiciones más desfavorables para dicha especie

Teniendo en cuenta que los descriptores son de muy distinta naturaleza (concentraciones, abundancias, tiempos, presencia, tipos,...) y que su manifestación tiene unidades de medida y escalas numéricas muy diferentes, era imprescindible proceder a una normalización de valores acotada a una escala numérica común. Para ello, sobre el rango posible de resultados de cada descriptor, se establecieron intervalos (numéricos o cualitativos, según cada caso) y se asignó a cada intervalo un valor entre 1 y 5 (Tabla 3). Dado que no todos los descriptores tienen la misma importancia en la definición de la vulnerabilidad de una masa de agua, en la normalización de sus respectivos valores así como en el diseño de los algoritmos de cálculo (Tabla 4), ya se incluyeron las correspondientes ponderaciones. De esta forma se conseguía además, que cada uno de los cuatro bloques básicos, participara con un peso proporcional a su importancia relativa, en el cómputo global del IVMC (Figura 4). Con relación a los dos coeficientes correctores incluidos

en el IVMC, quedan definidos del siguiente modo:

- **Riesgo directo (Rd):** Va de 0 a 100 en función de si aguas arriba de la masa de agua objeto de estudio, hay ausencia o presencia de mejillón cebra. Sirve para corregir el hecho de que si una masa de agua es poco vulnerable, pero se encuentra conectada aguas abajo de otra donde hay mejillón cebra, su vulnerabilidad real es máxima (Tabla 4).
- **Variables excluyentes (Ve):** Varía entre 0 y 1. Comprende una serie de variables que, de acuerdo con las tolerancias actuales conocidas del mejillón cebra (Claudie y Mackie, 1994), imposibilitan la presencia de la especie en determinados intervalos de valores. Las variables excluyentes consideradas son la temperatura del agua, la concentración de calcio, el pH y la salinidad (Tabla 4).

ALGORITMO/CRITERIO DE CÁLCULO	OBSERVACIONES																													
$Tr = \frac{V}{F}$	F: flujo (m³/día) V: volumen (m³)																													
$Oa = \frac{C_{84} + C_{16} - 2 \times C_{50}}{C_{84} - C_{16}}$	C _{nn} : Cuartiles de la distribución de frecuencias acumuladas de la curva volumen-tiempo del embalse, en porcentaje, para un año normal.																													
Alternativamente “Oa” puede cuantificarse como el tanto por ciento que supone la variación media del nivel, en relación a la profundidad máxima de la columna de agua.																														
<u>Amplitud anual de la oscilación del nivel</u> Inferior al 8% de la profundidad máxima Entre el 8% y 16% de la profundidad máxima Entre el 17% y el 32% de la profundidad máxima Más del 32% de la profundidad máxima	<u>Interpretación</u> Baja Moderada Alta Muy Alta																													
$Rt = T_{\min} + \frac{(T_{\max} - T_{\min})}{2}$	T _{mín} : temperatura mínima anual T _{máx} : temperatura máxima anual																													
Et = 60-14,41 ln Ds (m) Et = 9,81 ln Chla (mg/m³) + 30,6 Et = 14,42 ln PT (mg/m³) + 4,14	Et: cálculo por cualquiera de las 3 expresiones. Ds: profundidad de visión Disco de Secchi Chla: concentración epilimnética de clorofila “a” PT: concentración epilimnética de fósforo total																													
Cc = 0,1091 CE ₂₀ ^{1,0678} (R² = 0,9911)	Cc: concentración de calcio (mg/l) CE ₂₀ : conductividad eléctrica en µS/cm a 20°C																													
Esta expresión es bastante precisa entre 6 mg Ca ⁺² /l (42 µS/cm) y 35 mg Ca ⁺² /l (222 µS/cm), Por debajo de 6 mg/l no hay posibilidad de que se desarrolle la especie y por encima de 35, deja de ser limitante. La relación entre [Ca ⁺²] y CE no es de aplicación en masas de agua donde Ca ⁺² no es el catión dominante.																														
$Zr = \frac{50 \times Z_{\max} \sqrt{\pi}}{\sqrt{Ao}}$	Z _{máx} : profundidad máxima Ao: superficie de lámina de agua a cota máxim.																													
$Dv = \frac{Z_{\text{med}}}{Z_{\max}}$	Z _{máx} : profundidad máxima Z _{med} : la profundidad media.																													
Rd = K(100-ΣBB ₁₋₄)	BB ₁₋₄ : Bloques básicos 1 a 4 K: coeficiente que va de 0 a 1																													
K = 1 cuando hay certeza de mejillón cebra en masas de agua río arriba de la estudiada. K = 0,8 cuando existe sospecha fundada de que puede haber la especie río arriba. K = 0,5 cuando hay indicios de la existencia de mejillón cebra río arriba. K = 0 cuando hay certeza de ausencia de la especie en masas de agua río arriba.																														
Ve = V _T (°C) x V _{Cc} (mg/l) x V _{pH20} x V _{Sal} (‰)	V _T : temperatura extrema (máxima o mínima) V _{Cc} : concentración de calcio (mg/l) V _{pH20} : pH a 20°C V _{Sal} : salinidad																													
<table><tr><td>Temperatura agua (mín-máx; °C)</td><td>Valor V_T</td></tr><tr><td>< -2 ó > 40</td><td>0</td></tr><tr><td>< 5 ó > 35</td><td>0,8</td></tr><tr><td>5 a 35</td><td>1,0</td></tr></table>	Temperatura agua (mín-máx; °C)	Valor V _T	< -2 ó > 40	0	< 5 ó > 35	0,8	5 a 35	1,0	<table><tr><td>Salinidad (‰)</td><td>Conductiv. eléctrica (µS/cm a 20°C)</td><td>Valor V_{Sal}</td></tr><tr><td>< 1,0</td><td>< 1560</td><td>1,0</td></tr><tr><td>1,1 a 2,0</td><td>1561 a 3125</td><td>0,8</td></tr><tr><td>2,1 a 4,0</td><td>3126 a 6250</td><td>0,4</td></tr><tr><td>4,1 a 6,0</td><td>6251 a 9375</td><td>0,2</td></tr><tr><td>6,1 a 8,0</td><td>9376 a 12500</td><td>0,1</td></tr><tr><td>> 8,0</td><td>> 12500</td><td>0</td></tr></table>	Salinidad (‰)	Conductiv. eléctrica (µS/cm a 20°C)	Valor V _{Sal}	< 1,0	< 1560	1,0	1,1 a 2,0	1561 a 3125	0,8	2,1 a 4,0	3126 a 6250	0,4	4,1 a 6,0	6251 a 9375	0,2	6,1 a 8,0	9376 a 12500	0,1	> 8,0	> 12500	0
Temperatura agua (mín-máx; °C)	Valor V _T																													
< -2 ó > 40	0																													
< 5 ó > 35	0,8																													
5 a 35	1,0																													
Salinidad (‰)	Conductiv. eléctrica (µS/cm a 20°C)	Valor V _{Sal}																												
< 1,0	< 1560	1,0																												
1,1 a 2,0	1561 a 3125	0,8																												
2,1 a 4,0	3126 a 6250	0,4																												
4,1 a 6,0	6251 a 9375	0,2																												
6,1 a 8,0	9376 a 12500	0,1																												
> 8,0	> 12500	0																												
<table><tr><td>Concentración calcio (mg/l)</td><td>Valor V_{Cc}</td></tr><tr><td>< 6</td><td>0</td></tr><tr><td>≥ 6</td><td>1,0</td></tr></table>	Concentración calcio (mg/l)	Valor V _{Cc}	< 6	0	≥ 6	1,0	<table><tr><td>pH (a 20°C)</td><td>Valor V_{pH20}</td></tr><tr><td>< 6,9</td><td>0</td></tr><tr><td>≥ 6,9</td><td>1,0</td></tr></table>	pH (a 20°C)	Valor V _{pH20}	< 6,9	0	≥ 6,9	1,0																	
Concentración calcio (mg/l)	Valor V _{Cc}																													
< 6	0																													
≥ 6	1,0																													
pH (a 20°C)	Valor V _{pH20}																													
< 6,9	0																													
≥ 6,9	1,0																													

Tabla 4. Algoritmos de cálculo utilizados para los descriptores y coeficientes que intervienen en el IVMC. Los acrónimos de los descriptores se corresponden con los de la Tabla 3, o en su defecto, con los que se indican en el texto

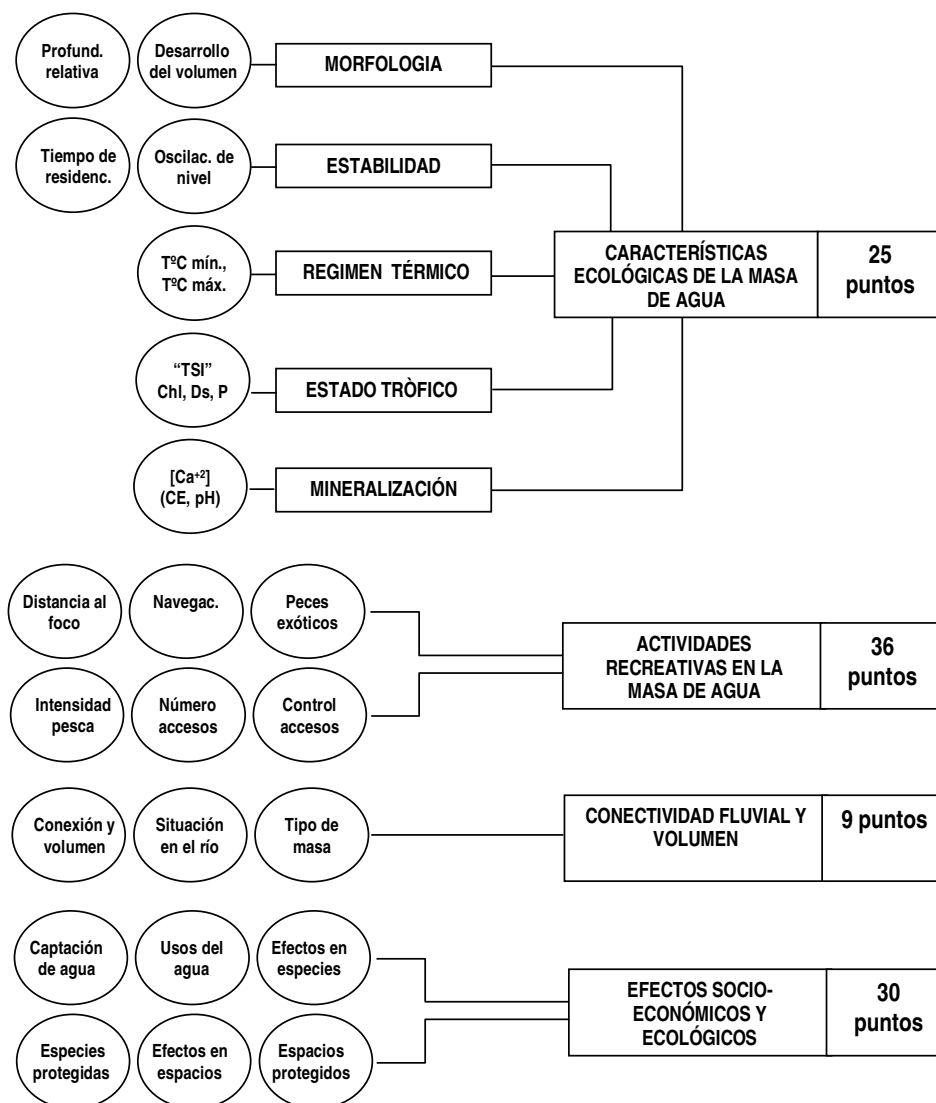


Figura 4. Estructura general de los 4 bloques básicos que conforman el IVMC, con indicación de los descriptores que incluyen y las puntuaciones con las que intervienen en el cálculo global del índice

Estos dos coeficientes (R_d , V_e), condicionan de forma definitiva el resultado final del índice.

Estructura y formulación del IVMC

El IVMC está constituido por el sumatorio de los cuatro bloques básicos de descriptores (BB_{1-4}) y los dos coeficientes correctores indicados (R_d , V_e). Su expresión de cálculo, muy simple, es la siguiente:

$$IVMC = (\sum BB_{1-4} + R_d) \cdot V_e$$

donde $\sum BB_{1-4}$ es el sumatorio de los valores alcanzados por cada uno de los 4 bloques básicos (Tabla 5), R_d es el factor de riesgo directo y V_e el coeficiente que valora las variables excluyentes (Tabla 4).

El IVMC varía entre 0 y 100 (máxima vulnerabilidad). La Tabla 6 muestra la escala de interpretación establecida.

El índice mide la vulnerabilidad de una masa de agua, bajo dos acepciones complementarias, una referida a la vulnerabilidad intrínseca derivada de las propias características de la masa de agua (bloques básicos 1, 2 y 3; hasta 70 puntos; Figura 4) y la otra referida al nivel de gravedad, socioeconómica y ecológica, que puede alcanzarse tras la confirmación de la presencia de la especie (bloque básico 4; hasta 30 puntos; Figura 4). Con independencia de la vulnerabilidad intrínseca, una masa de agua donde el mejillón cebra puede producir graves problemas, debe ser objeto de mayores atenciones preventivas y de control, equivalentes a las que puedan establecerse para una masa de agua vulnerable.

BLOQUES BÁSICOS	OBSERVACIONES
$BB1 = \frac{8 \times Tr}{Oa \times (Zr + Dv)} + Rt + Et + \frac{3}{5}Cc + \frac{2}{5}pH$	Este bloque está configurado por un cociente que mide la estabilidad de la columna de agua (Tr/Oa) y las características morfológicas de la cubeta (Zr, Dv), junto con un sumatorio de variables que recogen de forma adicional, los principales requerimientos limnológicos de la especie
$BB2 = \frac{(Ee \times Ip) + Nv \times \frac{Na}{Ca}}{Df}$	Se toma como foco geográfico de la especie en la cuenca, el sistema Mequinenza-Ribarroja-Flix. La situación más desfavorable se da cuantas más sean las actividades de riesgo de translocación que se realicen en una masa de agua (numerador) y menor sea la distancia hasta el foco geográfico. Es el bloque de más peso en el IVMC
$BB3 = \frac{Tm + Co}{Sx}$	Las masas de agua menos gestionables (lagos naturales y de gran volumen) y situadas a mayor altitud dentro de la red hidrográfica considerada, son las que alcanzan las mayores puntuaciones dentro del IVMC
$BB4 = (Tc \times Us) + (Ab \times Ae) + (Ep \times Tp)$	La valoración se realiza mediante un sumatorio de tres productos que actúan de forma similar, teniendo en cuenta la importancia y el tipo de los usos del agua, de los efectos sobre la biocenosis y sobre el valor de conservación de cada masa de agua

Tabla 5. Algoritmos de cálculo utilizados para los cuatro bloques básicos (BB 1 a 4), que conforman el IVMC. Los acrónimos de los descriptores se corresponden con los de la Tabla 3, o en su defecto, con los que se indican en el texto

INTERVALO DEL IVMC	VULNERABILIDAD	COLOR DE REFERENCIA
< 32	Nula o muy baja	Azul
32 a 36	Baja	Verde
37 a 45	Moderada	Amarillo
46 a 54	Alta	Naranja
> 54	Muy Alta	Rojo

Tabla 6. Escala general de interpretación del IVMC

RESULTADOS

Para conocer la capacidad y la sensibilidad del IVMC, se procedió a su aplicación sobre 89 masas de agua de la cuenca del Ebro, de diferentes características ecológicas, morfológicas, de gestión, de intensidad y presencia de actividades recreativas, con diferentes usos del agua y bajo distintos niveles de protección.

El IVMC identificó como muy vulnerables todas las masas de agua con presencia comprobada de mejillón cebra (embalses de Mequinenza, Riba-roja, Flix, Sobrón, Mezalocha, La Tranquera, Caspe y La Sotonera), junto con otros en los que se han encontrado larvas (Camarasa, San Lorenzo de Montgai) y otros más que de mo-

mento no se tiene constancia de presencia (San Bartolomé, El Grado, Ebro, Cueva Foradada y Utxesa). En sentido contrario, las masas de agua muy poco o nada vulnerables, quedaron también bastante bien identificadas, básicamente entorno a los lagos pirenaicos de Espot, Capdella, Vall d'Arán y Ordesa, de aguas frías y muy poco mineralizadas, junto con las aguas saladas de Gallocanta. La Tabla 7 recoge la distribución de la vulnerabilidad para las 89 masas de agua estudiadas.

La Figura 5 muestra la localización de las mismas 89 masas de agua, sobre el espacio definido por su vulnerabilidad intrínseca ($\sum BB_{1-3}$) y la gravedad potencial de los efectos de su eventual colonización (BB_4).

- H.A., J.W. Whitehouse, C.J.L. Ludyanskiy, M.L., D. McDonald y D. MacNeill (1993). Impact of the Zebra Mussel, a bivalve invader. *Bioscience*, 43 (8), 533–544.
- MacMahon, R.F. y Tsou, J.L., (1990). Impact of European Zebra Mussel infestation to the electric power industry. Annual Meeting of the American Power Conference, Chicago (USA), 10 pp.
- Margalef, R., (1977). *Ecología*. Editorial Omega, Barcelona, 951 pp.
- Minchin, D., Lucy, F. y Sullivan, M., (2005). Ireland: A new frontier for the zebra mussel *Dreissena polymorpha* (Pallas). *Oceanological and Hydrobiological Studies*, Vol. XXXIV (1), 19–30.
- Palau, A., Cia, I., Fargas, D., Bardina, M. y Massuti, S., (2004). Resultados preliminares sobre ecología básica y distribución del mejillón cebra en el embalse de Riba-roja (Río Ebro). Monografía de Endesa, Madrid, 43 pp.
- Palau, A. y Cia, I., (2006). Métodos de control y erradicación del mejillón cebra (*Dreissena polymorpha*). Monografía de Endesa, Madrid, 71 pp.
- Palau, A., (2007). Propuesta de un índice para determinar la vulnerabilidad de las masas de agua frente a la presión de colonización del mejillón cebra (*Dreissena polymorpha*). Aplicación a la Cuenca del Ebro, Convenio Universidad de Lleida-Confederación Hidrográfica del Ebro, Documento inédito, Lleida.
- Ruíz-Altaba, C., Jiménez, P.J., y López, M.A., (2001). El temido mejillón cebra empieza a invadir los ríos españoles desde el curso bajo del río Ebro. *Quercus*, 188, 50–51.
- Wetzel, R.G., (1981). *Limnología*. Ed. Omega, S.A. Barcelona, 679 pp.