

ZUBÍA

REVISTA DE CIENCIAS

MONOGRÁFICO

23

ier

Instituto de Estudios Riojanos

ZUBÍA. MONOGRÁFICO
REVISTA DE CIENCIAS,
Nº 23 (2011). Logroño (España).
P. 1-258, ISSN: 1131-5423



DIRECTORA

Purificación Ruiz Flaño

CONSEJO DE REDACCIÓN

Luis Español González

Rafael Francia Verde

Juana Hernández Hernández

Luis Miguel Medrano Moreno

Enrique Requeta Loza

Rafael Tomás Las Heras

CONSEJO CIENTÍFICO

José Antonio Arizaleta Urarte

(Instituto de Estudios Riojanos)

José Arnáez Vadillo

(Universidad de La Rioja)

Susana Caro Calatayud

(Fundación Patrimonio Paleontológico de Enciso)

Eduardo Fernández Garbayo

(Universidad de La Rioja)

Rosario García Gómez

(Universidad de La Rioja)

José M^a García Ruiz

(Instituto Pirenaico de Ecología-CSIC)

Javier Guallar Otazua

(Universidad de La Rioja)

Teodoro Lasanta Martínez

(Instituto Pirenaico de Ecología-CSIC)

Joaquín Lasierra Cirujeda

(Hospital San Pedro, Logroño)

Luis Lopo Carramiñana

(Dirección General de Medio Natural del Gobierno de La Rioja)

Fernando Martínez de Toda

(Universidad de La Rioja)

Juan Pablo Martínez Rica

(Instituto Pirenaico de Ecología-CSIC)

José Luis Nieto Amado

(Universidad de Zaragoza)

José Luis Peña Monné

(Universidad de Zaragoza)

Félix Pérez-Lorente

(Universidad de La Rioja)

Eduardo Viladés Juan

(Complejo Hospitalario San Millán-San Pedro de Logroño)

Carlos Zaldívar Ezquerro

(Dirección General de Medio Natural del Gobierno de La Rioja)

DIRECCIÓN Y ADMINISTRACIÓN

Instituto de Estudios Riojanos

C/ Portales, 2

26071 Logroño

publicaciones.ier@larioja.org

Suscripción anual España (1 número y monográfico): 15 €

Suscripción anual extranjero (1 número y monográfico): 20 €

Número suelto: 9 €

Número monográfico: 9 €

INSTITUTO DE ESTUDIOS RIOJANOS

ZUBIA

REVISTA DE CIENCIAS

Monográfico Núm. 23

EL CAMBIO GLOBAL: ESTUDIOS EN LA RIOJA

Coordinador

TEODORO LASANTA MARTÍNEZ



Gobierno de La Rioja
Instituto de Estudios Riojanos

LOGROÑO

2011

El cambio global: estudios en La Rioja/ coordinador, Teodoro Lasanta Martínez. – Logroño : Instituto de Estudios Riojanos, 2011
258 p. : gráf. ; 24 cm – (Zubía. Monográfico, ISSN 1131-5423; 23). – D.L. BI 428-1991
1. La Rioja-Clima. I. Lasanta Martínez, Teodoro. II. Instituto de Estudios Riojanos.
III. Serie
551.58(460.21)
556.5

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de esta publicación pueden reproducirse, registrarse ni transmitirse, por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, sea electrónico, mecánico, fotoquímico, magnético o electroóptico, por fotocopia, grabación o cualquier otro, sin permiso previo por escrito de los titulares del copyright.

© Logroño, 2011
Instituto de Estudios Riojanos
C/ Portales, 2
26001-Logroño, La Rioja (España)

© Diseño de cubierta e interior: ICE Comunicación

© Imagen de la cubierta: Revegetación en el Alto Oja.
(Fotografía de Teodoro Lasanta)

Imprime: INO Reproducciones, S.A.

ISSN 1131-5423
Depósito Legal BI-428-1991

Impreso en España - Printed in Spain

ÍNDICE

TEODORO LASANTA

El cambio global: estudios en La Rioja

Global change studies in La Rioja 7-16

ANA PÉREZ SANZ, PENÉLOPE GONZÁLEZ-SAMPÉRIZ, BLAS L. VALERO-GARCÉS, ANA MORENO, MARIO MORELLÓN, CARLOS SANCHO, ANCHEL BELMONTE, GRACIELA GIL-ROMERA, MIGUEL SEVILLA, ANA NAVAS

Clima y actividades humanas en la dinámica de la vegetación durante los últimos 2000 años en el Pirineo Central: el registro palinológico de la Basa de la Mora (Macizo de Cotiella)

Climatic and human activity in the vegetation dynamics of Central Pyrenees during the last 2000 years: the Basa de la Mora record (Cotiella Massif) 17-38

RAFAEL FERNÁNDEZ ALDANA

La presencia de robles entre los siglos XVIII y XX en el valle del Ebro (La Rioja)

Presence of deciduous oaks in the Ebro Valley (La Rioja) during XVIII,

XIX and XX centuries 39-54

TEODORO LASANTA, MARÍA PAZ ERREA ABAD, SERGIO M. VICENTE-SERRANO, JOSÉ ARNÁEZ

La diversidad de la cubierta vegetal en campos abandonados del Leza y Jubera

(Sistema Ibérico, La Rioja) a partir del SIOSE

Land cover diversity in abandoned fields in the Leza and Jubera valleys

(Iberian System, La Rioja) from SIOSE 55-78

FERNANDO PÉREZ-CABELLO

Actividad vegetal de las cuencas de los ríos Cidacos y Alhama (La Rioja):

análisis diacrónico mediante imágenes Landsat

Vegetation activity of the Cidacos and Alhama Rivers Basins (La Rioja):

diachronic analysis using Landsat imagery 79-102

JESÚS JULIO CAMARERO MARTÍNEZ

Dinámica post-incendio de la vegetación en un valle del Alto Najerilla

Post-fire vegetation dynamics in the High Najerilla Valley 103-124

JAVIER MARTÍNEZ-ABAIGAR, RAFAEL TOMÁS LAS HERAS, GABRIEL FABÓN, LAURA MONFORTE, ENCARNACIÓN NÚÑEZ-OLIVERA

Bioindicadores del cambio global: los briófitos ante la degradación de ozono

estratosférico y el aumento de radiación ultravioleta en la Biosfera

Global Change bioindicators; impacts of stratospheric ozone degradation and

increased ultraviolet radiation in bryophytes 125-162

**ENCARNACIÓN NÚÑEZ-OLIVERA, RAFAEL TOMÁS LAS HERAS,
MARÍA DE LOS ÁNGELES DEL CASTILLO, GABRIEL FABÓN, LAURA MONFORTE,
JAVIER MARTÍNEZ-ABAIGAR**

Radiación ultravioleta y fotosintética en dos observatorios de montaña

(Valdezcaray, La Rioja)

Ultraviolet and photosynthetic radiations in two mountain observatories

(Valdezcaray, La Rioja) 163-186

ALFREDO OLLERO OJEDA

Los cauces fluviales como indicadores de cambio global: propuesta metodológica

Rivers channels as geoindicators of global change: methodological approach 187-200

BELINDA GALLARDO, CECILIA ESPAÑOL

El mejillón cebra (*Dreissena polymorpha*, Pallas 1971) en La Rioja: situación actual
y evolución potencial

The zebra mussel (Dreissena polymorpha, Pallas 1971) in La Rioja (NE Spain):

current situation and potential evolution 201-220

RUBÉN ESTEBAN PÉREZ

Estudio de las medidas tomadas para la remediación del impacto medioambiental
en las cuevas visitables de Ortigosa de Cameros (Gruta de La Viña y Gruta
de La Paz), La Rioja

Study of the steps taken to the environmental remediation on the tourist caves of

Ortigosa de Cameros (Cave of La Viña and Cave of La Paz), La Rioja (Spain) 221-250

EL MEJILLÓN CEBRA (*DREISSENA POLYMORPHA*, PALLAS 1971) EN LA RIOJA: SITUACIÓN ACTUAL Y EVOLUCIÓN POTENCIAL

BELINDA GALLARDO¹

CECILIA ESPAÑOL²

RESUMEN

Las invasiones biológicas junto con el cambio climático son actualmente las principales causas de pérdida de biodiversidad en ecosistemas acuáticos. Una de las especies invasoras con mayor repercusión, tanto ecológica como económica, a nivel global es el mejillón cebra (*Dreissena polymorpha*), cuya presencia en La Rioja data en el año 2006. El presente estudio tiene por objeto: a) revisar el estado del mejillón cebra en La Rioja y b) desarrollar modelos predictivos basados en el nicho ecológico de la especie para evaluar la evolución potencial del mejillón cebra a corto plazo, y bajo cuatro escenarios futuros (2020A, 2020B, 2050A y 2050B). Los modelos de distribución de especies realizados señalaron la distancia a puertos, precipitación y temperatura anuales como los factores que mejor explican la distribución global de mejillón cebra. Dichos modelos señalan el corredor del Ebro como la zona de mayor riesgo de presencia de mejillón cebra en La Rioja, al cumplir con los dos factores principales que determinan el éxito de la invasión: la disponibilidad de propágulos y la idoneidad climática. En concreto, las zonas alrededor de Haro al noroeste y entre Calahorra y Alfaro al sureste se encuentran en alto riesgo según los modelos realizados, y deberían, por tanto, estar controladas para detectar la aparición temprana del bivalvo. Los escenarios de futuro muestran una disminución de la probabilidad de invasión en el corredor del Ebro y un aumento en las zonas más elevadas de la CCAA, lo que podría estar relacionado con el aumento generalizado de temperaturas. En este sentido, La Rioja se encuentra en el límite de la distribución potencial de la especie; pequeñas variaciones en la temperatura y precipitación podrían tener una gran repercusión en su distribución. Concluimos que, dada la aparición de un número creciente de especies invasoras en la cuenca del río Ebro, estudios como

1. Grupo de Ecología Acuática, Depto. Zoología, Universidad de Cambridge. Downing St. CB2 3EJ. Cambridge, Reino Unido. bg306@cam.ac.uk / galla82@hotmail.com

2. Instituto de Medio Ambiente. Universidad San Jorge. Zaragoza, España. cespanol@usj.es

el presente son fundamentales para el desarrollo de una base científica sólida sobre la que trazar planes de gestión y conservación de especies que sean eficaces y sostenibles a largo plazo.

Palabras clave: Modelos de distribución de especies, río Ebro, escenarios climáticos, hipótesis de liberación del enemigo, Biomod.

Biological invasions along with climate change are acknowledged as two of the main threats to aquatic biodiversity worldwide. One of the worst aquatic invasive species, both in ecological and economical terms, is the zebra mussel (Dreissena polymorpha) present in La Rioja since 2006. Thus, this study aims to: a) evaluate the present distribution of the zebra mussel in La Rioja and b) develop species distribution models based on the ecological niche of the species to evaluate its potential expansion in the short-term and under four scenarios: 2020A, 2020B, 2050A and 2050B. As a result, the models highlighted distance to reservoirs, annual temperature and precipitation as the main factors that explain the worldwide distribution of the species. In La Rioja, the models showed a higher risk of invasion along the Ebro corridor, which meets the two main requirements of invasion: availability of propagules and habitat suitability. More particularly, areas around Haro at the northwest, and between Calaborra and Alfaro at the south-east, should be included in “watch-list” for the early detection of the species. On the other hand, future scenarios show a decrease in the climate suitability of the Ebro corridor and an increase at higher altitudes, which might be related to the general increase of temperatures. In this sense, La Rioja is at the extreme of the potential distribution of the zebra mussel in Europe, and therefore slight changes in temperature and rainfall can have dramatic effects on its distribution. We conclude that, considering the increasing arrival of invasive species to the Ebro catchment, studies exploring the macroecological bases of invasion are key to inform the management and prevention of invasive species at long-term.

Key words: Species distribution models, Ebro River, climatic scenarios, enemy release hypothesis, Biomod.

1. INTRODUCCIÓN

Las invasiones biológicas junto con el cambio climático son consideradas actualmente como las principales causas de pérdida de biodiversidad en ecosistemas acuáticos (Sala *et al.*, 2000). A pesar de que ambos factores han sido objeto de numerosos estudios en los últimos años, sus impactos de forma combinada son poco conocidos; probablemente por la incertidumbre inherente a las predicciones climáticas disponibles y el desconocimiento generalizado de hasta qué punto las distintas especies, tanto nativas como invasoras, serán capaces de adaptarse (Walther *et al.*, 2009). La falta de estudios explícitos que tengan en cuenta la interacción entre estos dos grandes motores de cambio: el calentamiento global y las invasiones biológicas, dificulta

por tanto el desarrollo de una base científica sólida sobre la que trazar planes de gestión y conservación de especies que sean eficaces y sostenibles a largo plazo (Bradley, 2010).

El mejillón cebra es un bivalvo propio de aguas dulces y salobres, procedente de los mares Negro y Caspio, de donde también proceden otras especies invasoras, como el gobio dorado (*Proterorhinus marmoratus*), la gamba asesina (*Dikerogammarus villosus*) o la mística roja (*Hemimysis anomala*). La expansión del mejillón cebra por Europa comenzó en el siglo XVIII con la construcción de canales fluviales entre los grandes ríos centro-europeos: Danubio, Don y Rin, en lo que se conoce como la “autopista” central de las especies invasoras en Europa (Leuven *et al.*, 2009). Actualmente el mejillón cebra está presente en unos 25 países: desde Suecia en el Norte, a España en el Sur, Irlanda al Oeste y Rusia al Este; tendiendo a extenderse hacia el sur de Europa. El mejillón cebra es considerado como una de las especies de mayor impacto ecológico y económico en todo el mundo, e indudablemente la de mayor impacto en ecosistemas acuáticos (Karatayev *et al.*, 2003). Una vez introducido, las poblaciones de mejillón cebra crecen rápidamente, alcanzando una biomasa hasta 10 veces superior a la del resto de organismos bentónicos (Karatayev *et al.*, 1998). Un solo individuo es capaz de filtrar 2 litros de agua al día, provocando cambios en la comunidad de fitoplancton y, por tanto, en la disponibilidad de alimento para otros organismos (Burlakova *et al.*, 2005). El mejillón cebra es una especie muy competitiva, eliminando otras especies de bivalvos autóctonas entre las que cabe destacar la náyade auriculada (*Margaritifera margaritifera*), actualmente en peligro de extinción. En términos económicos, esta especie puede tener efectos devastadores en todo tipo de infraestructuras como depuradoras, presas, potabilizadoras, instalaciones de enfriamiento, así como en la red de riego. Por ejemplo, el coste del mejillón cebra en Reino Unido está estimado en unos 4 millones de libras anuales (Oreska y Aldridge, 2011), mientras que en Estados Unidos esta cifra asciende a los 18 millones de dólares anuales (Connelly *et al.*, 2007). En España, un estudio de la Confederación Hidrográfica del Ebro (www.chebro.es) revela que en la cuenca del río Ebro el mejillón cebra ya ha provocado daños valorados en más de 18 millones de euros desde su aparición, aumentando exponencialmente desde unos 20.000 € en 2001 a 4 millones de euros en 2009.

El mejillón cebra apareció en España relativamente tarde, gracias a la barrera geográfica que impone los Pirineos (Rajagopal *et al.*, 2009). En 2001 fue localizado en el Bajo Ebro (desde Xerta hasta el embalse de Ribarroja) y desde entonces ha invadido rápidamente gran parte de la cuenca fluvial (Ruiz-Altaba *et al.*, 2001). También ha sido detectado en otras cuencas fluviales como la del Júcar en 2005, si bien de forma localizada. En el tramo riojano, la primera evidencia de esta especie se tuvo en septiembre del 2006, con la aparición de una treintena de ejemplares en dos prospecciones en Fuenmayor y San Vicente de la Sonsierra (Fig. 1). Expertos en medio ambiente afirman que en el tramo riojano las potentes fluctuaciones de agua en el río y los embalses de La Rioja provocan que los ejemplares adultos queden varios días

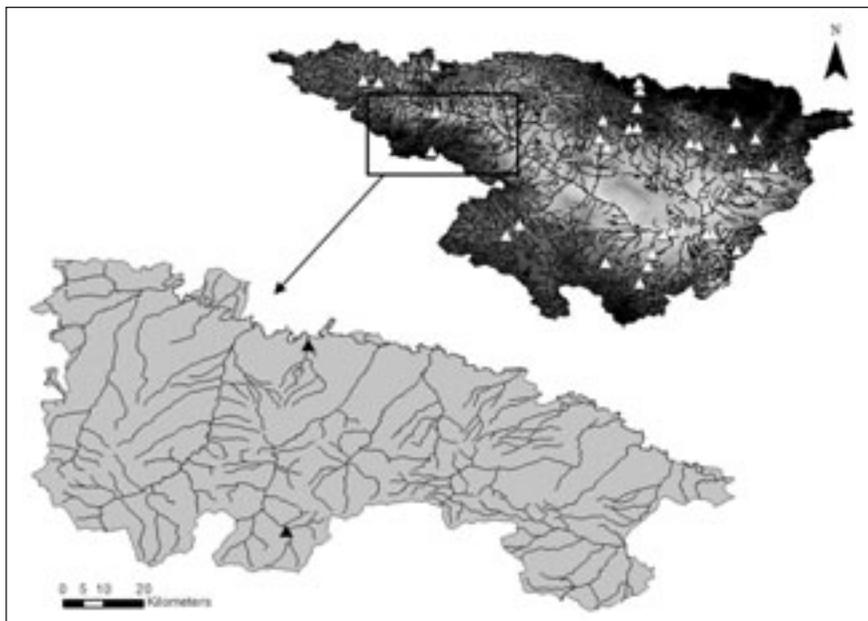


Fig. 1. Presencia del mejillón cebra (*Dreissena polymorpha*) en la cuenca del río Ebro y en la Comunidad Autónoma de La Rioja. Los triángulos representan los lugares de presencia confirmada de mejillón cebra a fecha de Agosto de 2011.

sin agua y acaben por morir, lo que parece haber frenado en parte la expansión de esta especie. A pesar de que existen estudios que relacionan efectivamente las fluctuaciones de agua con la supervivencia del mejillón cebra (Navarro *et al.*, 2006), esta afirmación todavía no ha sido probada de forma empírica para la región de La Rioja.

Ante un escenario de cambio climático, los estudios experimentales realizados hasta el momento sugieren un aumento en la abundancia del mejillón cebra y prolongamiento de los periodos de reproducción en primavera y otoño (Griebeler y Seitz, 2007), además de un mayor crecimiento en otoño (Thorp *et al.*, 1998), lo que podría suponer un mayor riesgo de expansión de la especie en la cuenca del Ebro. Por otro lado, la Península Ibérica se encuentra en el límite sur de la distribución potencial del mejillón cebra, por lo que un incremento en la temperatura y condiciones de sequía en el Ebro podría perjudicar a esta especie. Un aumento o disminución de la vulnerabilidad de la especie debido al cambio climático tendría enormes repercusiones sobre la eficiencia de programas de erradicación de la especie. Comprender los cambios en la idoneidad climática de la cuenca del Ebro para el establecimiento del mejillón cebra puede ser, por tanto, un apoyo fundamental para el efectivo control y erradicación de esta especie.

En EEUU y Europa se han realizado en las últimas décadas innumerables trabajos científicos sobre la biología y ecología del mejillón cebra (Stra-

yer, 2009). Sin embargo, en España apenas se han publicado trabajos al respecto, ya que hasta ahora no se había constatado su presencia de forma continua. Por este motivo, el presente estudio tiene como objeto presentar una revisión del estado del mejillón cebrá en la cuenca del Ebro y desarrollar modelos predictivos para ver su evolución potencial en el futuro, con especial atención a la Comunidad Autónoma de La Rioja. Para ello, se utilizará el nicho ecológico de la especie, entendido en este caso como el conjunto de condiciones ambientales en las que la especie es capaz de sobrevivir. Una vez definido dicho nicho ecológico, se utilizarán modelos de distribución de especies para calcular la idoneidad climática de la cuenca del Ebro en la actualidad, y en diversos escenarios futuros (2020 y 2050). Los modelos de distribución de especies son modelos estadísticos que relacionan la presencia de una especie con las condiciones ambientales donde se encuentra presente. Dichos modelos son utilizados posteriormente para localizar las áreas geográficas que cumplen las mismas condiciones climáticas y que por tanto tienen un mayor riesgo de invasión. Este tipo de modelos ha sido utilizado con éxito para predecir la expansión del mejillón cebrá en Estados Unidos (Drake y Bossenbroek, 2004). A pesar de que la distribución del mejillón cebrá a escala local depende de otros factores (como la velocidad de corriente, profundidad, sustrato o concentración de nutrientes), este estudio supone una primera aproximación a los efectos potenciales que un incremento de la temperatura puede tener sobre la especie, y ofrece un rango de escenarios con los que anticiparse a los cambios climáticos y biológicos del futuro.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Obtención de datos

Los datos de presencia de la especie en Europa y Estados Unidos se obtuvieron en los portales de la Infraestructura Mundial de Información en Biodiversidad (www.gbif.org) y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (www.usgs.com), respectivamente (N=6314). La información relativa a 6 variables bioclimáticas se obtuvo del portal de datos climáticos del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (www.worldclim.org). Dichas variables, que representan medias para el periodo 1950-2000, incluyeron: temperatura media anual, temperatura máxima del mes más cálido, temperatura mínima del mes más frío, precipitación anual, precipitación del mes más húmedo y precipitación del mes más seco. Todos los mapas fueron reescalados a una resolución de 30 segundos (1 km² aproximadamente) y con la misma proyección geográfica (WGS1984).

A continuación se extrajo la información climática correspondiente a los puntos donde está confirmada la presencia de mejillón cebrá en todo el mundo, y la información de la cuenca del Ebro. Ambos conjuntos de datos se compararon por medio de histogramas de frecuencias, en los que se representa la frecuencia con la que el mejillón cebrá aparece en un determinado rango de temperatura o precipitación en el mundo, y la frecuencia de dicho rango en la cuenca del Ebro.

Para evaluar la respuesta del mejillón cebra al cambio climático, se obtuvieron diversos escenarios del Centro Internacional de Agricultura Tropical (www.ctia.org). De entre los múltiples escenarios disponibles, se seleccionaron los siguientes: 2020A, 2020B, 2050A y 2050B. Según el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (www.ipcc.ch), los escenarios de tipo A suponen un futuro caracterizado por un rápido crecimiento económico y poblacional (9.000 millones de habitantes en 2050) y por el rápido desarrollo de nuevas tecnologías. Por el contrario, los escenarios de la familia B suponen un futuro más comprometido con el medio ambiente, con un gradual incremento de la población aunque menor que en el escenario A, niveles intermedios de crecimiento económico, menor cambio en las tecnologías y un énfasis en la resolución local de los problemas económicos, sociales y medioambientales. Estas dos familias cubren dos extremos potenciales en las predicciones climáticas, ayudando a reducir la incertidumbre inherente a cualquier modelo climático de futuro. Los valores medios para las 6 variables climáticas seleccionadas en este estudio pueden consultarse en la Tabla 1.

TABLA 1.
Datos climáticos medios de la cuenca del Ebro

	Temp. media	Temp. Max.	Temp. Min.	PP anual	PP Max.	PP Min.
Actualidad	11.17	25.82	-0.47	655.40	77.94	34.44
	<i>2.77</i>	<i>3.34</i>	<i>2.31</i>	<i>243.41</i>	<i>22.88</i>	<i>16.94</i>
2020A	12.58	28.85	0.14	628.92	80.49	27.18
	<i>2.75</i>	<i>3.32</i>	<i>2.29</i>	<i>233.00</i>	<i>24.63</i>	<i>15.46</i>
2020B	12.41	28.04	0.42	611.79	74.54	28.96
	<i>2.75</i>	<i>3.32</i>	<i>2.33</i>	<i>241.31</i>	<i>26.76</i>	<i>14.37</i>
2050A	13.58	31.59	0.91	608.09	82.23	24.73
	<i>2.87</i>	<i>3.68</i>	<i>2.23</i>	<i>232.56</i>	<i>34.14</i>	<i>12.51</i>
2050B	13.14	29.90	0.61	618.58	84.53	25.17
	<i>2.74</i>	<i>3.31</i>	<i>2.24</i>	<i>235.45</i>	<i>27.83</i>	<i>13.12</i>

Datos para las condiciones actuales y para los cuatro escenarios de futuro extraídos de www.worldclim.org. Debajo de cada valor medio se presenta la desviación estándar en cursiva. Temp= Temperatura. PP= precipitación.

Adicionalmente, la introducción del mejillón cebra se relaciona habitualmente con la distancia a puertos fluviales, embalses y, en general, con un nivel elevado de degradación medioambiental (Carlton, 1993). A menudo el mejillón cebra viaja en los tanques de agua de lastre de grandes barcos cargueros. Cuando los barcos liberan esta agua de lastre en las cercanías de un puerto, el mejillón cebra es capaz de colonizar primero el estuario de un río y poco a poco ir remontando su cuenca. En cuanto a los embalses, la introducción accidental de mejillón cebra en lagos y embalses de pesca deportiva es uno de los vectores más habituales de esta especie, y posiblemente

la manera en que el mejillón cebra llegó a España. Las larvas de mejillón, prácticamente invisibles, quedan adheridas a todo tipo de materiales que entren en contacto con agua contaminada (botas, barcos, material de pesca), siendo capaces de resistir la desecación durante semanas. Finalmente, el nivel de degradación medioambiental se ha relacionado habitualmente con la introducción de especies invasoras, que aprovechan la disponibilidad de nichos ecológicos y la escasa competencia en ambientes degradados. Teniendo en cuenta la importancia de estos tres grandes vectores (puertos, embalses y degradación ambiental), se realizó un modelo de distribución de especies adicional utilizando como predictores la distancia al puerto más cercano, distancia al embalse más cercano, y grado de influencia antrópica. Los datos relativos a la localización de puertos comerciales y embalses se obtuvieron en los portales de la Asociación Americana de Puertos (www.aapa-ports.org) y la base de datos global de presas y embalses (www.gwsp.org). El programa ArcView de tratamiento de imágenes se utilizó para crear un mapa de distancias euclídeas a los principales puertos y/o embalses. El último factor, grado de influencia antrópica, resulta de la combinación de distintos elementos (densidad de población, uso del suelo y distancia a carreteras, líneas de ferrocarril y ríos navegables) y refleja la intensidad de uso antrópico (más información acerca de la generación de esta variable en www.sedac.ciesin.org). A pesar de no poder realizar escenarios de futuro para este modelo antrópico, dado que no existen predicciones para 2020 o 2050 de los factores utilizados, se ha estimado relevante para comprender la evolución potencial de la especie en la Comunidad Autónoma de La Rioja.

2.2. Modelos de distribución de especies

En este estudio se han realizados dos modelos de distribución del mejillón cebra: modelo climático y modelo antrópico. Ambos modelos están basados en las condiciones (climáticas y antrópicas) de aquellos lugares donde el mejillón está presente en todo el mundo (N= 6314) y después se han proyectado en la cuenca del Ebro. Adicionalmente, se utilizó el modelo climático para realizar una serie de predicciones de futuro basadas en los escenarios anteriormente descritos. Se presentan por tanto un total de 6 proyecciones: 2 actuales (climático y antrópico), y 4 futuras (correspondientes a 2020A, 2020B, 2050A y 2050B).

Una de las dificultades del uso de modelos de distribución de especies es el elevado número de técnicas disponibles, sin una idea clara de qué modelo es más adecuado según las necesidades del estudio a realizar (Elith *et al.*, 2006). Los distintos modelos disponibles pueden además ofrecer resultados discrepantes, siendo muy difícil decidir cuál es el modelo correcto. El grado de incertidumbre en cuanto a la selección de modelos es mayor aun cuando se trabaja con escenarios de futuro, dado que no podemos utilizar la distribución actual de la especie como referencia (Peterson, 2003). Una solución a este problema es el uso de modelos combinados, denominados en inglés “ensemble models”, que resuman todas las posibilidades en cuanto a tipo de modelo y proyección (Araujo y New, 2007).

Para realizar los modelos de distribución de especies se utilizó la extensión Biomod (Thuiller *et al.*, 2009) del programa estadístico de libre distribución R versión 2.13.1 (R Development Core Team, 2007). Esta extensión permite realizar modelos bioclimáticos utilizando varios algoritmos, selección aleatoria de pseudo-ausencias, y múltiples evaluaciones cruzadas. Para este estudio se realizaron cinco modelos utilizando los siguientes algoritmos: GAM (Generalized Additive Models), GBM (Generalized Boosted Models), CTA (Classification Tree Analysis), ANN (Artificial Neuron Networks) y RF (Random Forest). Para testar los modelos se utilizaron 6000 pseudo-ausencias extraídas de forma aleatoria. Así mismo, los datos de presencia de la especie se dividieron de forma aleatoria en 70% para calibrar el modelo y 30% para testarlo. Estos dos procesos (pseudo-ausencias y división de los datos de presencia) se repitieron 3 veces por algoritmo para asegurar la robustez del modelo, dando como resultado un total de 60 modelos, de entre los que el programa selecciona aquel que obtiene mejores valores en los test de precisión (TSS, Kappa y ROC). Una vez calibrado el modelo, éste se utiliza para realizar proyecciones a una escala espacio-temporal diferente. En el caso del presente estudio, se realizaron proyecciones en la Comunidad Autónoma de La Rioja para el escenario de actualidad y para los cuatro escenarios de futuro descritos anteriormente. Finalmente, se obtuvieron mapas de idoneidad climática y antrópica que muestran en una escala 0-100% la correspondencia climática o antrópica entre un punto y el rango habitual o nicho ecológico de la especie.

3. RESULTADOS

El rango de condiciones climáticas en las que habita el mejillón cebrá y las condiciones de la cuenca del Ebro son notablemente diferentes (Fig. 2). Por ejemplo, la temperatura media anual de los lugares donde está presente esta especie es de unos 9-10°C, mientras que la de la cuenca del Ebro ronda los 13-14°C. Así mismo observamos que esta especie tiende a ocupar ambientes con menores temperaturas mensuales tanto máximas como mínimas. Los rangos de precipitación también difieren siendo la cuenca del Ebro mucho más árida que los lugares invadidos por el mejillón cebrá en otras partes del mundo. La cuenca del Ebro se encuentra, por tanto, en los límites del rango de distribución global de la especie.

Los modelos tanto climático como antrópico realizados mostraron niveles de precisión estadística elevados (AUC = 0.93 y 0.88 respectivamente, Tabla 2). El ratio de presencias y ausencias correctamente clasificado fue alto (> 90%), por lo que podemos considerar que la calibración del modelo es adecuada para realizar proyecciones con un grado de incertidumbre aceptable. De entre los algoritmos testados (GAM, GBM, CTA, ANN y RF) el último, "Random Forest", es el que produjo mejores resultados desde un punto de vista estadístico. No obstante, y dado que todos los modelos obtuvieron puntuaciones elevadas, se ha optado por construir un modelo consenso o "ensemble model" resultado de la combinación de los 5 algoritmos. En cuanto a las variables utilizadas, precipitación y temperatura media anuales fueron los factores con mayor peso en el modelo.

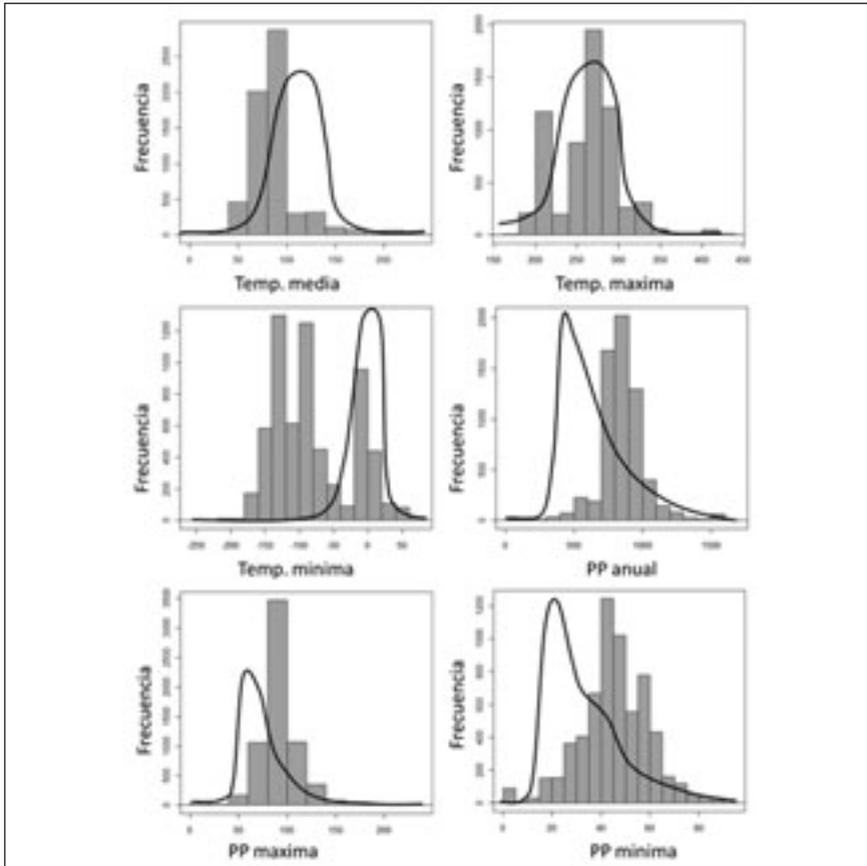


Fig. 2. Relación entre las condiciones climáticas donde habita el mejillón cebra en todo el mundo (barras grises) y las condiciones climáticas de la cuenca del Ebro (línea continua negra).

TABLA 2.

Resultados estadísticos de los modelos de distribución de especies

I. Modelo Antrópico (AUC)		II. Modelo Climático (AUC)	
	0.88		0.93
- Distancia a puertos	0.85	- Temperatura media anual	0.30
- Distancia a embalses	0.09	- Max. Temperatura mes más cálido	0.06
- Influencia antrópica	0.06	- Min. Temperatura mes más frío	0.21
		- Precipitación anual	0.34
		- Precipitación mes más húmedo	0.21
		- Precipitación mes más seco	0.18
		- Altitud	0.12

Los modelos relacionan la presencia del mejillón cebra en todo el mundo con las condiciones climáticas y antrópicas de dichos lugares (N=6314). AUC= Area Under de ROC curve, indica la calidad del modelo de 0=baja a 1=excelente. Para cada modelo se presenta la importancia de cada variable en el modelo de 0 a 1.

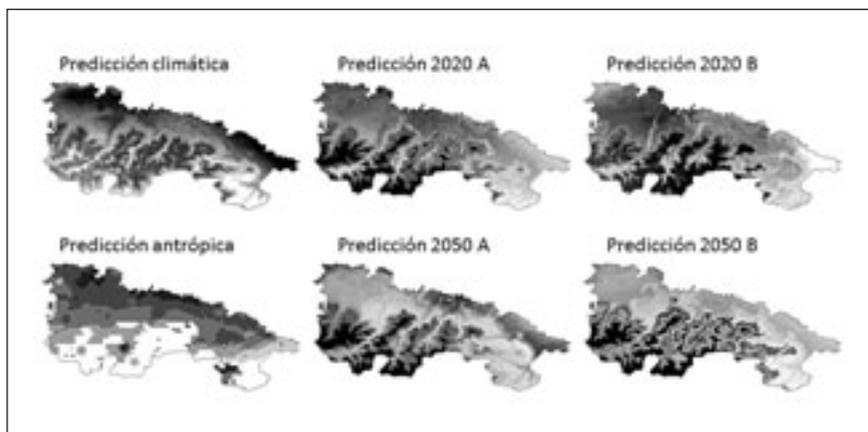


Fig. 3. Predicción de los modelos antrópico y climático en la Comunidad Autónoma de La Rioja en condiciones actuales. Predicciones del modelo climático en cuatro escenarios de futuro. Tonos de gris más oscuro indican una mayor idoneidad antrópica o climática para el establecimiento del mejillón cebra.

Una vez calibrado con los datos referentes a la especie a escala global, el modelo es utilizado para realizar diversas proyecciones a escala de la Comunidad Autónoma de La Rioja (Fig. 3). En el escenario correspondiente a las condiciones climáticas actuales, la probabilidad de presencia del mejillón en La Rioja es elevada en las zonas directamente adyacentes al cauce fluvial del Ebro, sobre todo al norte y sur de la Comunidad. El mapa de predicción antrópica concuerda con el climático en señalar el corredor del Ebro como la zona de mayor riesgo. La distancia a puerto y el grado de degradación antrópica fueron identificados en este caso como los mejores predictores de la presencia del mejillón cebra. Lo que quiere decir que el riesgo de invasión disminuye aguas arriba, hacia el norte de la Comunidad Autónoma, y también a medida que nos alejamos de las zonas bajas del valle, donde el nivel de degradación medioambiental es menor.

Según los escenarios correspondientes a 2020, la idoneidad climática del corredor del Ebro para el mejillón cebra disminuye notablemente, aumentando sin embargo en las partes elevadas de la Comunidad (Fig. 3). En el valle del Ebro, las predicciones climáticas sugieren un aumento en la temperatura media y disminución de la precipitación anual (Tabla 1), mientras que en las partes altas del valle los cambios serán menos acusados. Los escenarios para el 2050 concuerdan con los anteriores en cuanto se aprecia una mayor disminución de probabilidades en el corredor del Ebro y un aumento en las partes altas del valle (Fig. 3).

4. DISCUSIÓN

El mejillón cebra se encuentra en la actualidad en dos localizaciones en La Rioja (Fig. 1); sin embargo, los modelos bioclimáticos realizados sugieren que el corredor del Ebro en la Comunidad cuenta con unas condiciones tanto climáticas como antrópicas adecuadas para el establecimiento de esta especie (Fig. 3). La expansión potencial del mejillón cebra en la cuenca del Ebro, y más concretamente en la Comunidad de La Rioja, depende de dos factores principales: la introducción de organismos y la idoneidad de hábitat. En el presente artículo se muestran dos modelos (antrópico y climático) que vienen a reflejar estos dos factores respectivamente. Adicionalmente se presentan predicciones de futuro para el modelo climático de acuerdo a cuatro escenarios: 2020 y 2050, divididos en A (crecimiento continuado de las emisiones de gases de efecto invernadero) y B (crecimiento contenido de las emisiones).

4.1. El mejillón cebra en La Rioja: predicciones a corto plazo

Los modelos de distribución antrópico y climático, calibrados y proyectados para condiciones actuales, representan el hábitat disponible actualmente para la especie y que por tanto pueden estar en riesgo inminente de ser invadidos. Es decir, las zonas que presentan una mayor idoneidad antrópica y climática para la especie presentan una mayor probabilidad de introducción de organismos en un ambiente a priori adecuado para su establecimiento, por tanto estas zonas pueden ser consideradas como de alto riesgo a corto plazo.

El modelo antrópico está basado en el grado de influencia humana, la distancia a puertos y embalses. Tres elementos estrechamente relacionados con la introducción de especies invasoras acuáticas (Gherardi, 2007). De hecho, las especies acuáticas como el mejillón cebra cuentan con una mayor capacidad de dispersión que las especies terrestres, lo que constituye una de las claves de su éxito según Gherardi (2007). En el caso del mejillón cebra, su dispersión natural es fundamentalmente de tipo pasiva, por arrastre de la corriente de agua o adherido al cuerpo de otros animales como pájaros y pequeños mamíferos (Carlton, 1993; Karatayev *et al.*, 2003). Sin embargo, el hombre es indudablemente un vector de transmisión mucho más efectivo para esta especie, cuyas larvas prácticamente invisibles quedan adheridas a embarcaciones, material de pesca, botas, motores y en general cualquier equipamiento que haya estado en contacto con agua contaminada (Carlton, 1993). Las larvas de mejillón cebra son además extremadamente resistentes, siendo capaces de soportar la desecación fuera del agua durante periodos de tiempo prolongados, hasta que son introducidas de nuevo al agua (Ricciardi *et al.*, 1995). Por ese motivo, la disponibilidad de propágulos será elevada en aquellos lugares que presenten un mayor uso pesquero o recreativo. El modelo antrópico realizado viene a representar la probabilidad de introducción de propágulos, dado que a mayor uso humano, cercanía a puertos o embalses, mayor será la probabilidad de introducción de esta especie. Dicho modelo identificó la distancia a puertos como la variable de mayor influencia

(contribución del 85% al modelo antrópico, Tabla 2), muy por delante del nivel de degradación (influencia humana) y la distancia a embalses. De acuerdo con este modelo, la descarga de agua de lastre por parte de cargueros en las inmediaciones de puertos comerciales es reconocida como uno de los vectores de introducción de mejillón más importantes (Carlton, 1993).

Las variables de mayor importancia en el modelo climático fueron precipitación anual, temperatura media anual y temperatura en el mes más frío (Tabla 2), las cuales han sido identificadas con anterioridad como fundamentales para la reproducción y crecimiento del mejillón cebra (Spidle *et al.*, 1995; Griebeler y Seitz, 2007). En cuanto a la idoneidad del hábitat, el mejillón cebra es tolerante a un amplio rango de condiciones ambientales (hasta 10‰ de salinidad y temperaturas de -10 a 35 °C) lo que contribuye de nuevo a su gran éxito invasor (Spidle *et al.*, 1995). No obstante, cuanto más se asemejen las condiciones del ecosistema receptor al ecosistema nativo del mejillón cebra, más rápidamente será éste capaz de adaptarse y proliferar. En definitiva, siempre que exista la disponibilidad de propágulos y las condiciones ambientales sean favorables, el riesgo de invasión del mejillón cebra en La Rioja a corto plazo es elevado. El corredor del río Ebro es la zona que cumple ambos requisitos, sobre todo en la zona más al noroeste (alrededor de Haro) y sureste de la Comunidad Autónoma (entre Calahorra y Alfaro). Estas zonas deberían por tanto estar controladas para detectar la aparición del bivalvo lo antes posible.

4.2. El mejillón cebra en La Rioja: predicciones de futuro

Por otro lado, los escenarios de futuro analizados sugieren un panorama bien distinto. La idoneidad climática de La Rioja para el mejillón cebra disminuye notablemente, sobre todo en los escenarios de tipo A, mientras que en los de tipo B se aprecia todavía un riesgo de invasión moderado en las cuencas altas. En general los escenarios de futuro predicen un aumento generalizado de las temperaturas media, máxima y mínima (Tabla 1). Es de destacar el aumento de las temperaturas máximas, de hasta 3°C en 2020 y 5°C de aquí a 2050. Por el contrario, la precipitación anual disminuye notablemente, hasta 50 mm anuales y podría alcanzar un mínimo de 12 mm mensuales (Tabla 1). Sin embargo, la precipitación máxima mensual aumenta, por lo que es de esperar una mayor incidencia de periodos extremos tanto de fuertes lluvias como sequías. Dichos cambios son siempre más acusados en los escenarios de tipo A que en los de tipo B. Dado que la idoneidad climática para el mejillón cebra de los escenarios de tipo A es notablemente menor que la de los escenarios de tipo B, podemos concluir que los cambios climáticos descritos perjudican a esta especie. De hecho, se ha constatado que el rango de temperaturas medias de la cuenca del Ebro es superior al rango de aquellos lugares en los que el mejillón está presente en el resto del mundo (Fig. 2). Así mismo, los niveles de precipitación media, mínima y máxima en la cuenca del Ebro son inferiores a los rangos de distribución globales del mejillón cebra (Fig. 2). Esto quiere decir que el mejillón cebra se encuentra en la cuenca del Ebro en el límite de su distribución potencial, bajo condiciones climáti-

cas que no son las idóneas. Pequeños cambios de temperatura y precipitación podrían tener por tanto un efecto significativo en la supervivencia de la especie. De hecho, otros autores han predicho una migración de la especie hacia el norte de Europa como consecuencia del cambio climático; aumentando su distribución potencial en países como Noruega, Suecia o Dinamarca, y disminuyendo en España, Grecia o Italia (Gallardo, 2010). No obstante, serían necesarios más estudios de tolerancia en laboratorio para soportar esta afirmación. Además del efecto puramente fisiológico que un aumento de la temperatura puede tener en la especie, es de esperar que sean cambios en la disponibilidad de hábitat y alimento los que más perjudiquen al establecimiento del mejillón cebra en La Rioja.

En este sentido, numerosos autores han sugerido que el cambio climático podría beneficiar a especies invasoras, las cuales toleran habitualmente rangos de temperatura y precipitación más amplios que las especies nativas (Dukes y Mooney, 1999; Walther *et al.*, 2009). No obstante, son pocos los modelos que han obtenido un aumento en la distribución de especies invasoras en escenarios de futuro. Esto se debe simplemente a que se proyectan las preferencias climáticas de la especie correspondientes a la actualidad en escenarios de futuro fuera del rango de calibración, lo que lleva inevitablemente a una subestimación de la distribución potencial de la especie (Williams y Jackson, 2007). En otras palabras, los escenarios climáticos consideran condiciones climáticas nuevas, que no existen hoy en día, y por tanto no están contempladas en el rango de calibración del modelo. Además, las especies invasoras como el mejillón cebra han demostrado una extraordinaria capacidad de adaptación a nuevas condiciones ambientales en el pasado, y nada indica que no puedan adaptarse de igual forma a los futuros cambios climáticos predichos por los expertos (Davidson *et al.*, 2011).

En el caso del mejillón cebra, su gran capacidad de adaptación se refleja especialmente en el continente americano. El mejillón cebra apareció en Estados Unidos en los años 80 en la región de los Grandes Lagos, muy probablemente debido a la descarga de agua de lastre por parte de grandes cargueros procedentes de Europa (Carlton, 1993). Esta zona cuenta casualmente con condiciones climáticas y medioambientales notablemente similares al rango nativo del mejillón cebra en Europa (Gallardo, datos no publicados). Es decir, en esta zona se conjugan los dos factores principales que determinan el éxito de la invasión: disponibilidad de propágulos, e idoneidad climática. Tras un periodo de adaptación de varios años, la especie comenzó a expandirse con gran rapidez a través del Mississippi y otros grandes ríos americanos, a pesar de los esfuerzos de las autoridades de protección medioambiental por frenar su expansión (Drake y Bossenbroek, 2004). Actualmente en Estados Unidos el mejillón cebra habita ecosistemas con condiciones climáticas mucho más extremas que en Europa (McMahon, 1996). No se sabe con certeza porqué la invasión del mejillón cebra ha sido más agresiva y rápida en Estados Unidos, aunque se relaciona con una mayor actividad económica y comercial, que favorecería la dispersión de la especie por medios humanos. Además, se especula con la falta de depredadores y patógenos naturales en Norte América, que permitiría a esta especie ser más re-

sistente e invertir más energía en su crecimiento y reproducción. Es lo que se conoce como hipótesis de liberación del enemigo, la cual postula que las especies invasoras experimentan una liberación de la regulación que sobre ella ejercían sus enemigos naturales (depredadores, patógenos y parásitos), lo que propicia el aumento de su abundancia y la expansión de su rango invasor (Santamaria *et al.*, 2009).

4.3. Limitaciones de los modelos de distribución de especies

Los modelos bioclimáticos son una de las pocas herramientas disponibles para realizar predicciones que nos ayuden a adelantarnos a los cambios climáticos del futuro. No obstante, es obvio que estos modelos adolecen de un número de limitaciones. La incapacidad de tener en cuenta la flexibilidad biológica de la especie, o su capacidad de adaptación a los cambios climáticos del futuro, se ha comentado con anterioridad. El mejillón cebra ha demostrado una extraordinaria capacidad de adaptación tanto espacial como temporal, lo que incrementa el grado de incertidumbre de cualquier modelo predictivo. En segundo lugar, el mejillón cebra depende de numerosos factores locales a parte del clima como son la salinidad, concentración de calcio, pH o sustrato. Por ejemplo Navarro *et al.* (2006) identificaron factores físico químicos tales como la concentración de oxígeno, temperatura y nutrientes como claves para explicar el establecimiento del mejillón cebra en tres embalses del Ebro (Ribarroja, Flix y Mequinenza). Efectivamente estos factores relacionados con la preferencia de hábitat y resistencia fisiológica de la especie, son fundamentales y ampliamente utilizados para modelizar la evolución de poblaciones de mejillón a escala local, para lo cual este tipo de información está disponible. Sin embargo, estos factores no solo son difíciles sino imposibles de modelizar a gran escala, como es la escala global utilizada para calibrar los modelos de este estudio. Existen, por ejemplo, datos de calidad del agua a nivel europeo, pero se trata de datos puntuales cuya interpolación a través del continente europeo es difícil y en cualquier caso poco creíble. No obstante, es de destacar que otros autores han sido capaces de incorporar en sus modelos variables a escala de cuenca hidrográfica. Por ejemplo, Leathwick *et al.*, (2008) derivaron un número de predictores a escala de cuenca que describen la red hidrográfica para estudiar la distribución de peces invasores en Nueva Zelanda. Drake y Bossembroek (2004) utilizaron la geología subyacente como indicador de la química del agua para proyectar la distribución del mejillón cebra en Norte América. Este tipo de información es de gran utilidad para comprender cómo y porqué una especie invade una determinada cuenca hidrográfica. Sin embargo, este tipo de factores relacionados con la calidad del agua o la geomorfología no se pueden utilizar para realizar predicciones de futuro, a no ser que existan escenarios desarrollados para estas variables (lo que es muy raro) o se consideren constantes en el futuro (lo que es poco creíble). Por último, existen otras limitaciones en el uso de modelos bioclimáticos de tipo más práctico, relacionadas con el tipo de algoritmo y las condiciones de modelización. Actualmente existen numerosos pro-

gramas para la realización de modelos de distribución de especies entre los que destacan MaxEnt (www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/), openModeller (openmodeller.sourceforge.net/), GARP (<http://www.nhm.ku.edu/desktopgarp>) y el paquete de R Biomod (<http://www.will.chez-alice.fr/Software.html>). Además, cada uno de estos programas ofrece varias opciones de modelización, sin instrucciones claras acerca de cómo realizar el modelo o incluso cómo evaluar los resultados. Dado el reciente interés de la comunidad científica por los modelos de distribución de especies, se publican continuamente nuevos artículos en los que se comparan técnicas y se recomiendan opciones, por lo que es previsible que este tipo de técnicas predictivas mejoren notablemente en un futuro próximo.

4.4. Nuevas estrategias de lucha contra el mejillón cebra

Existen diversas técnicas físicas y químicas para el manejo del mejillón cebra, desde el tratamiento térmico a la cloración, ninguna de las cuales se puede considerar especialmente exitosa dado que el mejillón cebra es capaz de soportar condiciones ambientales extremas y se recupera fácilmente. La estrategia de la Confederación Hidrográfica del Ebro en cuanto al mejillón cebra se ha centrado en la información y educación de los usuarios de lagos afectados y la sociedad en general, el monitoreo intensivo de la situación en la cuenca del Ebro, la desinfección de embarcaciones y otros posibles vectores de introducción, y la investigación de diferentes técnicas de erradicación (Duran *et al.*, 2010). En relación a este último aspecto, es de destacar la aplicación de la técnica de las Biobalas, desarrollada en la Universidad de Cambridge y que se ha probado con éxito en las instalaciones de riego del Bajo Ebro en primavera de 2011 (Duran *et al.*, 2010). Las Biobalas son pequeñas bolas envueltas en un material orgánico que el mejillón identifica como alimento, pero que contienen en su interior sales u otros elementos nocivos para el animal (Aldridge *et al.*, 2006). El mejillón es un bivalvo filtrador capaz de consumir y acumular grandes concentraciones de Biobalas, que una vez en su interior liberan el producto matando al animal. El resto de organismos acuáticos no acumulan tal cantidad de producto, por lo que no se ven afectados por las Biobalas. Es por este motivo, que este producto es específico para tratar el mejillón cebra a diferencia de otras técnicas más agresivas como la cloración. Además, una vez liberado en el agua, el aumento de la concentración de sales es mínimo, lo que hace de este método una de las opciones más sostenibles y seguras medioambientalmente. Otra técnica de gran interés es el control biológico mediante una bacteria, *Pseudomonas fluorescens*, que es capaz de dañar gravemente el sistema digestivo del animal (Molloy, 1998; Molloy *et al.*, 2002). Hoy en día tan solo se ha conseguido la erradicación del mejillón cebra mediante éstas u otras técnicas a escala muy local, y normalmente en instalaciones cerradas. No obstante, se investiga la idoneidad de las Biobalas en sistemas abiertos.

Por último, es de destacar una nueva corriente de investigación que busca beneficiarse de la capacidad del mejillón para limpiar el agua, por ejem-

plo en embalses y lagos eutrofizados (Elliott *et al.*, 2008; McLaughlan y Aldridge, 2011). En este caso, se busca el cultivo controlado del mejillón cebra mediante la colocación de un sistema de cuerdas en el interior del embalse. Las cuerdas son de un material y texturas especialmente concebidas para que los mejillones crezcan adheridos al mismo, no muy diferente a las bateas utilizadas en las rías gallegas para el cultivo del mejillón de consumo humano. El mejillón coloniza y crece sobre las cuerdas, alimentándose del exceso de nutrientes y acumulando los metales pesados que llegan al embalse desde los campos de cultivo e industrias ubicadas en la cuenca. Periódicamente las cuerdas se recogen y se retiran los mejillones eliminando, por tanto, toda esa carga de nutrientes y metales pesados del agua. Dichos mejillones no son aptos en este caso para el consumo humano, pero una vez desecados y molidos podrían tener un número de aplicaciones: desde el desarrollo de complementos alimenticios de calcio y magnesio, fertilizantes, sustrato para la restauración de suelos ácidos en minas (por su alto contenido en calcio y magnesio) o incluso como material de construcción (áridos). Este tipo de aplicación está cobrando especial interés en Inglaterra y Suecia en embalses gravemente afectados por el mejillón cebra cuya erradicación es inviable, y obviamente nunca se propone su aplicación en sistemas libres de mejillón cebra. Por ejemplo en Suecia se plantea que sean las industrias contaminantes del río o lago las que financien la operación. Los beneficios que se obtengan de la venta del producto final se reinvertirían en proyectos locales de conservación.

4.5. Conclusiones y necesidades de investigación

Tal y como recoge el Convenido para la Diversidad Biológica de las Naciones Unidas (<http://www.cbd.int/>) los tres ejes principales de actuación en cuanto a especies invasoras deben ser la prevención, control o monitoreo, y finalmente la erradicación de la especie invasora, en este orden. El presente artículo presenta información básica que puede ser de gran ayuda para la prevención y control de la especie en la Comunidad de La Rioja. Dada la reciente aparición de un número creciente de especies invasoras en la cuenca del río Ebro como el caracol manzana (2009, *Pomacea canaliculata*), la medusa de agua dulce (2009, *Craspedacusta sowerbyi*) o la artemia (2007, *Artemia franciscana*) (Oscoz *et al.*, 2010), cabe preguntarse qué factores contribuyen a esta "crisis invasora". Más concretamente si esta crisis está relacionada con factores locales (como el tráfico marítimo en las inmediaciones del delta del Ebro, la falta de control en la descarga del agua de lastre o en la importación de productos desde otros continentes, o el incremento en el nivel de degradación medioambiental de la cuenca del Ebro que lo hace más susceptible a la invasión) o si por el contrario se trata de un fenómeno global imparable (relacionado con el cambio climático, la globalización y el aumento de especies invasoras en países vecinos). Este tipo de información resultaría fundamental para prevenir la futura aparición de especies invasoras que pongan en peligro la biodiversidad de la cuenca del Ebro, así como la rentabilidad de las actividades agrícolas e industriales que se desarrollan en la misma. Por último,

también es indispensable una mayor inversión en investigación básica acerca de los rangos fisiológicos (como resistencia a cambios en la temperatura, profundidad del agua y salinidad, patrones de distribución, preferencias de hábitat e impactos de las especies invasoras en la cuenca del Ebro), que sirva de base al desarrollo de estrategias de erradicación eficientes a largo plazo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido capaz gracias a la financiación de la Comisión Europea (FP7/2007-2013, Programa Marie Curie IEF). Es de agradecer el empeño del Dr. Teodoro Lasanta porque los investigadores riojanos contribuyamos al desarrollo científico de nuestra Comunidad.

BIBLIOGRAFÍA

- Aldridge, D.C., Elliott, P. y Moggridge, G. (2006). Microencapsulated BioBullets for the control of biofouling zebra mussels. *Environmental science & technology*, 40, 975-979.
- Araujo, M.B. y New, M. (2007). Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology & Evolution*, 22, 42-47.
- Bradley, B.A. (2010). Assessing ecosystem threats from global and regional change: hierarchical modeling of risk to sagebrush ecosystems from climate change, land use and invasive species in Nevada, USA. *Ecography*, 33, 198-208.
- Burlakova, L.E., Karatayev, A. y Padilla, D.K. (2005). Functional changes in benthic freshwater communities after *Dreissena polymorpha* (Pallas) invasion and consequences for filtration. *The Comparative Roles of Suspension Feeders in Ecosystems. NATO Science Series: IV - Earth and Environmental Sciences* (ed. by R. Dame y S. Olenin), pp. 263-285. Springer.
- Carlton, J. (1993). Dispersal Mechanisms of the Zebra Mussel (*Dreissena polymorpha*) *Zebra Mussels: Biology, Impacts, and Control*, pp. 677-697. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Connelly, N.A., O'Neill, C.R., Knuth, B.A. y Brown, T.L. (2007). Economic impacts of zebra mussels on drinking water treatment and electric power generation facilities. *Environmental Management*, 40, 105-112.
- Davidson, A.M., Jennions, M. y Nicotra, A.B. (2011). Do invasive species show higher phenotypic plasticity than native species and, if so, is it adaptive? A meta-analysis. *Ecology Letters*, 14, 419-431.
- Drake, J.M. y Bossenbroek, J.M. (2004). The potential distribution of zebra mussels in the United States. *Bioscience*, 54, 931-941.
- Dukes, J.S. y Mooney, H.A. (1999). Does global change increase the success of biological invaders? *Trends in Ecology & Evolution*, 14, 135-139.

- Duran, C., Lanao, M., Anadón, A. y Touyá, V. (2010). Management strategies for the zebra mussel invasion in the Ebro basin *Aquatic Invasions*, 5, 309-316.
- Elith, J., Graham, C.H., Anderson, R.P., Dudik, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R.J., Huettmann, F., Leathwick, J.R., Lehmann, A., Li, J., Lohmann, L.G., Loiselle, B.A., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nakazawa, Y., Overton, J.M., Peterson, A.T., Phillips, S.J., Richardson, K., Scachetti-Pereira, R., Schapire, R.E., Soberon, J., Williams, S., Wisz, M.S. y Zimmermann, N.E. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29, 129-151.
- Elliott, P., Aldridge, D.C. y Mogyridge, G.D. (2008). Zebra mussel filtration and its potential uses in industrial water treatment. *Water Research*, 42, 1664-1674.
- Gallardo, B. (2010). Using GARP to investigate the present and future distribution of zebra mussel in Europe. *17th International Conference on aquatic invasive species* (San Diego (EEUU)).
- Gherardi, F. (2007). *Biological invaders in inland waters: profiles, distribution and threats*. Springer, Dordrecht, The Netherlands.
- Griebeler, E.M. y Seitz, A. (2007). Effects of increasing temperatures on population dynamics of the zebra mussel, *Dreissena polymorpha*: implications from an individual-based model. *Oecologia*, 151, 530-543.
- Karatayev, A.Y., Burlakova, L.E. y Padilla, D.K. (1998). Physical factors that limit the distribution and abundance of *Dreissena polymorpha* (Pall.). *Journal of Shellfish Research*, 17, 1219-1235.
- Karatayev, A.Y., Burlakova, L.E. y Padilla, D.K. (2003). Patterns of spread of the zebra mussel, *Dreissena polymorpha* (Pallas): The continuing invasion of Belarussian Lakes. *Biological Invasions*, 5, 213-221
- Leathwick, J.R., Elith, J., Chadderton, W.L., Rowe, D. y Hastie, T. (2008). Dispersal, disturbance and the contrasting biogeographies of New Zealand's diadromous and non-diadromous fish species. *Journal of Biogeography*, 35, 1481-1497.
- Leuven, R., van der Velde, G., Baijens, I., Snijders, J., van der Zwart, C., Lenders, H.J.R. y de Vaate, A.B. (2009). The River Rhine: a global highway for dispersal of aquatic invasive species. *Biological Invasions*, 11, 1989-2008.
- McLaughlan, C. y Aldridge, D.C. (2011). Biofilters for the improvement of reservoir water quality and biodiversity. In: *The British Ecological Society Annual Meetin and AGM*, Sheffield.
- McMahon, R.F. (1996). The physiological ecology of the zebra mussel, *Dreissena polymorpha*, in North America and Europe. *American Zoologist*, 36, 339-363.
- Molloy, D.P. (1998). The potential for using biological control technologies in the management of *Dreissena* spp. *Journal of Shellfish Research*, 17, 177-183.
- Molloy, D.P., Mayer, D.A., Gaylo, M.J., Presti, K.T., Karatayev, A.Y. y Burlakova, L.E. (2002). Progress in the biological control of zebra mussels with microbial toxin. *Journal of Shellfish Research*, 21, 435-436.

- Navarro, E., Bacardit, M. y Caputo, L. (2006). Limnological characterization and flow patterns of a three-coupled reservoir system and their influence on *Dreissena polymorpha* populations and settlement during the stratification period. *Lake and Reservoir Management*, 22, 293-302.
- Oreska, M. y Aldridge, D. (2011). Estimating the financial costs of freshwater invasive species in Great Britain: a standardized approach to invasive species costing. *Biological Invasions*, 13, 305-319.
- Oscóz, J., Tomás, P. y Durán, C. (2010). Review and new records of non-indigenous freshwater invertebrates in the Ebro River basin (Northeast Spain). *Aquatic Invasions*, 5, 263-284.
- Peterson, A.T. (2003). Predicting the geography of species' invasions via ecological niche modeling. *Quarterly Review of Biology*, 78, 419-433.
- R Development Core Team (2007). *R: A language and environment for statistical computing*. Foundation for Statistical Computing (<http://www.R-project.org>), Vienna, Austria.
- Rajagopal, S., Pollux, B.J.A., Peters, J.L., Cremers, G., Moon-van der Staay, S.Y., van Alen, T., Eygensteyn, J., van Hoek, A., Palau, A., de Vaate, A.B. y van der Velde, G. (2009). Origin of Spanish invasion by the zebra mussel, *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771) revealed by amplified fragment length polymorphism (AFLP) fingerprinting. *Biological Invasions*, 11, 2147-2159.
- Ricciardi, A., Serrouya, R. y Whoriskey, F.G. (1995). Aerial exposure tolerance off zebra and quagga mussels (Bivalvia: Dreissenidae): implications for overland dispersal. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 52, 470-477.
- Ruiz-Altaba, C., Jiménez, C.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, 150-151.
- Sala, O.E., Chapin, F.S., Armesto, J.J., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R., Huber-Sanwald, E., Huenneke, L.F., Jackson, R.B., Kinzig, A., Leemans, R., Lodge, D.M., Mooney, H.A., Oesterheld, M., Poff, N.L., Sykes, M.T., Walker, B.H., Walker, M. y Wall, D.H. (2000). Biodiversity - Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 287, 1770-1774.
- Santamaria, L., Pericás, J., Carrete, M. y Tella, J.L. (2009). La ausencia de enemigos naturales favorece las invasiones biológicas. *Invasiones biológicas* (ed. by M. Vilá, F. Valladares, A. Traveset, L. Santamaria y P. Castro), pp. 91-101. CSIC, Madrid (Spain).
- Spidle, A.P., Mills, E.L. y May, B. (1995). Limits to tolerance of temperature and salinity in the quagga mussel (*Dreissena bugensis*) and the zebra mussel (*Dreissena polymorpha*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 52, 2108-2119.
- Strayer, D.L. (2009). Twenty years of zebra mussels: lessons from the mollusk that made headlines. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7, 135-141.

- Thorp, J.H., Alexander, J.E., Bukaveckas, B.L., Cobbs, G.A. y Bresko, K.L. (1998). Responses of Ohio River and Lake Erie dreissenid molluscs to changes in temperature and turbidity. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 55, 220-229.
- Thuiller, W., Lafourcade, B., Engler, R. y Araujo, M.B. (2009). BIOMOD - a platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography*, 32, 369-373.
- Walther, G.R., Roques, A., Hulme, P.E., Sykes, M.T., Pysek, P., Kuhn, I., Zobel, M., Bacher, S., Botta-Dukat, Z., Bugmann, H., Czucz, B., Dauber, J., Hickler, T., Jarosik, V., Kenis, M., Klotz, S., Minchin, D., Moora, M., Nentwig, W., Ott, J., Panov, V.E., Reineking, B., Robinet, C., Semchenko, V., Solarz, W., Thuiller, W., Vila, M., Vohland, K. y Settele, J. (2009). Alien species in a warmer world: risks and opportunities. *Trends in Ecology & Evolution*, 24, 686-693.
- Williams, J.W. y Jackson, S.T. (2007). Novel climates, no-analog communities, and ecological surprises. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5, 475-482.



ZUBÍA

23



Gobierno de La Rioja
www.larioja.org



**Instituto
de Estudios
Riojanos**