

MEDITERRANEA

SERIE DE ESTUDIOS BIOLÓGICOS

2005 Época II N° 18



COMITÉ EDITORIAL:

Ch. P. BLANC

G.U. CARAVELLO

S.G. CONARD



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Departamento de Ecología. Facultad de Ciencias

COMITÉ CIENTÍFICO:

Ch. P. BLANC. Lab. Zoogéographie. Université Montpellier III. Francia.
S.G. CONARD. USDA Forest Service. Riverside. U.S.A.
A. FARINA. Lab. Ecologia del Paisaje. Museo Historia Natural. Aulla. Italia.
A. FERCHICHI. I.R.A. Medenine. Túnez.
G.U.CARAVELLO. Istituto di Igiene. Università di Padova. Italia.

COMITÉ EDITORIAL:

V. Peiró, J. Martín, G. López, E. Seva.

DIRECCIÓN:

Eduardo Seva. Dep. Ecología. Fac. de Ciencias. Universidad de Alicante.

SECRETARÍA:

Germán López. Dep. Ecología. Universidad de Alicante.

EDITA:

Servicio de Publicaciones. Universidad de Alicante.
<http://publicaciones.ua.es>

CORRESPONDENCIA:

Departamento de Ecología. Fac. de Ciencias. Universidad de Alicante.
Ap. 99 - 03080 Alicante. España.
Teléfono de Secretaría: 96/5909520
Fax: Rev. Mediterránea. Dep. Ecología. 96/5903464

I.S.S.N.: 0210-5004

Depósito Legal: A-1059-1984

Edición electrónica:



Notas para los autores

Los trabajos versarán sobre aspectos de ecología, recursos naturales, paisaje, gestión ambiental, en los ecosistemas de la cuenca mediterránea.

Los manuscritos mecanografiados a doble espacio y por una sola cara se enviarán a la dirección del **Departamento de Ecología de la Universidad de Alicante, Ap. 99 (03080 Alicante, España) —Revista Mediterránea—**. Los autores deberán enviar original y dos copias, así como en disquette compatible en programas de tratamiento de texto MS-WORD.

LENGUA: Redactados en español, inglés, francés o italiano.

NOMBRE DE AUTORES: Apellidos y nombres sin abreviaciones.

DIRECCIÓN: Dirección profesional (Organización, Centro de Investigación, Universidad,...) teléfono, telefax, dirección electrónica.

TÍTULO: conciso y completo, sin abreviaciones (max. 60 espacios).

RESÚMEN: Después del título, un resumen en inglés y otro en francés, de 1500 espacios como máximo, independientemente de la lengua utilizada en el texto del trabajo

PARÁGRAFOS: El manuscrito debe respetar el siguiente orden: (contenido) introducción sin título, párrafos con títulos cortos (max. 50 espacios), conclusiones, agradecimientos (si procede), referencias bibliográficas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS: Obligatorias para las publicaciones citadas en el texto, que irán en mayúscula. Las referencias de información no publicada (informes, comunicación personal...) se incluyen en el texto entre paréntesis. La bibliografía se presentará según los modelos siguientes:

GOSZ, J.R. and SHARPE, J.H. 1989. Broad-scale concepts for interactions of climate, topography, and biota and biome transitions. *Landscape Ecology* 3:229-243.

PIANKA, E. 1986. *Ecology and natural history of desert lizards*. Princeton University Press. Princeton, New Jersey.

GOLDSMITH, V. 1979. Coastal dunes. In: R.A. Davis (ed.), *Coastal sedimentary environments*. New York:Springer-Verlag.

CORRECCIÓN DE PRUEBAS: Será realizada por la redacción de la revista, aunque los autores deben enviar un texto muy claro y definitivo. Si se hallan deficiencias notorias en el texto, el trabajo será remitido a los autores de inmediato.

TABLAS: Cada tabla en página por separado, numeradas siguiendo el orden de aparición en el texto y llevarán leyenda. El método de escritura admitido puede ser WORD o EXCEL.

GRÁFICAS y DIBUJOS: Presentados en papel blanco no reciclado, exclusivamente en blanco y negro. Las láminas en color deberán ser costeadas por los autores. Gráficas y dibujos deben ser presentados de forma que, modificando su dimensión, no se vea modificada su comprensión. Deberán acompañar las leyendas al gráfico, suficientemente grandes e incluidas en la caja del mismo. Es obligatorio acompañar archivo en disco compatible y formato TIF o JPEG.

ILUSTRACIONES: Las fotografías, separadas del texto, con leyenda y número de orden, posición en el texto, etc.

NOTAS: Excepcionalmente se incluirán notas a pie, pero éstas deben ir en hojas separadas y debidamente numeradas.

EXTENSIÓN: El texto comprenderá una extensión de 5 (min.) a 25 (max.) páginas mecanografiadas. El número de gráficos, dibujos y fotografías debe ser proporcional al tamaño del texto.

La dirección de la revista se reserva el derecho de revisar los trabajos presentados con el fin de adaptarlos a la publicación.

<http://publicaciones.ua.es>

Notes for the authors

SUBJECTS

Ecology

Natural Resources

Landscape

Environmental Management

Manuscripts typed on duplicate on one side of the sheet only, should be sent to the magazine direction: **Mediterranea. S.E.B.Dep. Ecologia. Universidad de Alicante. Ap. 99 (03080 Alicante) Spain.** All authors are kindly requested to send their papers in writing, but namely on MS DOS/IBM compatible disks, using MS-WORD program. Every paper should conform to the following rules:

LANGUAGE: Spanish, English, French or Italian.

NAME OF THE AUTHORS: Preceded by the full first name without abbreviations.

ADDRESS: Institutional address of author(s) (Institutions, Research Centre, University), telephone, fax, electronic adress..

TITLE: Concise but detailed enough, without abbreviations (max. 60 strokes).

ABSTRACTS: In English and French, whatever it might be the language of the paper. The lenght should not exceed 1500 strokes.

PARAGRAPHS: Should be arranged as follows: (contents) introduction without title, paragraphs with short titles (max. 50 strokes), conclusions, acknowledgments (if required), references.

REFERENCES: Should include only publications mentioned in the text. References to unpublished informations (reports, personal communications, etc.) should be included between parentheses in the text. The bibliography should be presented in conformity with the following patterns: GOSZ, J.R. and SHARPE, J.H. 1989. Broad-scale concepts for interac-

tions of climate, topography, and biota and biome transitions. *Landscape Ecology* 3:229-243.

PIANKA, E. 1986. *Ecology and natural history of desert lizards*. Princeton University Press. Princeton, New Jersey.

GOLDSMITH, V. 1979. Coastal dunes. In: R.A. Davis (ed.), *Coastal sedimentary environments*. New York:Springer-Verlag.

CORRECTIONS TO THE PROOF: Will be done by the editorial staff. Authors are kindly requested to submit a clear and final paper.

TABLES: Each table should be on a separate sheet, numbered consecutively, with a legend. The writing method admitted is WORD, EXCEL..

GRAPHICS AND DRAWINGS: Separated from the text, should be lettered on white or glossy paper, in black and white in compatible disks TIF or JPEG format. They should be clearly "constructed", with sufficiently big letters within the block of the graph.

ILLUSTRATIONS: Photographs should be numbered and lettered.

NOTES: They should be numbered and referred to in the text. They should be compiled on separate sheets.

LENGTH: Preferably between 5 (min.) and 25 (max.) typed pages. The number of illustrations, tables and graphs should be proportional to the length of the text.

The articles are reviewed by the editorial staff to be conformed for their publication.

<http://publicaciones.ua.es>

Portada

Créditos

Estimación de la contaminación agrícola en el Mar Menor mediante un modelo dinámico 8

JULIA MARTÍNEZ FERNÁNDEZ, MIGUEL ANGEL

ESTEVE SELMA

Résumé 8

Abstract 9

Metodología y descripción del modelo 12

Resultados y discusión 18

Algunas implicaciones ambientales 23

Referencias bibliograficas 29

Apéndice con las principales variables del modelo 32

Estimación de la contaminación agrícola en el Mar Menor mediante un modelo dinámico

JULIA MARTÍNEZ FERNÁNDEZ

MIGUEL ANGEL ESTEVE SELMA

Departamento de Ecología e Hidrología.

Universidad de Murcia

Résumé

Le Campo de Cartagena constitue une vaste plaine drainée par un ensemble de ravins, qui débouchent dans la lagune littorale du Mar Menor, d'une grande singularité écologique et touristique. Pendant les dernières décades, l'accès généralisé aux ressources souterraines et surtout, l'arrivée des eaux du Trasvase Tajo-Segura ont supposé un important développement des terres irrigables et de la quantité utilisée d'engrais agricoles. Dans cette étude, on a élaboré un premier modèle de simulation dynamique sur les terres irrigables dans le Campo de Cartagena et sur l'exportation d'engrais agricoles. On a discuté aussi leurs effets sur le milieu naturel et sur d'autres utilisations socioéconomiques. Le modèle dynamique simule le comportement du système

Estimación de la contaminación agrícola en el Mar Menor mediante un modelo dinámico

depuis 1970 jusqu'à nos jours et inclut des variables comme la surface d'irrigation en plein air et en serre, l'exportation de nitrogène vers le Mar Menor, les ressources hydriques transvasées, la pluviosité mensuelle, la quantité utilisée d'engrais et de divers coefficients de lixiviation et de rétention. Les résultats montrent une notable augmentation de l'entrée de substances nutritives d'origine agricole au Mar Menor jusqu'à atteindre aujourd'hui autour de 2000 tonnes annuelles de nitrogène et 60 tonnes annuelles de phosphore. L'exportation finale de substances nutritives présente un caractère clairement dynamique qui dépend autant de facteurs exogènes, principalement la pluviosité, que endogènes, comme le niveau d'engrais agricoles accumulés dans le bassin. Cette exportation de substances nutritives a commencé à entraîner des procès d'eutrophisation dans la lagune.

Abstract

The Campo de Cartagena is an ample lowland drained by several ephemeral channels flowing into the coastal lagoon of Mar Menor, having a high ecological and tourist value. During the last decades the increment of water resources due to groundwater exploitation and the Trasvase Tajo-Segura has led to a considerable increment of the irrigated lands and the amount of agricultural fertilisers. In the present work a first dynamic simulation model about the irrigated lands on the Campo de Cartagena and the fertilisers transport has been built up. The effects on the natural environment and on other socio-economic uses have also been discussed. The dynamic model simulates the behaviour of the system from 1970 to nowadays and includes variables such as the area occupied by irrigated lands, the nutrients flow into

the Mar Menor, the available water resources, the monthly rainfall, the fertilisers input and several leaching and retention coefficients. The results show a great increment of the fertilisers income to the Mar Menor until the current mean values of around 2000 annual tons of nitrogen and 60 annual tons of phosphorous. The final nutrients export present a clear dynamic character depending both on exogenous factors, mainly the monthly rainfall, and on endogenous factors, such as the level of fertilisers accumulated in the basin. This nutrients export has begun to generate eutrophication processes in the lagoon, being the most serious indicator the big summer proliferation of two species of jellyfish, having not only environmental effects but also socio-economic ones due to its impact on the tourist quality of the Mar Menor.

Los usos agrarios y otras formas de aprovechamiento del territorio difícilmente pueden analizarse de forma aislada ya que constituyen ejemplos de sistemas complejos en los que tales usos interaccionan con los sistemas naturales a través de múltiples relaciones. Los sistemas complejos se caracterizan por presentar elementos y relaciones poco evidentes así como la tendencia a diferir en el espacio y en el tiempo buena parte de los efectos generados por las tensiones existentes en los mismos, de manera que en una perspectiva a corto plazo y limitada al propio uso agrario tales efectos son ignorados o considerados como una externalidad. Sin embargo, a veces tales efectos trascienden de forma casi inmediata a otros usos socioeconómicos, con lo que la visibi-

Estimación de la contaminación agrícola en el Mar Menor mediante un modelo dinámico

lidad e importancia de los mismos aumenta de forma dramática. Esto ocurre cuando dos sistemas intensivos de aprovechamiento del territorio coinciden en su espacio ambiental y están mediados por un sistema natural forzado, como es el caso del regadío en el litoral. En efecto, en España las zonas litorales mediterráneas se caracterizan por albergar, tanto buena parte del regadío más intensificado, como las principales actividades turísticas del país, de modo que en ellas existe también un elevado potencial para la génesis de relaciones tanto conflictivas como de complementariedad entre tales actividades agrícolas y turísticas. Una de tales zonas, el Campo de Cartagena y el entorno del Mar Menor, presenta ya los primeros signos de dichas relaciones conflictivas. En este trabajo se analiza dicho regadío y los efectos de su contaminación difusa sobre los sistemas naturales y otros usos socioeconómicos de la zona, fundamentalmente turísticos.

El Campo de Cartagena constituye una extensa llanura de unos 1200 km² drenada por un conjunto de ramblas que desembocan en la laguna litoral del Mar Menor, de gran singularidad ecológica y turística. En esta llanura se ha ido desarrollando progresivamente una agricultura de regadío basada en el aprovechamiento de los recursos subterráneos, si bien hasta tiempos recientes tal aprovechamiento ha sido bastan-

te limitado. En las últimas décadas, el acceso generalizado a los recursos subterráneos, y sobretodo la llegada de las aguas del Trasvase Tajo-Segura en 1979 han supuesto una profunda transformación del Campo de Cartagena, con un importante incremento del regadío y del aporte de fertilizantes agrícolas.

Metodología y descripción del modelo

La adecuada comprensión de sistemas complejos requiere de la utilización de metodologías que favorezcan enfoques integrales tales como la Dinámica de Sistemas, que permite considerar y analizar de modo integral distintos factores y sectores socioeconómicos y ambientales, sus interacciones, así como la simulación de su comportamiento dinámico (Roberts et al 1983, Vennix 1996). Esta metodología ha sido por ello aplicada en distintos sistemas de este tipo ((Ruth 1995, Verhagen 1997, Santos et al. 1997, AMA 1991). Los modelos dinámicos se basan en la consideración explícita de las retroalimentaciones que se establecen entre diversos factores, de manera que la evolución dinámica del sistema viene generada al menos parcialmente por la propia estructura del sistema. En el presente estudio se ha utilizado dicha metodología para elaborar un primer modelo dinámico acerca del regadío en el Campo de Cartagena y la exportación de fertilizantes,

Estimación de la contaminación agrícola en el Mar Menor mediante un modelo dinámico

discutiéndose sus efectos sobre el medio natural y otros usos socioeconómicos. En la construcción del modelo se abordan de un modo iterativo las fases de conceptualización, formulación detallada del modelo y calibración haciendo uso del software *VENSIM™* (Ventana Systems 1994), específicamente diseñado para la simulación de modelos dinámicos. El modelo permite explorar los efectos de distintos escenarios de gestión sobre el comportamiento dinámico del sistema, si bien tales escenarios no se discuten aquí por razones de brevedad.

El modelo dinámico simula el comportamiento del sistema desde 1970 hasta la actualidad sobre una base mensual e incluye variables de nivel, que representan acumulaciones en el sistema, como la superficie de riego al aire libre o la cantidad de nitrógeno de origen agrícola existente en la cuenca, y variables de flujo, que representan las entradas y salidas de dichas variables de nivel, como la exportación de nitrógeno hacia el Mar Menor. El modelo también incluye algunas variables exógenas (recursos hídricos trasvasados y precipitación mensual) y diversas tasas y parámetros como los relativos a los aportes de fertilizantes y los coeficientes de lixiviación y de retención en la cuenca. (Fig. 1).

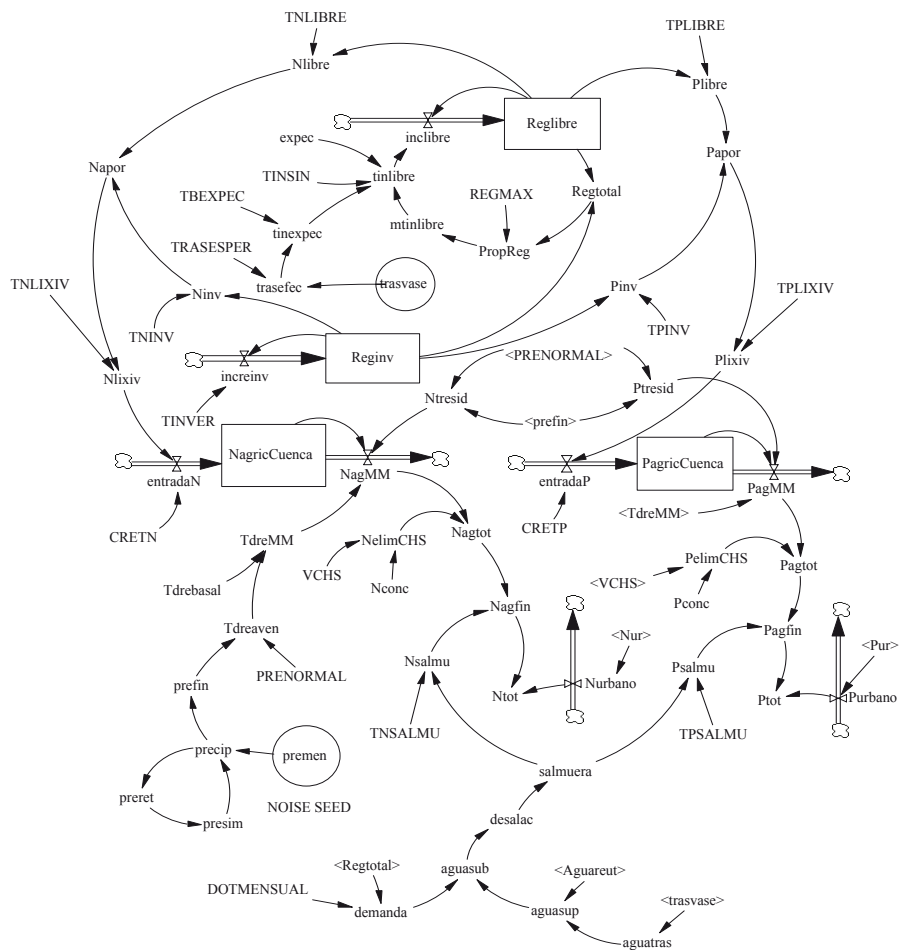


Figura 1. Diagrama causal del modelo global. Significado de las variables en apéndice.

Estimación de la contaminación agrícola en el Mar Menor mediante un modelo dinámico

El modelo determina la evolución de la superficie de regadío en función de la superficie ya existente, las tasas de crecimiento del regadío, la existencia de expectativas sobre nuevos recursos y el agua efectivamente trasvasada, entre otros factores. Esto permite la combinación de factores exógenos, tales como la existencia o no de sequía y la cantidad de recursos trasvasados, con factores endógenos, tales como el regadío ya existente y la superficie máxima legalmente asignada para esta Unidad de Demanda Agraria (CHS 1997). Por otra parte la formulación de la cantidad de nitrógeno y fósforo existentes en la cuenca como variables de nivel permite la consideración explícita de los tiempos de residencia de estos elementos en la cuenca y los retrasos existentes entre la lixiviación de fertilizantes y su entrada en la laguna, así como el efecto de lavado de las precipitaciones importantes y avenidas y su incidencia en las variaciones mensuales en la exportación de los mismos.

Para la calibración y parametrización del modelo se ha realizado una amplia revisión de toda la información disponible con especial énfasis en los datos procedentes de regadíos similares en otras regiones españolas, así como en algunos datos experimentales procedentes del propio Campo de Cartagena, relativos a la aportación de agua, nitrógeno y fósfo-

ro para superficies al aire libre y de invernadero, y sus respectivos coeficientes de lixiviación. (Lopez Galvez y Naredo 1996 ; Rincón 1996 ; Jordan *et al.* 1997 ; Moreno *et al.* 1996 ; Liu *et al.* 1997 ; Guimera *et al.* 1995 ; Diez 1997). Todo ello, junto a datos analíticos facilitados por SACYR S.A. acerca de la concentración de nitrógeno y fósforo en el agua de drenaje agrícola en las proximidades del Mar Menor, ha permitido realizar una primera estimación de los coeficientes de retención de la cuenca para nitrógeno y fósforo.

Otro factor importante en relación con la exportación de nutrientes lo constituyen las avenidas, que generan un lavado importante de nutrientes en la cuenca hacia la laguna, a veces acumulados durante varios años (David *et al.* 1997 ; Longabucco y Rafferty 1989, entre otros). En el presente modelo se han introducido las series históricas de precipitación mensual en el Campo de Cartagena desde 1970 a la actualidad para simular el efecto de las avenidas de forma similar a la utilizada en otras modelizaciones (Paaby *et al.* 1995).

Si bien los acuíferos actúan como sumideros temporales de la contaminación agraria y por tanto retardan el efecto visible de dicha contaminación, en el caso del Sistema Acuífero del Campo de Cartagena este papel retardador está empezando a ser profundamente modificado. La extracción creciente de

Estimación de la contaminación agrícola en el Mar Menor mediante un modelo dinámico

agua subterránea, incrementada durante el reciente periodo de sequía, contribuye a una mayor salinización del Sistema Acuífero, de manera que en los últimos años se ha generalizado la instalación en el Campo de Cartagena de plantas desaladoras, de las que actualmente existen unas 35, para tratar parte del agua extraída. La desalación genera un vertido de salmueras enriquecidas en nutrientes por el propio proceso de concentración de sales a partir de un agua de origen muy contaminada ya en nitratos (hasta 300 mg/l en el acuífero Cuaternario) y por la adición de diversas sustancias ricas en fósforo. La reciente irrupción de la desalación de agua subterránea en el Campo de Cartagena cabe interpretarla como un proceso acelerador de la conexión entre el Sistema Acuífero y la laguna que actúa como receptor último de los flujos superficiales y subsuperficiales.

El modelo determina el volumen de salmueras generado en función de los recursos hídricos disponibles de aguas superficiales (Trasvase y reutilización de aguas residuales) y de parámetros tales como la proporción de agua desalada y la eficiencia media de las desaladoras del Campo de Cartagena. Datos analíticos facilitados por SACYR S.A. (1997) han permitido establecer los contenidos típicos en nitrógeno y fósforo de las salmueras. Estos aportes se incluyen en el

cálculo final de la entrada de nutrientes de origen agrícola a la laguna.

Resultados y discusión

A partir de 1979 las expectativas creadas por el Trasvase inducen un espectacular incremento del regadío en el Campo de Cartagena (Fig. 2), incluso a pesar de que los recursos trasvasados difícilmente alcanzan la mitad de los asignados legalmente (Fig 3). Sólo el reciente periodo de sequía y la fuerte reducción de los recursos trasvasados han reducido

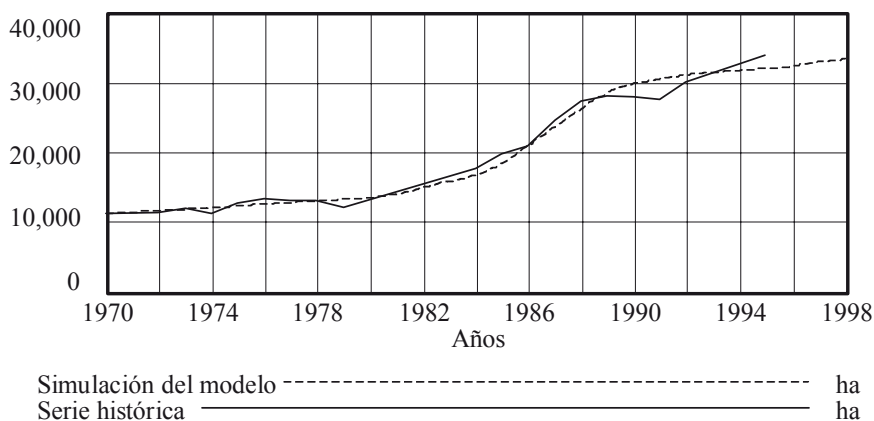


Figura 2. Evolución de la superficie de regadío en el Campo de Cartagena. Serie histórica confeccionada a partir de datos de diversas fuentes

Estimación de la contaminación agrícola en el Mar Menor mediante un modelo dinámico

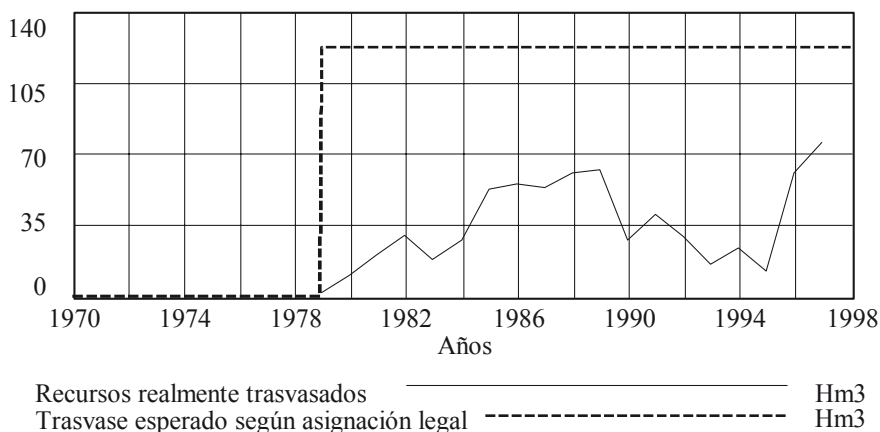


Figura 3. Evolución de los recursos trasvasados al Campo de Cartagena en relación con el volumen legalmente asignado

la elevada tasa de crecimiento experimentada hasta ese momento.

El aumento de la superficie de regadío genera un notable aumento de la entrada de nitrógeno y fósforo de origen agrícola al Mar Menor en las últimas décadas (Fig. 4) hasta situarse en la actualidad en unos valores medios anuales en torno a las 2000 toneladas anuales en el caso del nitrógeno y 60 toneladas anuales en el caso del fósforo, cifras muy importantes si se considera el volumen de la laguna, su grado de confinamiento y el origen oligotrófico de sus aguas.

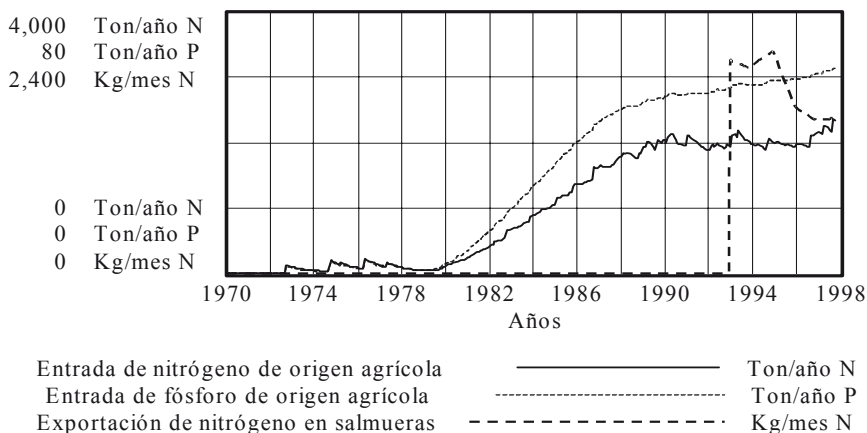


Figura 4. Simulación de la entrada de nitrógeno y fósforo de origen agrícola hacia el Mar Menor así como de la exportación de nitrógeno contenido en las salmueras.

Por otra parte, las precipitaciones importantes y avenidas reducen el tiempo de residencia de los fertilizantes agrícolas en la cuenca (Fig. 5), generando un efecto de lavado que pueda dar lugar a exportaciones masivas de nutrientes, sobretodo en el caso del nitrógeno, dada su mayor movilidad.

Esto conduce a elevadas fluctuaciones mensuales en la exportación de fertilizantes, más claramente visibles a mayor detalle temporal (Fig. 6). Así, en los últimos cinco años los meses con mayor precipitación presentan valores estimados de exportación de nitrógeno que superan los 300.000

Estimación de la contaminación agrícola en el Mar Menor mediante un modelo dinámico

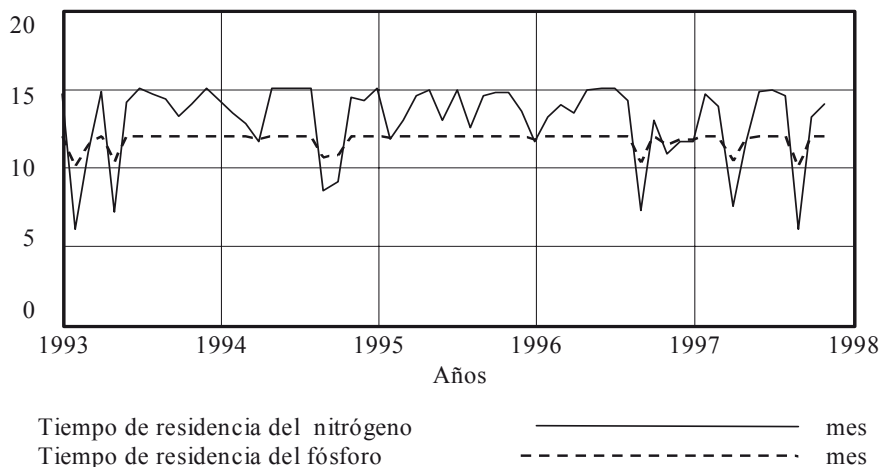


Figura 5. Simulación del tiempo de residencia del nitrógeno y fósforo en la cuenca

kg/mes, lo que representa un incremento de más del 100 % respecto a la media de dicho periodo. Durante precipitaciones elevadas y avenidas la exportación mensual de nutrientes, además de ser mucho más elevada, puede concentrarse casi en su totalidad en uno o dos días, como probablemente ocurrió en Noviembre de 1997, cuando la mayoría de los 148 mm de precipitación mensual tuvieron lugar en menos de 24 horas, generando la avenida de la Rambla del Albuñón y unos visibles arrastres hacia la laguna. En cualquier caso la exportación debida a las avenidas no debe bajar del 20% de la

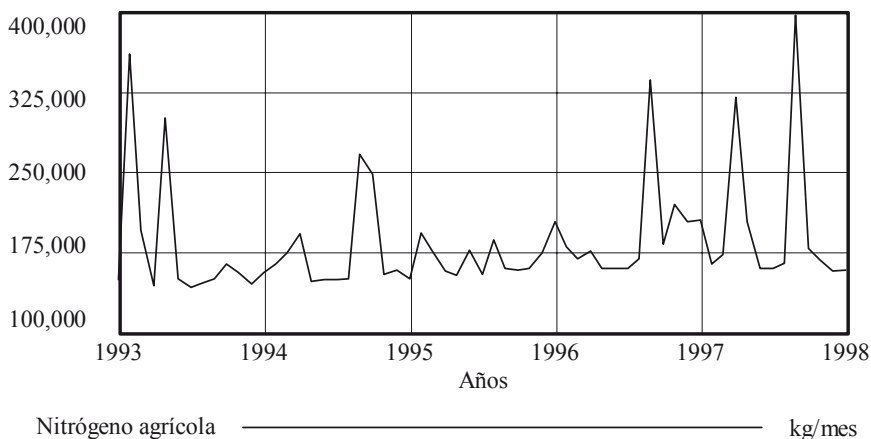


Figura 6. Evolución mensual de la entrada de nitrógeno agrícola a la laguna

entrada global. En definitiva, la exportación final de nutrientes presenta un carácter claramente dinámico que depende tanto de factores exógenos, principalmente de las precipitaciones, como de factores endógenos, como es el nivel de fertilizantes agrícolas acumulados en la cuenca.

La contribución de las salmueras a la exportación total de nutrientes es relativamente reducida en términos absolutos, si bien constituye un problema que ha crecido con inusitada rapidez en los últimos cinco años (Fig. 4) y cuyos efectos so-

Estimación de la contaminación agrícola en el Mar Menor mediante un modelo dinámico

bre la laguna no son despreciables por tratarse de un vertido concentrado y por el elevado potencial de crecimiento que presenta a corto y medio plazo, especialmente si la insuficiencia de disponibilidad hídrica vuelve a agravarse. Actualmente existe un bajo grado de funcionamiento de las plantas desaladoras, a pesar de lo cual se generan unas 11 toneladas anuales de nitrógeno y unos 635 kg anuales de fósforo contenidos en las salmueras. Si se añaden el resto de plantas existentes en el Campo de Cartagena, actualmente no conectadas, y aquellas cuya construcción está prevista, el vertido ascendería a unas 100 toneladas anuales de nitrógeno y unas 5 toneladas anuales de fósforo, un valor ya bastante significativo.

Algunas implicaciones ambientales

El sustancial incremento de la aportación de nutrientes al Mar Menor a través de las ramblas, del drenaje subsuperficial y muy recientemente del vertido de salmueras, ha empezado a alterar el carácter oligotrófico que siempre han presentado sus aguas a través de una eutrofización si bien muy inicial pero progresiva. Aunque la laguna recibe también vertidos de origen urbano, especialmente en verano debido a la mayor actividad turística, la investigación realizada hasta la fecha apunta a que la entrada de nutrientes de origen urbano supo-

ne una fracción casi marginal de la entrada de nutrientes de origen agrícola, que es con mucho la más importante.

El principal y más grave síntoma de este cambio es la gran proliferación de medusas de mediano y gran tamaño, de las especies *Cotylorhiza tuberculata* y *Rhizostoma pulmo*, un fenómeno que hizo su primera aparición hace unos cinco años y que desde entonces se ha convertido en una constante. La explosión de la población de estos escifozoos tiene lugar durante los meses estivales, en los que alcanza cifras de hasta 40 y 50 millones de individuos en toda la laguna (VVAA 1997), precisamente cuando la actividad turística del Mar Menor y su entorno es máxima, de modo que los efectos negativos de dicha proliferación sobre la calidad del baño, las actividades recreativas y la imagen turística del Mar Menor son considerables. En términos comparativos, se podría afirmar que cada hectárea de regadío del Campo de Cartagena contribuye con la generación de unas 1400 medusas en el Mar Menor en el momento de máxima población a través de la exportación de los fertilizantes agrícolas.

La proliferación estival de medusas está empezando a generar costes directos a través de diversas medidas puestas en marcha por la administración y destinadas a paliar en parte los efectos negativos de las medusas. Estas medidas consis-

Estimación de la contaminación agrícola en el Mar Menor mediante un modelo dinámico

ten fundamentalmente en la contratación durante el verano de barcos-pelícano, destinados a recoger y destruir medusas, y la instalación de redes protectoras en las zonas de baño, si bien la eficacia de tales medidas es más bien modesta, dada la extraordinaria vitalidad de la dinámica poblacional de estos escifozoos. El coste de estas medidas se eleva a unos 500 millones de pesetas para los meses de Julio y Agosto, lo que equivale a unas diez pesetas por medusa. Sin embargo, los costes indirectos (daños en la imagen turística del Mar Menor y contención o reducción de la actividad turística), más difícilmente evaluables, serán con toda seguridad mucho mayores si persiste el problema. Esto es precisamente lo que cabe esperar si no se adoptan medidas para atajar con firmeza la raíz del mismo: la masiva entrada de nutrientes derivados de los fertilizantes agrícolas.

A nivel ecológico, los procesos de eutrofización del Mar Menor resultan especialmente graves porque tanto la laguna del Mar Menor como su ribera y los humedales asociados conforman un ecosistema de excepcional valor ecológico y de características únicas en el contexto del Mediterráneo. Su riqueza pesquera es también por este motivo de gran interés. Todo estos valores quedan refrendados por los estatus de protección existentes en la zona: la Laguna y entorno del

Mar Menor han sido declarados área RAMSAR y en la zona se incluyen varios espacios protegidos por la ley 4/92 de Ordenación y Protección del Territorio de la Región de Murcia: El Parque Regional de San Pedro del Pinatar y el Paisaje Protegido de los Espacios Abiertos e Islas del Mar Menor, que incluye entre otros los humedales de Marina del Carmolí y Playa de la Hita.

En este sentido, hay que señalar que la proliferación de medusas, que tanto preocupa a la opinión pública y a la administración regional, no es más que un indicador de un proceso de eutrofización, que es la verdadera amenaza para la laguna. La contención o reducción de la población de medusas, si no va acompañada de medidas que atajen la contaminación agrícola difusa, no conseguirá eliminar los problemas de fondo, que podrían manifestarse recurrentemente a través de otros indicadores como proliferaciones masivas de microorganismos, algas y diversos invertebrados coloniales, un fenómeno ya registrado puntualmente con anterioridad en el Mar Menor. Los procesos de eutrofización están suponiendo una progresiva banalización de la laguna y ecosistemas asociados, si bien el impacto de tal eutrofización sobre las distintas especies puede ser de muy diferente signo, por lo que es necesaria una perspectiva global en su análisis. Por ejemplo,

Estimación de la contaminación agrícola en el Mar Menor mediante un modelo dinámico

las aguas ricas en nutrientes favorecen a algunas especies de aves acuáticas como el Cormorán grande (*Phalacrocorax carbo*) y el Somormujo lavanco (*Podiceps cristatus*) hasta el punto de que son consideradas como excelentes indicadores de eutrofización (Margalef 1982). En este sentido, es interesante señalar que se ha encontrado una relación estadísticamente muy significativa (r^2 ajustada = 0.67, $p < 0.00001$) entre las estimas de aportes de nitrógeno desde 1972 a la actualidad generadas por el modelo y el número de individuos invernantes censados anualmente de Cormorán grande. La correlación con el incremento de la población censada de Somormujo lavanco es asimismo significativa (r^2 ajustada = 0.32, $p < 0.007$).

En este contexto cobran toda su importancia diversas iniciativas tanto correctoras como preventivas encaminadas a minimizar el flujo de nutrientes a la laguna. Como medidas correctoras destaca el proyecto llevado a cabo por la Confederación Hidrográfica del Segura de reutilización parcial de los drenajes agrícolas para utilizarlos de nuevo, previa desalación, como agua de riego. Este proyecto supondrá una vez en marcha la recirculación de aproximadamente el 10% de los fertilizantes contenidos en los drenajes agrícolas, aunque no logrará su eliminación efectiva. No obstante la Confede-

ración ha encargado recientemente un estudio (Vidal-Abarca et al 1998) a la Universidad de Murcia que revela la viabilidad de la utilización de dos humedales naturales todavía funcionales del entorno de la laguna (Marina del Carmolí y Playa de la Hita) para la retención y eliminación del nitrógeno y fósforo de diversas fuentes, fundamentalmente de las salmueras y de parte de los drenajes agrícolas, a la vez que se potencian los valores ecológicos y naturalísticos de dichos humedales.

Junto a la medidas correctoras comentadas son necesarias otras medidas de carácter preventivo como la reducción de los aportes o la adopción de un código de buenas prácticas agrarias en el Campo de Cartagena, código que por otra parte será necesario si es declarado como Zona Vulnerable por generar contaminación agrícola por nitratos según el R.D. 261/1996. Otras medidas igualmente imprescindibles pasan por la aprobación de las Directrices de Ordenación del Mar Menor, la regulación de los usos turísticos, residenciales y agrícolas en el Mar Menor y su entorno, la exclusión de nuevos incrementos de la superficie de regadío así como la rehabilitación ambiental y ecológica tanto del Campo de Cartagena como del litoral.

En definitiva, el Mar Menor y su entorno constituye un sistema complejo en el que diversos sectores socioeconómicos

Estimación de la contaminación agrícola en el Mar Menor mediante un modelo dinámico

intensivos conviven y son sostenidos por un medio natural que sigue conservando un alto valor ecológico, si bien amenazado. Por ello aportar soluciones para sus múltiples problemas, algunos de los cuales han sido discutidos en el presente trabajo, demanda enfoques integrales y de suficiente alcance, desgraciadamente poco usuales.

Referencias bibliograficas

- AGENCIA DE MEDIO AMBIENTE. 1991. DALAGUA: Un modelo de Dinámica de Sistemas para la Comarca de Dalías. En *Recursos Naturales y Crecimiento Económico en el Campo de Dalías*. AMA. Sevilla. 179-209.
- CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL SEGURA. 1997. *Proyecto de Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura*
- DIEZ, J.A ; ROMAN, R ; CABALLERO, R ; CABALLERO, A. 1997. Nitrate leaching from soils under a maize-wheat-maize sequence, two irrigation schedules and three type of fertilisers. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 65 : 189-199
- GUIMERA, J ; MARFÀ, O ; CANDELA, L ; SERRANO, LYDIA. 1995. Nitrate leaching and strawberry production under drip irrigation management. *Journal of Environmental Quality*, 56 : 121-135.
- JORDAN, E ; CORRELL, D ; WELLER D. 1997. Effects of agriculture on Discharges of Nutrients from Coastal Plain Watersheds of Chesapeake Bay. *Journal of Environmental Quality*, 26 : 836-848

- LIU, F ; MITCHELL, C ; HILL D.T ; ODOM, J.W ; ROCHESTER, E.W. 1997. Phosphorus Recovery in Surface Runoff from Swine Lagoon Effluent by Overland Flow. *Journal of Environmental Quality*, 26 : 995-1001
- LÓPEZ-GÁLVEZ, J. Y NAREDO, J.M. 1996. *Sistemas de producción e incidencia ambiental del cultivo en suelo enarenado y en sustratos*. Fundación Argentaria. Visor Distribuciones S.A. 294 pp
- MARGALEF, R. 1982. *Ecología*. Ediciones Omega. Barcelona. 951 pp.
- MORENO, F. ; CAYUELA, J.A. ; FERNANDEZ, J.E. ; FERNÁNDEZ-BOY, E. ; MURILLO, J.M. ; CABRERA, F. 1996. Water Balance and nitrate leaching in an irrigated maize crop in SW Spain. *Agricultural Water Management*, 32 : 71-83.
- PAABY, H; JENSEN, JJ; KRISTENSEN, P; MOLLER, F; SKOP, E. 1995. Reducing Nutrient Loadings of Marine Waters: A Cost Effectiveness Analysis. En: *Modelling the Economy and the Environment*. Springer. Berlin.
- RINCÓN L, GÓMEZ, M.D. 1996. Fertilización del brócoli y de la lechuga Iceberg. *HortoInformación*, 71. 33-36.
- ROBERTS, N.; ANDERSEN, D.F.; DEAL, R.M.; GRANT, M.S.; SCHAFFER, W.A. 1983. *Introduction to Computer Simulation: The System Dynamics Modelling Approach*. Reading: Addison-Wesley.

Estimación de la contaminación agrícola en el Mar Menor mediante un modelo dinámico

- RUTH, M. 1995. A system dynamic approach to modelling fisheries management issues: Implications for spatial dynamics and resolution. *System Dynamic Review*. Vol. 11 , 3, 233-243
- SACYR SA. 1997. *Análisis y Caudales de los drenajes y ramblas del Campo de Cartagena*. (Datos no publicados).
- SANTOS, D.V; SOUSA, P.L.; SMITH, R.E. 1997. Model simulation of water and nitrate movements in a level basin under fertigation treatments. *Agricultural water management*, 32, 293-306.
- VARIOS AUTORES. 1997. *Estudio de la dinámica de las poblaciones de medusas en el Mar Menor, problemática asociada y búsqueda de soluciones*. Informe técnico no publicado.
- VENNIX, J. A. M. 1996. *Group Model Building. Facilitating Team Learning Using System Dynamics*. Chichester: Wiley.
- VENTANA SYSTEMS INC. 1994. *VENSIM®. Ventana Simulation Environment. Reference Manual*. USA.
- VERHAGEN, J. 1997. Site specific fertiliser application for potato production and effects on N-leaching using dynamic simulation modelling. *Agriculture Ecosystems & Environment*. 66, 165-175.
- VIDAL-ABARCA, M.R.; ESTEVE, M.A.; SUÁREZ, M.L.; GÓMEZ, R.; ROBLEDANO, F.; MARTINEZ, J.; MARTÍNEZ, B. 1998. *Análisis de viabilidad del uso de humedales para mitigar el efecto de los vertidos y drenajes agrícolas al Mar Menor*. Informe técnico para la Confederación Hidrográfica del Segura.

Apéndice con las principales variables del modelo

AGUAREUT = Volumen mensual de aguas residuales reutilizadas para riego

AGUASUB = Volumen de aguas subterráneas

AGUASUP = Volumen de aguas superficiales (residuales y del Traspase)

CRETN = Coeficiente de retención del nitrógeno

CRETN = Coeficiente de retención del fósforo

DEMANDA = Demanda total de agua

DESALAC = Volumen de agua desalada

DOTMENSUAL = Dotación mensual de agua

ENTRADAN = Nitrógeno no retenido en la cuenca y movilizable hacia la laguna

ENTRADAP = Fósforo no retenido en la cuenca y movilizable hacia la laguna.

EXPEC = Existencia de expectativas de nuevos recursos hídricos por el Traspase Tajo-Segura.

INCLIBRE = Incremento del regadío al aire libre

INCREINV= Incremento de los invernaderos

NAGFIN = Flujo de nitrógeno que llega a la laguna incluyendo las salmueras

Estimación de la contaminación agrícola en el Mar Menor mediante un modelo dinámico

NAGMM = Flujo de nitrógeno que llega a la laguna por vía superficial y subsuperficial

NAGRICUENCA = Nitrógeno agrícola no retenido y movilizable hacia la laguna

NAPOR = Nitrógeno aportado por todo el regadío

NLIXIV = Nitrógeno total lixiviado mensualmente

NRESIDTAB = Efecto de la precipitación sobre el tiempo de residencia del nitrógeno en la cuenca

NSALMU = Nitrógeno contenido en la salmuera

NTRESID = Tiempo de residencia del nitrógeno en la cuenca

PAGFIN = Flujo de fósforo que llega a la laguna incluyendo las salmueras

PAGMM = Flujo de fósforo que llega a la laguna por vía superficial y subsuperficial

PAGRICUENCA = Fósforo agrícola no retenido y movilizable hacia la laguna

PAPOR = Fósforo aportado por todo el regadío

PLIXIV = Fósforo lixiviado por el regadío

PREMEN = Precipitación mensual. Variable exógena

PRENORMAL = Precipitación mensual media

PRERESID TAB = Efecto de la precipitación en el tiempo de residencia del fósforo en la cuenca

PROPREG = Regadío existente respecto a la superficie máxima

PSALMU= Fósforo contenido en las salmueras

PTRESID = Tiempo de residencia del fósforo

REGINV = Superficie ocupada por invernaderos

REGLIBRE = Superficie de regadío al aire libre

REGTOTAL = Regadío total: aire libre e invernaderos

SALMUERA = Volumen de salmuera generado

TINEXPEC = Tasa de incremento del regadío cuando existen expectativas generadas por el trasvase

TINSIN = Tasa de incremento del regadío cuando no existen expectativas

TINVER = Tasa de incremento de los invernaderos.

TNINV = Nitrógeno aportado en los invernaderos

TNLIBRE = Nitrógeno aportado en el regadío al aire libre

TNLIXIV = Coeficiente de lixiviación del nitrógeno

TNSALMU = Concentración de nitrógeno en salmueras

TPINV = Fósforo aportado en invernaderos

TPLIBRE = Fósforo aportado en el regadío al aire libre

TPLIXIV = Coeficiente de lixiviación del fósforo

TPSALMU = Concentración de fósforo en salmueras

Estimación de la contaminación agrícola en el Mar Menor mediante un modelo dinámico

TRASEFEC = Traslase real respecto al asignado

TRASVASE = Recursos aportados por el Traslase.

Variable exógena