



Región de Murcia  
Consejería de Agua, Agricultura y Medio Ambiente  
Oficina de Impulso Socioeconómico del Medio Ambiente



**Espacios  
Naturales** Región  
de Murcia

# **INFORME INTEGRAL SOBRE EL ESTADO ECOLÓGICO DEL MAR MENOR**

***Comité de Asesoramiento Científico del Mar Menor***

**6 de febrero de 2017**



Región de Murcia  
Consejería de Agua, Agricultura y Medio Ambiente  
Oficina de Impulso Socioeconómico del Medio Ambiente



**Espacios  
Naturales** Región  
de Murcia



## Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor

# Índice

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
<b>1. HIDROGEOLOGÍA</b>	<b>7</b>
1.- INTRODUCCIÓN	8
2.- ACUÍFEROS EXISTENTES EN EL CAMPO DE CARTAGENA	8
3.- FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO Y BALANCE HÍDRICO	10
4.- ACUÍFEROS EN CONEXIÓN CON EL MAR MENOR.	14
5.- CONTAMINACIÓN POR NITRATOS Y OTRAS SUSTANCIAS	17
6.- CONSIDERACIONES SOBRE LOS APORTES SUPERFICIALES VISIBLES A TRAVÉS DE LA RAMBLA DEL ALBUJÓN Y RELACIÓN ACUÍFERO-RAMBLA.	19
7.- CONSIDERACIONES SOBRE LA MITIGACIÓN DE LOS IMPACTOS.	20
REFERENCIAS	22
<b>2. ECOLOGÍA LAGUNAR</b>	<b>23</b>
1.- INTRODUCCIÓN	24
2.- CAUSAS DEL ESTADO ECOLÓGICO Y SITUACIÓN DE PARTIDA.	24
ANTECEDENTES Y PRIMEROS ESTUDIOS	29
SÍNTESIS DE LOS PRINCIPALES PROCESOS Y CAMBIOS EXPERIMENTADOS QUE AFECTAN A LA ECOLOGÍA LAGUNAR	31
3. DEFINICIÓN DEL ESTATUS DE LA CALIDAD DEL AGUA Y DEL PROCESO DE EUTROFIZACIÓN.	34
CAMBIOS EN LA ENTRADA DE NUTRIENTES Y EN EL ESTADO TRÓFICO	36
FITOPLANCTON	38
4. DEFINICIÓN DEL GRADO DE ALTERACIÓN DE LOS HÁBITATS Y LA BIODIVERSIDAD	40
REPERCUSIONES EN LA ACTIVIDAD PESQUERA	44
FITOPLANCTON	47
5. PROGNOSIS DE LAS RESPUESTAS ECOLÓGICAS DEL ECOSISTEMA. DIRECTRICES PARA LA PREVENCIÓN Y MINIMIZACIÓN DE LAS PRESIONES Y PARA LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DE LA LAGUNA.	49
DIRECTRICES PARA LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DE LA LAGUNA:	54
LÍNEAS DE ACTUACIÓN QUE AYUDARÍAN A MITIGAR LA SITUACIÓN ACTUAL EN LA LAGUNA (INCLUYENDO SU ORDEN DE PRIORIDAD).	57
6. INDICADORES DE SEGUIMIENTO. SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN RÁPIDA DE LA RESPUESTA DEL ECOSISTEMA A LAS MEDIDAS DE ACTUACIÓN Y GESTIÓN.	58
REFERENCIAS	60
<b>3. OCEANOGRAFÍA FÍSICA Y QUÍMICA</b>	<b>71</b>
1. DESCRIBIR EL ESTADO DEL CONOCIMIENTO	72
A) HIDRODINÁMICA LAGUNAR	72
B) PROCESOS DE LA COLUMNA DE AGUA Y SU DINÁMICA DE NUTRIENTES Y METALES PESADOS	74
C) PROCESOS EN EL SEDIMENTO Y SU DINÁMICA DE NUTRIENTES Y METALES PESADOS	75
D) INTERACCIÓN AGUA-SEDIMENTO	76
2. IDENTIFICAR Y TIPIFICAR LOS IMPACTOS QUE RECIBE LA LAGUNA	77
A) HIDRODINÁMICA LAGUNAR.	77
B) PROCESOS DE LA COLUMNA DE AGUA Y SU DINÁMICA DE NUTRIENTES Y METALES PESADOS. LA ENTRADA DE NITRATOS, FOSFATOS Y OTROS ELEMENTOS POR ESCORRENTÍAS SUPERFICIALES, AGUAS SUBTERRÁNEAS Y VERTIDOS DIRECTOS A LA LAGUNA FAVORECE LA PROLIFERACIÓN.	77
C) PROCESOS EN EL SEDIMENTO Y SU DINÁMICA DE NUTRIENTES Y METALES PESADOS.	77
D) INTERACCIÓN AGUA-SEDIMENTO.	78



## *Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor*

<b>3. PRINCIPALES LAGUNAS DE CONOCIMIENTO EN ESTE CAMPO.</b>	<b>79</b>
A) HIDRODINÁMICA LAGUNAR.	79
B) PROCESOS DE LA COLUMNA DE AGUA Y SU DINÁMICA DE NUTRIENTES Y METALES PESADOS.	80
C) PROCESOS EN EL SEDIMENTO Y SU DINÁMICA DE NUTRIENTES Y METALES PESADOS.	81
D) INTERACCIÓN AGUA-SEDIMENTO.	82
<b>4. LÍNEAS DE ACTUACIÓN QUE AYUDARÍAN A MITIGAR LA SITUACIÓN ACTUAL EN LA LAGUNA (INCLUYENDO ORDEN DE PRIORIDAD).</b>	<b>82</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>84</b>
<b>4. CUENCA VERTIENTE Y HUMEDALES LITORALES</b>	<b>87</b>
<b>1- ESTADO AMBIENTAL DE LA CUENCA VERTIENTE. EVOLUCIÓN, ESTADO ACTUAL Y CAUSAS</b>	<b>88</b>
<b>2.- IMPACTOS DE LA CUENCA SOBRE LA LAGUNA</b>	<b>93</b>
<b>3- PAPEL DE LOS HUMEDALES LITORALES EN LA DINÁMICA DE LOS NUTRIENTES, AFECCIONES A LOS HÁBITATS Y BIODIVERSIDAD Y SOBRE LAS AVES ACUÁTICAS DEL MAR MENOR</b>	<b>95</b>
<b>4- DIRECTRICES PARA LA PREVENCIÓN Y MINIMIZACIÓN DE LAS PRESIONES. SUGERENCIAS Y MEDIDAS CAUTELARES</b>	<b>98</b>
4.1. CONTENCIÓN Y REORDENACIÓN DE LA SUPERFICIE DE REGADÍO EN LA CUENCA DEL MAR MENOR	99
4.2. REDUCCIÓN EN ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN AGRARIA, EN CORRESPONDENCIA CON LA DECLARACIÓN DEL CAMPO DE CARTAGENA COMO ZONA VULNERABLE A LA CONTAMINACIÓN POR NITRATOS	99
4.3. APLICACIÓN DE MEDIDAS BASADAS EN LA NATURALEZA (NATURE-BASED SOLUTIONS) EN EL CONJUNTO DE LA CUENCA	100
4.4. RECUPERACIÓN DE SUPERFICIES DE HUMEDAL NATURAL EN LAS PROXIMIDADES DE LA LAGUNA	100
4.5. PUESTA EN MARCHA DE MEDIDAS PARA MITIGAR LA CONTAMINACIÓN POR RESIDUOS MINEROS	100
<b>5.- SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN DE LAS MEDIDAS DE ACTUACIÓN Y GESTIÓN</b>	<b>101</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>103</b>
<b>5. DEPURACIÓN Y DESCONTAMINACIÓN DE AGUAS</b>	<b>113</b>
<b>1. IDENTIFICAR Y TIPIFICAR LOS CONTAMINANTES QUE RECIBE EL MAR MENOR, ASÍ COMO SUS FUENTES:</b>	<b>114</b>
<b>2. ASESORAR EN LAS MEDIDAS DE GESTIÓN PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINANTES EN LOS DISTINTOS AFLUENTES DE LA LAGUNA, PROPONIENDO LAS MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES (MTD). (NITRATOS)</b>	<b>116</b>
A) DESCONTAMINACIÓN Y DEPURACIÓN DE AGUAS SUPERFICIALES	116
B) DESCONTAMINACIÓN Y DEPURACIÓN DE AGUAS PROFUNDAS	120
<b>CONCLUSIONES AL INFORME</b>	<b>122</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>124</b>

## 4. Cuenca Vertiente y Humedales Litorales

***Autores del Informe:***

Álvarez Rogel, José  
Esteve Selma, Miguel Ángel  
Faz Cano, Ángel  
Gómez Cerezo, Rosa  
León León, Víctor Manuel  
Martínez Fernández, Julia  
Martínez Sánchez, María José

***Compiladores del Informe:***

Esteve Selma, Miguel Ángel  
Martínez Fernández, Julia

***Miembros del Grupo de Trabajo "Cuenca Vertiente y Humedales Litorales":***

Álvarez Rogel, José (UPCT)  
Caravaca Rueda, Domingo Luís (DG Ordenación del Territorio – CARM)  
Esteve Selma, Miguel Ángel (UMU)  
Faz Cano, Ángel (UPCT)  
García Aróstegui, José Luis (IGME)  
Gómez Cerezo, Rosa (UMU)  
Gonzalez Barberá, Gonzalo (CEBAS-CSIC)  
León León, Víctor Manuel (IEO)  
Manovel García, José Luís (OISMA-CARM)  
Martínez Fernández, Julia (Fundación Nueva Cultura del Agua)  
Martínez Sánchez, María José (UMU)  
Suarez Guillén, María Amparo (DG Transportes, Costas y Puertos – CARM)  
Vicente García, José Ramón (DG Agua – CARM)

***Coordinador OISMA del Grupo de Trabajo***

Martínez Sánchez, José (Orthem)

## *Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor*

# **1- Estado ambiental de la cuenca vertiente. Evolución, estado actual y causas**

El Mar Menor es una zona crítica ambiental afectada, entre otros factores, por un clima árido-semiárido, lluvias torrenciales de gran intensidad, vegetación escasa, gestión del suelo inadecuada y cultivos intensivos. Existen diversos trabajos de revisión de los impactos en el Mar Menor y su entorno, que abarcan tanto aspectos del interior de la laguna como de las zonas circundantes (Véanse por ejemplo, los de Conesa y Jiménez-Cárceles, 2007 y Conesa y Schulín, 2010). A continuación se presentan sucintamente los procesos relativos a la cuenca.

Los núcleos urbanos e industriales en el entorno del Mar Menor constituyen una de las fuentes de contaminación a considerar. Puede consultarse la situación de ámbitos y sectores con especial potencial edificatorio incluidos en el Sistema de Información Urbana en la publicación "Sectorres Residenciales en España 2014", del Ministerio de Fomento (<https://www.fomento.gob.es/MFOM.CP.Web/detallepublicacion.aspx?idpub=BAW035>), el cual incluye a todos los municipios de la cuenca vertiente al Mar Menor excepto Los Alcázares. El desarrollo urbano-turístico ha dado lugar a un importante volumen de aguas residuales, parte del cual ha vertido a la laguna hasta fechas muy recientes, aportando contaminación orgánica y de nutrientes. Son necesarios estudios detallados y actualizados para caracterizar con precisión la evolución histórica y reciente y situación actual de las aguas residuales de las plantas depuradoras en relación con el grado de reutilización en usos agrarios y con su incidencia, así como el estado del saneamiento y la posible persistencia de algunas viviendas no conectadas a la red. En cualquier caso, cabe afirmar que, si bien en los últimos años las mejoras en saneamiento y depuración han reducido mucho los vertidos urbanos al Mar Menor, persisten algunos problemas ligados a deficiencias en las infraestructuras de depuración y redes de saneamiento, que se ponen de manifiesto en época estival y durante episodios de grandes lluvias, cuando la capacidad de las depuradoras queda superada o se generan roturas que ocasionan vertidos ocasionales.

La degradación física, química y biológica de los suelos de la cuenca (Martínez Sánchez y Pérez Sirvent, 2005, 2009; Mantilla, 2010) está contribuyendo a la erosión hídrica de los horizontes superficiales, arrastrando a la laguna sedimentos, nutrientes, plaguicidas, arsénico y metales pesados. Estos materiales (solubles y particulados) proceden mayoritariamente de suelos con escasa vegetación, cultivos intensivos, compactados, poco permeables. Entre las prácticas agrarias que favorecen la erosión figuran los grandes movimientos de tierra, la conversión de secanos a regadíos intensivos, prácticas de cultivo inadecuadas como el arado perpendicular a la pendiente facilitando las escorrentías hacia el Mar Menor, la compactación superficial y subsuperficial (suela de labor), la modificación o eliminación de ramblas y ramblizos, la eliminación de los bancales y de las franjas vegetales de contención de sedimentos, así como las insuficientes actuaciones de recuperación de antiguos cauces de ramblas y de la vegetación natural en la cuenca y los propios cauces.

En las zonas mineras abandonadas, que influyen en el arco sur del Mar Menor, la erosión hídrica es muy importante, no sólo en cárcavas y regueros, sino con desplazamiento en masa. El mayor riesgo se da en taludes cargados en estériles mineros, donde hay materiales desprovistos de vegetación, de textura muy fina, arcillo limosa, con alta carga contaminante en arsénico y metales pesados, solubles y particulados, que se dispersan, con el agua de lluvia por las ramblas, y pueden llegar al Mar Menor en lluvias torrenciales (Navarro Hervas, 2004; Navarro Hervas *et al.*, 2006; García Lorenzo, 2009; Martínez López, 2010). Un caso de aporte importante, tanto soluble como particulado, por su proximidad a la orilla del mar, es la balsa de vertidos directos de lodos mineros

## *Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor*

de Lo Poyo. En esta zona, existen áreas de pH ácido donde la solubilidad de los metales es elevada, lo que permite frecuentemente el aporte de metales solubles procedentes de las eflorescencias que aparecen por evaporación de las aguas de poro en los horizontes superiores (Martínez Sánchez y Pérez Sirvent, 2009b, 2014).

Una problemática especial es la erosión hídrica en suelos rojos (Xerosoles lúvicos- Luvisoles cálcicos). Estos suelos tienen horizontes argílicos Bt, muy arcillosos (con partículas de arcilla fina y muy fina menores de una micra), descarbonatados. Su composición mineralógica mayoritaria es de filosilicatos (silicatos laminares), y con muy abundantes geles de hierro, amorfos. Además han sufrido grandes transformaciones por movimiento de tierras, y dichos horizontes se encuentran incluso en superficie (Aoukour, 2002). Cuando las prácticas de cultivo son inadecuadas, se erosionan, como ha sucedido en las tormentas de los últimos años, 2015, 2016 y 2017, en la zona de Mar de Cristal, Los Nietos, Islas menores, Camping Caravanig, etc. Todo ello tiene una influencia decisiva en la degradación ambiental del Mar Menor en la última etapa, ya que influye en la turbidez y, por tanto, en el paso de luz al fondo marino e impide la fotosíntesis. (Martínez Sánchez *et al.* 2017 en ejecución).

Los principales procesos de degradación química de suelos de la cuenca vertiente que influyen en la contaminación del Mar Menor son salinización, alcalinización y contaminación por elementos potencialmente tóxicos, arsénico y metales pesados. Se ha llevado a cabo una monitorización en el Campo de Cartagena, comparando dos periodos de tiempo, 1993, 2003, con el fin de observar la velocidad de los procesos; según dichos resultados, por salinización, en numerosos puntos de muestreo se concentran sales solubles, como cloruros, sulfatos, nitratos y fosfatos de alcalinos y alcalinotérreos en los horizontes superficiales del suelo, susceptibles de ser arrastradas por las aguas de escorrentía al mar (Martínez Sánchez y Pérez Sirvent, 2005, 2009; Mantilla, W., 2010; Martínez Sánchez *et al.*, 2011), fundamentalmente fosfatos, que quedan ligados al suelo por diferentes mecanismos (adsorción, precipitación, co-precipitación), aunque también nitratos, que sin embargo no se acumulan en el suelo de forma significativa al ser lixiviados por su carga negativa, salvo en casos muy especiales en los que haya acúmulos de fertilizantes inorgánicos.

Las causas de estos procesos son varias. La sequía que padece toda la Región junto a la escasez de recursos hídricos para riego, ha llevado a utilizar aguas subterráneas de mala calidad. Su alta concentración en sales se debe, en parte, a factores hidrogeológicos intrínsecos de los acuíferos, además, a no haber suficiente recarga por la escasez de lluvias, y a la sobreexplotación de los pozos a lo largo del tiempo. En tiempos atrás, también se han utilizado para riego aguas de depuración muy mineralizadas, actualmente este tipo de aguas ha mejorado. La proliferación de desaladoras pequeñas ha mejorado la calidad del agua de riego, pero al no existir salmueroductos, la gestión de las salmueras es mala. Además en muchas ocasiones hay una gestión insuficiente de los drenajes, que salinizan las zonas colindantes, y vierten a ramblas que van al mar. En los suelos alcalinizados, la arcilla del suelo se satura en sodio de cambio, tiene lugar una hidrólisis alcalina, aumenta el pH por encima de 8,5. La arcilla se encuentra dispersa, el suelo se hace bastante impermeable y se compacta, aumentando el riesgo de erosión. Este proceso sucede en gran parte de los suelos rojos del arco sur de la laguna. Por otro lado, la escasez y el precio del agua, provoca que se riegue por goteo con menos cantidad de agua de la que sería necesaria en función del tipo de suelo, de la calidad del agua, para que no haya salinización y/o alcalinización. Por este motivo, en suelos muy arcillosos, suelos rojos, se ha producido alcalinización, lo que favorece el aporte de sedimentos a la laguna.

Otros de los materiales que han afectado negativamente a la laguna y sus humedales litorales son los residuos procedentes de las actividades mineras. La presencia de residuos mineros con elevado contenido en metales/oides (sobre todo Zn, Pb, Cd, Mn, Fe, Cu y As en el Mar Menor y su entorno, procedentes de los arrastres de la Sierra Minera de la Unión), es bien conocida desde



## *Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor*

hace décadas. Los metales pesados y el arsénico, solubles y particulados, influyen en el área del arco sur de la cuenca. Existe una contaminación primaria, secundaria y terciaria, en gradiente negativo desde la Sierra Minera, con valores muy por encima de los niveles genéricos de referencia del Campo de Cartagena (Martínez Sánchez y Pérez Sirvent, 2007; Pérez Sirvent *et al.*, 2009). Es de resaltar que los suelos rojos tienen alto contenido geogénico de metales pesados. Existe una atenuación de la contaminación hacia el Mar Menor, debido a la disminución de la solubilidad de los compuestos de arsénico y metales pesados, por sus reacciones con el carbonato cálcico de los suelos carbonatados de las zonas circundantes a dichas explotaciones mineras, además de con compuestos de hierro y otros. Dicha atenuación con carbonatos no tiene lugar en contacto con suelos rojos descarbonatados por lo que en estas zonas aumenta el riesgo de que lleguen metales pesados al mar Menor sin neutralizar. Estos contaminantes alcanzan la laguna con lluvias torrenciales (Navarro Hervás, 2004; Navarro Hervás *et al.*, 2006; García Lorenzo, 2009; Martínez López, S., 2010). En el arco sur, desde las proximidades de la rambla de Miranda hasta la rambla de Atamaría- la Carrasquilla, se ha llevado a cabo un amplio estudio geoquímico y de simulaciones de movilización de arsénico y metales pesados, en diferentes condiciones ambientales (con agua de lluvia, condiciones oxidantes, condiciones complejantes y reductoras, contacto con aguas ácidas, transferencia a las plantas (García Lorenzo *et al.*, 2012b, 2014a, 2014b, 2014c, 2016; Martínez López, S., 2009; Martínez López, S. *et al.* 2014; Martínez Sánchez *et al.*, 2012, 2013; Navarro Hervás *et al.*, 2006, 2012; Pérez Sirvent *et al.*, 2012, 2015).

En lo relativo a la problemática de los metales pesados y riesgos de movilización el grupo de investigación Gestión, Aprovechamiento y Recuperación de Suelos y Aguas (GARSA) de la UPCT lleva trabajando desde hace años en la rehabilitación de paisajes mineros mediante la creación de tecnosuelos (suelos artificiales), estrategia mediante la cual se consiguen inmovilizar metales (y por tanto reducir su toxicidad) y generar un suelo fértil que permite el desarrollo de la vegetación, reduciendo el impacto negativo ambiental y riesgos sobre la salud pública. El grupo GARSA ha llevado a cabo ensayos de laboratorio a pequeña escala, experiencias en campo en parcela a mediana escala, y ensayos en campo a gran escala de rehabilitación de depósitos de lodos de flotación. El objetivo siempre es el mismo, probar una estrategia, técnica y económicamente viable, mediante la cual se consiga minimizar los riesgos ambientales y de salud pública asociados a la presencia de residuos mineros. Estos residuos cargados en metales y en muchos casos con elevada acidez son transportados por escorrentía superficial y por el viento, afectando a zonas y poblaciones adyacentes y al Mar Menor como se mencionaba en el párrafo anterior. En consecuencia, para reducir los riesgos, es necesario limitar la transferencia de metales contaminantes, siendo una alternativa eficiente y económica la creación de tecnosuelos. Éstos favorecen la inmovilización de los metales, sobre todo Zn, Pb, Cd, Cu y As, que precipitan y ya no son movilizados por las aguas de lluvia ni absorbidos en grandes proporciones por microorganismos y vegetación. A su vez, la formación de suelos de calidad estructurados, que permiten el desarrollo de la vegetación, reduce las tasas de erosión, tanto hídrica como eólica, de manera que los metales quedan retenidos in situ formando un nuevo paisaje con vegetación con bajas tasas de transferencia de contaminantes a las zonas adyacentes. La creación de tecnosuelos se consigue mediante la adecuada selección de diferentes materiales de origen antrópico, en función de las características del residuo minero, que garanticen la inmovilización de los metales, el incremento de nutrientes y materia orgánica y la formación de agregados estables que aseguren la buena estructuración del suelo. En las experiencias llevadas a cabo en la Sierra Minera se han conseguido resultados satisfactorios con la aplicación de residuo de mármol, residuos de canteras de áridos, biocarbón, compost, estiércol o purín. Para asegurar el éxito de la rehabilitación, además de la creación de tecnosuelos se ha procedido a la aplicación de fitotecnologías como la fitoestabilización, que consiste en utilizar plantas autóctonas capaces de crecer en los tecnosuelos recién creados, y que favorecen a su vez la precipitación de metales en la rizosfera, la estimulación de comunidades microbianas edáficas que favorezcan la agregación y estabilización de la materia



## *Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor*

orgánica, y la acumulación de metales en la raíces sin que pasen a la parte aérea. La fitestabilización asistida con creación de tecnosuelos se ha aplicado a gran escala en depósitos de lodos de flotación con resultados exitosos en cuanto a inmovilización de nutrientes, incremento de la cobertura vegetal y la biodiversidad, y reducción de las tasas de erosión (Acosta *et al.*, 2011; Martínez *et al.*, 2011; Zornoza *et al.*, 2012; , Kabas *et al.*, 2012; Zornoza *et al.*, 2013; Zanuzzi *et al.*, 2013; Kabas *et al.*, 2014; Kabas *et al.*, 2015; Zornoza *et al.*, 2016a; Zornoza *et al.*, 2016b; Parra *et al.*, 2016), detallado en las patentes PCT/ES2015/070061, ES 2 450 090 B1 y ES 2 474 919.

En relación con los humedales litorales, los residuos mineros se localizan, fundamentalmente, en la Marina del Carmolí (arrastrados por la Rambla del Miedo), la Lengua de la Vaca (arrastrados por la Rambla de la Carrasquilla) y, sobre todo, el Saladar de Lo Poyo (arrastrados por las ramblas del Beal y Ponce) y las zonas aguas arriba de éste afectadas por los desbordamientos de las dos ramblas citadas. En estudios de campo se evaluaron las concentraciones de metales en suelos y plantas, y en sedimentos sumergidos y organismos bentónicos junto a las playas, en la Marina del Carmolí y el Saladar de Lo Poyo, haciendo hincapié en las relaciones entre la distribución de la vegetación y las condiciones de los suelos, la biodisponibilidad de los metales y los efectos de las plantas sobre dicha disponibilidad, y se hicieron recomendaciones para el manejo de estos ambientes (Álvarez-Rogel *et al.*, 2004; Conesa *et al.*, 2011, 2014; María-Cervantes *et al.*, 2009; Marín-Guirao *et al.*, 2005a, b y c). Todos estos estudios demostraron que una proporción de los metales se encuentran biodisponibles y están siendo asimilados por los organismos y por tanto existe un riesgo para la cadena trófica. Otras investigaciones llevadas a cabo (García Lorenzo, 2014 a, 2014c; Martínez López *et al.* 2014; Martínez Sánchez *et al.*, 2013) ponen de manifiesto la gran variabilidad existente en la bioaccesibilidad del arsénico y metales pesados por las plantas, por animales de vida silvestre, y por ingesta de las personas en función de la granulometría y la mineralogía de los sedimentos existentes, pasando de ser inertes a peligrosos. Es de resaltar la gran bioaccesibilidad oral que tienen los compuestos carbonatados de metales pesados, particularidad a tener en cuenta en las metodologías de recuperación de suelos contaminados. Por otra parte, es de destacar la presencia de As(III) junto a As(V) en las zonas de humedales contaminadas en mayor abundancia que en el resto de la cuenca vertiente (Martínez López, S., 2010).

Otros problemas que afectan al Mar Menor incluyen la construcción de playas artificiales en hábitats típicamente lacustres (mal llamadas regeneraciones de playas), la construcción de paseos marítimos, la pérdida de superficie de humedales litorales y la alteración de los cauces naturales (levantamiento de motas...) que limita cualquier proceso de autodepuración del sistema.

Si bien es necesario considerar los aportes procedentes de las actividades que se desarrollan en la propia laguna y su entorno inmediato (navegación, pesca, zonas de baño, etc.) o la contaminación vía aérea (por ejemplo con el transporte de polvo de las zonas con restos mineros), el problema que ha provocado la grave crisis actual de la laguna es la elevada entrada de nutrientes a la laguna procedentes de la cuenca. En el Campo de Cartagena se ha desarrollado una agricultura de regadío basada inicialmente en los recursos subterráneos, que tras la llegada del trasvase Tajo-Segura en 1979 aumentó de forma significativa. Trabajos realizados con teledetección han mostrado que sólo entre 1988 y 2009 el regadío de la cuenca pasó de unas 25.150 hectáreas a unas 60.700 hectáreas, un 141% más (Carreño, 2015). La transformación a regadío se ha reactivado en los últimos años, estimándose la existencia de entre 15.000 y 20.000 hectáreas de regadío al margen de las cifras oficiales.

Junto al trasvase Tajo-Segura, ha aumentado el uso de aguas subterráneas tras su previa desalobración. Tras la sequía de 1995, la puesta en marcha de plantas desalobradoras de aguas subterráneas inició el vertido de salmueras con altas concentraciones de nutrientes. Muy

## *Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor*

recientemente se han añadido también algunos recursos procedentes de la desalación marina (García Aróstegui *et al.*, 2016). Esta significativa expansión del regadío ha incrementado de forma muy notable los flujos hídricos y de nutrientes que alcanzan la laguna y sus humedales litorales a través del conjunto de flujos superficiales, subsuperficiales y subterráneos (Martínez-Fernández *et al.*, 2005; Velasco *et al.*, 2006; Carreño *et al.*, 2008; Esteve *et al.*, 2008; Martínez-Fernández *et al.*, 2014; Esteve *et al.*, 2016). El incremento de estos flujos se ha visto confirmado por el ascenso en los niveles piezométricos de la unidad hidrogeológica del Campo de Cartagena (Rodríguez Estrella, 2009; Aragon *et al.*, 2009), así como por el aumento del nivel freático, los periodos de inundación y la humedad edáfica en los humedales del Mar Menor (Álvarez-Rogel *et al.*, 2007b). Junto a un aumento de las aportaciones hídricas, el aumento del sellado del suelo en zonas urbanizadas y la compactación del suelo por prácticas agrícolas inadecuadas están aumentando la cuantía y velocidad de las escorrentías.

Un flujo especialmente relevante es el de la entrada directa a la laguna durante los episodios de lluvias intensas, como el ocurrido en diciembre de 2016, cuando gran parte de la contaminación agraria acumulada en la cuenca, junto a una carga elevada de sedimentos, es arrastrada y entra directamente a la laguna con los grandes caudales de avenida. Los resultados obtenidos con modelos de simulación (Martínez-Fernández *et al.*, 2014; Esteve *et al.*, 2016), apuntan a la gran importancia de los episodios de avenida en la entrada total hiperanual de nutrientes al Mar Menor. Estos resultados concuerdan con los estudios de entrada de pesticidas a la laguna, que muestran que más del 70% de la entrada total de pesticidas al Mar Menor se produce durante los episodios de riadas (Moreno González *et al.*, 2013; León *et al.*, 2016). Otros estudios señalan igualmente el gran protagonismo de los episodios de avenidas y lluvias intensas y su efecto de lavado general de la cuenca sobre la exportación total de nutrientes (David *et al.*, 1997; Xue *et al.*, 1998).

Los drenajes agrarios aportan a las ramblas y otros flujos contenidos elevados de nitratos, fosfatos y plaguicidas procedentes de los cultivos. Se han identificado elevados contenidos de nitratos y de nitrógeno por fertilización orgánica, así como patrones estacionales de amonio y fosfatos (presentes sobre todo en primavera y verano) en función de los cultivos (Tovar, 2009). Se han detectado concentraciones de nitrato que ya en 1997 alcanzaban los 62 mg/l en la rambla del Albuñón, los 85 mg/l en las salmueras (efluentes de plantas desaladoras) y los 160 mg/l en algunos canales de drenaje (Martínez Fernández y Esteve Selma, 2003). La contaminación agraria ha alcanzado también las aguas subterráneas, que presentan en el acuífero Cuaternario valores en el entorno de los 100 mg/l de nitrato en áreas próximas a la laguna y puntos con picos que superan los 250 mg/l (Perez Ruzafa & Aragon, 2003).

El estado general de la cuenca y los distintos compartimentos y flujos hídricos y en especial los elevados contenidos en nitratos, condujeron a la declaración en 2001 del Campo de Cartagena como Zona Vulnerable a la Contaminación por Nitratos, en aplicación de la Directiva 91/676/CEE, si bien dicha declaración no ha logrado contener y reducir la elevada contaminación agraria de la cuenca y sus impactos sobre el Mar Menor y humedales asociados.

En síntesis, el desarrollo urbano-turístico, las actividades mineras y la gran expansión de la actividad agraria en la cuenca del Mar Menor, con un aumento del regadío entre 1988 y 2009 de más de un 140%, han supuesto un considerable incremento de las presiones sobre la laguna, específicamente de los flujos de contaminación por vía superficial, subsuperficial y subterránea. Junto a la contaminación por residuos mineros, que generan arrastres de metales pesados, los principales flujos de contaminación proceden actualmente de la actividad agraria intensiva de la cuenca, que da lugar a la entrada de plaguicidas, de materiales de suelos fácilmente erosionables procedentes de suelos desnudos y zonas de cultivo que incrementan los fenómenos de turbidez del agua en la laguna y de la entrada de grandes cantidades de nutrientes (nitrógeno y fósforo) y sedimentos.

## Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor

### 2.- Impactos de la cuenca sobre la laguna

Si bien la laguna recibe de forma natural aportes de sustancias solubles y particuladas por escorrentías superficiales de los suelos de las zonas topográficamente más elevadas de su cuenca vertiente, así como aguas subsuperficiales y subterráneas del Campo de Cartagena, desde hace unos años dichos aportes han aumentado significativamente, afectando a su estado ecológico. La cuantificación de las descargas anuales de nutrientes a través de los distintos flujos resulta complejo. Diversos estudios en relación con las descargas anuales de nutrientes de la Rambla del Albujón y la Rambla de Miranda ofrecen un rango amplio en cuanto a las estimas de contenidos totales de N y P (García-Pintado *et al.*, 2007; González-Alcaraz *et al.*, 2012a; Velasco *et al.*, 2006) y muestran la necesidad de disponer de información detallada que permita la cuantificación en periodos interanuales largos tanto del caudal base como de los picos de avenidas.

A partir de un modelo de simulación dinámica sobre los cambios de uso y sus efectos en los flujos de nutrientes en la cuenca del Mar Menor (Martínez-Fernández *et al.*, 2007, 2013, 2014; Esteve *et al.*, 2016), se han estimado los valores de entrada total de nitrógeno y fósforo a la laguna procedente de la cuenca. Estos valores se sitúan en un valor medio interanual en torno a unas 1.000 toneladas anuales en el periodo 2000-2005, con grandes fluctuaciones entre 700 y 1.600 toneladas anuales y en torno a unas 240 toneladas anuales de fósforo. De acuerdo a las estimaciones del modelo, la contribución de los vertidos urbanos representa entre el 10 y el 15% de la entrada total de nutrientes a la laguna. Estos resultados concuerdan con otros muchos estudios, que coinciden en señalar que en cuencas con agricultura intensiva la mayor parte de los nutrientes tienen un origen difuso procedente de los usos agrarios (Jordan *et al.*, 1997, Kronvang, 1999; Meissner *et al.*, 2002; Lacroix *et al.*, 2005). Igualmente se ha señalado, en relación con la eutrofización de zonas costeras, que la principal fuente de nutrientes en las zonas afectadas, incluyendo aguas costeras, es la agricultura (Boesch & Brinsfield, 2000, Canton *et al.*, 2012). En el caso de la actual crisis eutrófica del Mar Menor, todas las evidencias apuntan a que de forma similar a otros muchos casos de cuencas agrarias intensivas descritos en la literatura científica internacional, la excesiva entrada de nutrientes procedentes de la actividad agraria de la cuenca es la principal responsable de la crisis eutrófica actual del Mar Menor.

Respecto a los coeficientes de exportación de nutrientes por hectárea, de acuerdo a las estimas del modelo señalado los valores de entrada total al Mar Menor se corresponden con una media interanual en torno a  $8 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , con fluctuaciones entre 6 y  $13 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . Estos valores se encuentran en rangos similares a los obtenidos en otras muchas cuencas agrarias (Mattikalli y Richards, 1996; David *et al.*, 1997; Jordan *et al.*, 1997). Las aportaciones netas específicas por hectárea de regadío, considerando la superficie de regadío en la cuenca del Mar Menor en el periodo señalado 2000-2005, se sitúan en un promedio interanual en torno a los  $18 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , con fluctuaciones entre los 13 y los  $29 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . Estos valores de exportación neta desde usos agrarios son también similares a los encontrados en otros casos de estudio de cuencas con agricultura intensiva. Así, la agricultura es la principal fuente de nitrógeno en la laguna costera de Arcachon, Francia, con una exportación neta de  $28,5 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (Canton *et al.*, 2012), mientras que una amplia revisión de la literatura científica, de más de 40 casos de estudio en climas templados, señala rangos entre 15 y  $70 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  de lixiviación y transporte de nitrógeno en llanuras con usos agrarios intensivos (Pärn *et al.*, 2012).

Por otra parte, los valores de entrada de nitrógeno estimados con el modelo dinámico son coherentes con los datos empíricos de concentración de nitrógeno de los principales flujos de la cuenca, los cuales se sitúan entre 28 y 60 mg/l de nitrógeno inorgánico disuelto (Lloret *et al.*, 2005; Velasco *et al.*, 2006; García Pintado *et al.*, 2009; Serrano y Sironi, 2009; Álvarez Rogel *et al.*,

## *Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor*

2009) y con la estima de entrada media anual de agua a la laguna, que sobre la base del trabajo de Senent Alonso *et al.*, (2009), puede estimarse entre 37 y 45 Hm<sup>3</sup>/año. Estos datos de concentración de nitrógeno y las estimas de descarga anual media de agua al Mar Menor conjuntamente aportan una estima de entrada anual media de nitrógeno a la laguna situada entre 1.000 y 1.300 toneladas anuales, rango similar al obtenido con el modelo dinámico.

Por el Grupo de Contaminación de Suelos de la UMU se monitorizaron 34 estaciones de muestreo de las aguas superficiales de fuentes desconocidas, de las vías de dispersión preferentes, y su llegada de contaminantes al Mar Menor (ramblas, ramblizos, canales naturales, canales de drenaje artificiales y vertidos directos en la orilla del mar), durante 2 años, con toma de muestras bimensual (300 muestras) en las distintas vías de dispersión, y se ha desarrollado una metodología geoquímica y con isótopos estables para la identificación de las fuentes contaminantes (Tovar, 2009). Se pone de manifiesto que las aguas que circulaban tienen alta mineralización, el 75% tienen alta concentración de nitratos por fertilización inorgánica en unos puntos y orgánica en otros, con una gran variabilidad; tanto amonio como fosfatos están presentes solamente en primavera y verano en función de los cultivos. Las fuentes contaminantes son múltiples.

Cuando llegan las aguas de escorrentía cargadas de sedimentos de diferente granulometría al Mar Menor, los sedimentos que aportan tienen distinto comportamiento según sea su naturaleza, con una clara diferencia entre el arco norte y arco sur. Donde existe influencia minera, o sea desde los humedales de la rambla de Miranda, rambla del Miedo, rambla del Beal, Ponce hasta la zona de la rambla de la Carrasquilla, existe la posibilidad de que llegue escasa concentración de metales pesados solubles por la rambla, que precipitan rápidamente y se insolubilizan dado el alto pH del agua del mar y sedimentos calizos circundantes, si bien se pueden formar algunos complejos con el cloro. Pero, en la zona de la balsa de lodos mineros de Lo Poyo, el riesgo de metales solubles es más alto.

En el arco sur, dada la proximidad de los suelos rojos a la línea de costa, y de los tipos de prácticas de cultivo que existen en la actualidad (anteriormente eran cultivos de secano), con las grandes escorrentías, hay un gran aporte de partículas finas al mar. En la playa quedan la arena y el limo. La arcilla floccula en parte al entrar en un medio fuertemente iónico, como es el agua salada del mar, pero la arcilla más fina queda suspendida en el agua de la laguna, en forma de nanopartículas de filosilicatos y geles amorfos (partículas menores de 0,1 micra), que contribuyen de manera muy importante a la turbidez permanente que está sufriendo el Mar Menor desde el año 2016, investigación actual en marcha por el Grupo de Contaminación de suelos de la UMU (Martínez Sánchez *et al.*, 2016 en redacción). Dichas nanopartículas tienen gran dificultad de floculación, dada su forma laminar, su baja densidad, y se trata de coloides con muy poca carga, un potencial Z del orden de -0,1mv.

Recientemente se han iniciado los ensayos preliminares de movilización de metales pesados de los sedimentos de la laguna y su paso a la columna de agua (Grupo de contaminación de suelos de la UMU-Consejería de Agua, Agricultura y Medio Ambiente, y en colaboración con el Grupo de Ecología)

La laguna está afectada igualmente por flujos de contaminantes orgánicos regulados y emergentes, habiéndose detectado la entrada de unos 70 contaminantes orgánicos a través de la rambla del Albuñón (Moreno González *et al.*, 2013). Se ha estimado una entrada al Mar Menor de unos 18 kg anuales de pesticidas procedentes de la agricultura y de unos 11 kg anuales de fármacos procedentes de los vertidos urbanos y otras fuentes antrópicas (León *et al.*, 2016).

En definitiva, las estimas de exportación de nutrientes de la cuenca del Mar Menor apuntan a un origen mayoritariamente agrario, como ocurre en otras muchas cuencas con usos agrarios



## *Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor*

intensivos. Los valores estimados de exportación de nutrientes son similares a los encontrados en múltiples casos descritos a nivel internacional en cuencas agrarias intensivas. Destaca el papel de las lluvias intensas y episodios de avenidas en los valores hiperanuales de entrada total de nutrientes y otros contaminantes (plaguicidas, metales pesados) a la laguna. Las nanopartículas de arcilla suspendidas en la columna de agua tienen especial colaboración en la turbidez, y los sedimentos más gruesos (arenas y limos) en los fangos y en la colmatación de sedimentos. Al igual que en otros muchos casos de estudio descritos en la literatura científica internacional, este elevado flujo de nutrientes de origen agrario es uno de los principales responsables de los procesos de eutrofización de los ecosistemas acuáticos afectados, incluyendo lagunas costeras como el Mar Menor.

### **3- Papel de los humedales litorales en la dinámica de los nutrientes, afecciones a los hábitats y biodiversidad y sobre las aves acuáticas del Mar Menor**

Los humedales litorales asociados al Mar Menor han sido caracterizados como criptohumedales litorales (Vidal – Abarca *et al.*, 2003). En su ribera interna se incluyen el Saladar de Lo Poyo, la Marina del Carmolí y Playa de la Hita. Siguiendo la tipología de la Directiva Hábitats (92/43/CEE), la unidad estepa salina está compuesta en un 95% por el hábitat 1510 “Estepas salinas mediterráneas (*Limonietalia*)”, de interés prioritario. La unidad de saladar se compone en su mayoría por el hábitat 1420 (Matorrales halófilos mediterráneos y termoatlánticos, *Sarcocornetea fruticisi*), de interés comunitario. Finalmente la tercera comunidad está compuesta por el carrizal (*Phragmites australis*), no incluido en dicha Directiva. Los humedales situados en ambientes áridos los cuales, como en el Mar Menor, suelen presentar condiciones hipersalinas y escasas láminas de agua (criptohumedales). Estas características por un lado son muy vulnerables a los cambios hidrológicos y por otro dan lugar a una biodiversidad singular y considerada como rara en el contexto europeo. Los valores de la laguna del Mar Menor y sus humedales asociados quedan refrendados por los estatus de protección existentes en la zona: Parque Regional de San Pedro del Pinatar, Paisaje Protegido de los Espacios Abiertos e Islas del Mar Menor, declaración del Mar Menor y humedales asociados como ZEPA (Zona de Especial Protección para las Aves) y LIC (Lugar de Importancia Comunitaria), declaración del Mar Menor y su entorno como área Ramsar (Humedal de Importancia Internacional del Convenio Ramsar) y zona ZEPIM (Zona Especialmente Protegida de Importancia para el Mediterráneo).

Diversos trabajos científicos han abordado el estudio de los humedales litorales del Mar Menor en relación con la caracterización ecológica, dinámica de sus hábitats naturales y biodiversidad asociada (Vidal-Abarca *et al.*, 1998; Vidal-Abarca, 2003; Carreño *et al.*, 2008; Esteve *et al.*, 2008; Pardo *et al.*, 2008; Robledano *et al.*, 2010); así como en relación con las características del suelo y la cubierta vegetal y sobre las relaciones entre el sistema suelo-agua y la distribución de la vegetación (Álvarez-Rogel *et al.*, 1997, 2000, 2001, 2006, 2007a). Estos trabajos han permitido identificar especies bioindicadoras de las condiciones de salinidad, humedad, encharcamiento y anoxia de los suelos, que pueden utilizarse para monitorizar los impactos que sufren los humedales (Álvarez-Rogel *et al.*, 2007b) y relacionar los cambios en los hábitats de los humedales con la alteración de la condición hidrológica a escala del humedal y de la cuenca del mismo (Martínez-López *et al.*, 2015, 2016).

Se dispone de muestreos y análisis de las aguas de las ramblas del Albuñón, Miranda, El Miedo y otros cauces, así como muestreos en el interior de los humedales, realizados entre los años 2001 y 2010 (Álvarez-Rogel *et al.*, 2006, 2007a; García-Pintado *et al.*, 2007; González-Alcaraz *et al.*,

## *Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor*

2012a; Jiménez-Cárceles *et al.*, 2006, Jiménez-Cárceles y Álvarez-Rogel, 2008; Ruíz y Velasco, 2009; Velasco *et al.*, 2006), complementados con trabajos experimentales recientes que han ayudado a comprender el papel de la vegetación en las condiciones del suelo y los mecanismos de depuración de las aguas eutrofizadas (Álvarez-Rogel *et al.*, 2016b; Tercero *et al.*, 2015, 2016) incluso en suelos con muy elevadas concentraciones de metales debido a la presencia de residuos mineros (González-Alcaraz *et al.*, 2011c, 2012b, 2013a). Estos trabajos demostraron la alta carga de N y P de las aguas de los cauces, por encima de los umbrales permitidos por diversas legislaciones para declarar un agua eutrofizada. Se observaron diferentes patrones estacionales de concentración de ambos nutrientes lo que, junto a su contenido en otros componentes, permitió relacionarlos con las actividades del entorno. Los efluentes que se atribuyeron a fuentes agrícolas estaban enriquecidos fundamentalmente en nitratos (con máximos en otoño y primavera, periodos de máxima actividad en los cultivos de la zona), mientras que los atribuidos a efluentes urbanos estaban enriquecidos en amonio, fosfato y carbono orgánico soluble (con máximos en verano, cuando la afluencia turística es más elevada). Con respecto a la presencia de nitratos de origen agrícola, se ha probado ampliamente que han existido vertidos directos procedentes de desalobradoras. Además, los humedales reciben la descarga de otros flujos hídricos con contenidos elevados de nutrientes derivados de la contaminación agraria, incluyendo diversas ramblas (como el Albuñón, Miranda y Miedo), así como flujos subsuperficiales y las aguas de avenida durante los episodios de lluvias intensas (Martínez Fernández *et al.*, 2014; Esteve *et al.*, 2016).

Estudios de campo y experimentales en la Marina del Carmolí han demostrado que dicho humedal actúa como filtro verde depurando las aguas que fluyen a través suyo, retirando nitrógeno del sistema a través, fundamentalmente, de la desnitrificación, e inmovilizando el fósforo en los suelos, fundamentalmente precipitándolo o co-precipitándolo en compuestos de calcio/magnesio (Álvarez-Rogel *et al.*, 2006; Jiménez-Cárceles *et al.*, 2006, Jiménez-Cárceles y Álvarez-Rogel, 2008; Álvarez-Rogel *et al.*, 2016b; Tercero *et al.*, 2016). Se demostró también que los carrizales no tienen un papel especialmente relevante en la retirada de nitratos ni fósforo, pero actúan como importantes sumideros para el secuestro de carbono (González-Alcaraz *et al.*, 2012a). No obstante, en suelos con alto contenido en metales la presencia de rizosfera vegetal es clave para generar un ambiente propicio que permita a los microorganismos llevar a cabo la desnitrificación (González-Alcaraz *et al.*, 2011c, 2012b, 2013a). Por otro lado, trabajos realizados en el cauce de la Rambla del Albuñón demostraron que la presencia de carrizo favorece la depuración del agua que fluye por dicho cauce al disminuir la velocidad del flujo y facilitar el contacto agua-sedimento, y por tanto el adecuado manejo de esta especie puede reducir los impactos sobre la laguna (Ruíz y Velasco, 2009).

Si bien ha quedado demostrado el importante papel de los humedales para proteger en Mar Menor de la eutrofización, también se ha puesto en evidencia la degradación que sufren estos humedales a consecuencia del incremento general de los flujos hídricos que les afectan, tanto indirectos como directos, (Álvarez-Rogel *et al.*, 2007b; Carreño *et al.*, 2008, Carreño, 2015.), incremento derivado sobre todo de la puesta en regadío de la cuenca del Mar Menor. Este impacto está causado no tanto por los elevados contenidos de nutrientes de las aguas (recordemos que el N se elimina por desnitrificación y el P queda inmovilizado en el suelo o sedimento) sino por la entrada de grandes volúmenes de aguas relativamente poco salinas, lo que provoca un aumento de la humedad de los suelos y una disminución de su salinidad. Este fenómeno hace que se homogenicen las condiciones del suelo y suavicen los gradientes espacio temporales de salinidad y humedad, lo que favorece una expansión muy acentuada de la vegetación con menos restricciones a la alta salinidad como carrizales y juncales, a costa de los almarjales. El resultado es un incremento de cobertura y biomasa vegetal a costa de una menor biodiversidad y una reducción de espacios abiertos y, por tanto, de la variedad de nichos que albergan hábitats singulares, especialmente los

## Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor

de carácter estepario.

Estudios con teledetección del periodo 1984-2009 (Carreño *et al.*, 2008; Carreño, 2015) muestran que a lo largo de dicho periodo la superficie de estepa salina, de interés prioritario, se ha reducido a menos de la mitad (de 243 a 100 ha), mientras que la superficie de saladar, de interés comunitario, se ha duplicado (de 69 a 142 ha) y finalmente la de carrizal, sin interés desde el punto de vista de la Directiva, se ha multiplicado por más de cinco (de 29 a 165 ha). Todos estos cambios están correlacionados en el tiempo positivamente con el incremento del regadío en la cuenca con un retraso de cinco años (Carreño *et al.*, 2008; Carreño 2015) y negativamente con la distancia del regadío al humedal (Martínez López *et al.*, 2014; Martínez López *et al.*, 2015) La pérdida neta de estepa salina es muy importante, ya que es el hábitat con el mayor interés desde el punto de vista de la Directiva. Además, la estepa salina es un hábitat con una superficie total en España de sólo 12.976 hectáreas, de las cuales no más del 37% presenta un buen estado de conservación (Esteve y Calvo, 2000). La aplicación de un índice que valora el interés de las comunidades desde el punto de vista de la Directiva Hábitat, evidencia que los cambios han supuesto una reducción global del 48% en el interés de la vegetación de los humedales desde la perspectiva de la Directiva Hábitat entre 1984 y 2009 (Carreño *et al.*, 2008), derivado del incremento en los flujos hídricos que afectan a los mismos.

Los cambios han afectado también a la comunidad de aves paseriformes esteparias en la Marina del Carmolí (Robledano *et al.*, 2010). La reducción progresiva de la estepa salina inducida por el incremento de los flujos hídricos a la Marina del Carmolí ha conducido a un declive de la familia *Alaudidae*, estrechamente ligada al hábitat estepario. Esto representa una pérdida de valor desde el punto de vista de la Directiva Aves, como evidencia el marcado declive del índice basado en dicha Directiva. Este declive resulta preocupante, dado que los valores naturalísticos asociados a la familia *Alaudidae* son los que justamente sustentan la designación de la Marina del Carmolí como ZEPA. Las alteraciones hidrológicas provocadas por el incremento del regadío en la cuenca del Mar Menor se manifiesta en cambios en otras comunidades biológicas de los humedales litorales, como la de coleópteros errantes (Pardo *et al.*, 2008). Los cambios en la Marina del Carmolí inducidos por el incremento de los flujos hídricos ha sido considerado por los servicios de divulgación científica de la Comisión Europea un ejemplo emblemático de los impactos de la agricultura sobre los humedales y su conservación (*Science for Environment Policy*, 2010).

En relación con las comunidades de aves acuáticas del Mar Menor, el incremento de nutrientes y su incorporación a las cadenas tróficas se asocia con una sucesión en la comunidad de aves lagunares, con una fase inicial de diversificación de la comunidad (coherente con la respuesta esperable a fenómenos de enriquecimiento en medios oligotróficos), hasta alcanzar un máximo, pero a largo plazo se produce una simplificación y banalización de la comunidad de aves (Robledano *et al.* 2011, Farinos *et al.*, 2016). En las últimas fases son evidentes las tendencias negativas, hasta desaparecer en algún caso, tanto de las especies que han protagonizado las etapas intermedias como de otras genuinas del ambiente hipersalino y oligotrófico original (caso de la serreta mediana). Otras especies como el cormorán grande y el zampullín cuellinegro muestran tendencias demográficas favorables y acaban dominando la comunidad, interpretándose esto en parte como una respuesta a la eutrofización local. Estos cambios están correlacionados con el incremento de la entrada estimada de nutrientes de la cuenca con un retraso de dos años (Robledano *et al.*, 2011).

El interés que suscitan estos aspectos queda demostrado por la financiación recibida desde hace años a nivel regional y nacional por los grupos de investigación que trabajan en la zona (por ejemplo, el grupo Edafología Ambiental, Química y Tecnología Agrícola de la ETSIA-UPCT).

En definitiva, los estudios disponibles y el seguimiento a largo plazo de los humedales litorales y



## *Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor*

sus hábitats y de distintas comunidades biológicas, demuestran, por un lado, la gran capacidad de los humedales para retener y eliminar los nutrientes contenidos en los flujos que los atraviesan y, por otro, la existencia de alteraciones importantes derivadas del incremento de los flujos hídricos y de nutrientes derivado de la expansión del regadío. Estas alteraciones conllevan efectos negativos sobre el valor naturalístico de ciertas comunidades y componentes de la biodiversidad (como las comunidades vegetales, aves esteparias y aves acuáticas, entre otras) especialmente preocupantes en el caso de las implicadas en el otorgamiento de distintos estatus de protección para el Mar Menor y sus humedales (como las comunidades incluidas en la Directiva Hábitat y las aves esteparias).

### **4- Directrices para la prevención y minimización de las presiones. Sugerencias y medidas cautelares**

La conservación del Mar Menor y sus humedales litorales, como en el caso de otros sistemas lagunares, requiere de la planificación y gestión integrada y sostenible de la cuenca. Se necesitan actuaciones urgentes en la cuenca y en el Mar Menor, siendo muy urgente la minimización de la entrada a la laguna de nutrientes y otros contaminantes (metales pesados y pesticidas), así como del aporte de sedimentos, a través de todos los flujos superficiales y subterráneos, tanto de carácter difuso (cada una de las ramblas, arrastres durante las avenidas, flujos subsuperficiales y flujos subterráneos) como de carácter localizado (salmueroductos, canales de drenaje y vertidos puntuales de aguas residuales). Esta necesidad se refuerza además por la declaración de la cuenca del Mar Menor como Zona Vulnerable a la Contaminación por Nitratos, la declaración de la laguna como Área Sensible en aplicación de la Directiva de Aguas Residuales Urbanas (91/271 ECC) y de la aplicación de la Directiva Marco del Agua (2000/60 EC), que obliga a alcanzar y mantener el Buen Estado de todas las masas de agua.

Estudios específicos dirigidos a valorar las preferencias de los distintos actores sociales y la aceptabilidad social de las posibles medidas, muestran la disposición de los ciudadanos a pagar por la mejora del Mar Menor en la medida en que los beneficios sociales de dicha mejora superan los costes de las medidas (Perni *et al.*, 2011; Martínez Paz *et al.*, 2013). Igualmente los estudios evidencian el apoyo de los distintos actores a las medidas de recuperación ambiental en la cuenca, como la rehabilitación de la rambla del Albujón (Perni y Martínez Paz, 2013).

Es necesaria la coordinación de todas las administraciones, la implicación del sector agrario y la participación ciudadana de los diferentes actores sociales, con el fin de plantear una estrategia verdaderamente integrada que aplique de forma simultánea diversas medidas a varios niveles espaciales, desde la escala de parcela agraria a la escala del conjunto de la cuenca. Es necesaria la coordinación de todas las administraciones, la implicación del sector agrario y la participación ciudadana de los diferentes actores sociales, con el fin de plantear una estrategia verdaderamente integrada que aplique de forma simultánea diversas medidas a varios niveles espaciales, desde la escala de parcela agraria a la escala del conjunto de la cuenca. Resulta de especial importancia que aquellas medidas que deban ser aplicadas por los agricultores se implementen mediante procesos de coinnovación, entendido como tal un mecanismo de creación de innovación que no sigue el modelo de arriba-abajo en el cuál los científicos proponen las medidas, los agentes de extensión agraria las transfieren y los agricultores las aplican. En los procesos de coinnovación los agricultores participan activamente en el diseño y aplicación de las medidas dándose una participación similar a los científicos, extensionistas y agricultores así como a sus respectivos conocimientos.

Estas medidas son las siguientes: i) Contención y reordenación de la superficie de regadío en la

## *Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor*

cuenca del Mar Menor; ii) Reducción en origen de la contaminación agraria, en correspondencia con la declaración del Campo de Cartagena como Zona Vulnerable a la Contaminación por Nitratos; iii) Aplicación de medidas basadas en la naturaleza (*nature-based solutions*) en el conjunto de la cuenca para el control, entre otros, de los flujos de nutrientes y la pérdida de suelo; v) Recuperación de superficies de humedal natural en las proximidades de la laguna y v) Puesta en marcha de medidas para mitigar la contaminación por residuos mineros.

### ***4.1. Contención y reordenación de la superficie de regadío en la cuenca del Mar Menor***

Es necesario contener y reordenar la superficie de regadío en la cuenca del Mar Menor. Igualmente es necesario reordenar las extracciones de agua subterránea, las plantas de desalabración y la generación y punto de vertido de las salmueras.

### ***4.2. Reducción en origen de la contaminación agraria, en correspondencia con la declaración del Campo de Cartagena como Zona Vulnerable a la Contaminación por Nitratos***

Para reducir la contaminación agraria en origen cabe aplicar una amplia batería de medidas, incluyendo correcciones en la aplicación de fertilizantes nitrogenados y fosforados; gestión de purines; promover la reconversión a la agricultura ecológica; el cultivo en fajas y otras medidas de conservación del suelo que minimicen la erosión. Es imprescindible actuar en la zona del arco sur, con acciones para frenar la erosión de los suelos rojos, recuperar el funcionamiento hidrológico adecuado y cambiar las prácticas de cultivo, valorando incluso la necesidad de cambiar el uso actual, si se quiere reducir sus efectos de incremento de la turbidez en la laguna.

Los proyectos de investigación y tesis doctorales del grupo de investigación GARSA muestran el interés de Europa por replantear el modelo de agricultura intensiva y de monocultivo y por implantar la diversificación de cultivos a escala de parcela agrícola, así como impulsar prácticas agrarias sostenibles que entre otros beneficios pueden reducir la lixiviación de nutrientes, como el riego deficitario; la rotación de cultivos de la Agricultura de Conservación, que facilita el manejo de los residuos y mejora los ciclos nutrientes o una reutilización adecuada de restos de cosecha como enmienda orgánica (Moreno-Cornejo *et al.*, 2013, 2014, 2015). Asimismo, los proyectos/contratos desarrollados con empresas del sector agrícola por parte del Grupo de Investigación Edafología Ambiental, Química y Tecnología Agrícola de la ETSIA-UPCT demuestran el interés del sector por buscar nuevos cultivos y alternativas de manejo que minimicen los impactos, sin merma de los beneficios económicos/sociales, por medio de una agricultura tecnificada que optimice el uso del agua y fertilizantes. Se ha preconizado la reducción de la fertilización mineral y mayor uso de enmiendas orgánicas, no obstante, trabajos experimentales han demostrado que los aportes excesivos de estiércol pueden acarrear importantes lixiviaciones de nitratos (Fernández *et al.*, 2012).

Igualmente es necesario incorporar en las desalabradoras el pretratamiento de las salmueras (por ejemplo con pequeños filtros verdes) de forma previa al vertido, evitando su gestión inadecuada, (como inyección en profundidad). Otra medida que se propone es que los invernaderos adopten sistemas de ciclo cerrado en relación con los drenajes agrarios (ya obligatorios en otros países).

## *Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor*

### ***4.3. Aplicación de medidas basadas en la naturaleza (nature-based solutions) en el conjunto de la cuenca***

Una de las soluciones más efectivas para minimizar la contaminación difusa en cuencas agrarias es aplicar la amplia y experimentada batería existente de medidas basadas en la naturaleza (*nature-based solutions*, consúltese un catálogo de las mismas en [www.nwrm.eu](http://www.nwrm.eu)), para reducir los flujos de contaminación agraria en el conjunto de la cuenca. Estas medidas incluyen el establecimiento dentro de la matriz agraria de setos con vegetación natural, que además de retener nutrientes reducen la erosión hídrica; la recuperación de la red hidrográfica desaparecida por los usos agrarios; la revegetación de dicha red hidrográfica y la creación de pequeños cuerpos de agua con vegetación natural. Estas medidas actúan como áreas-tampón y trampas de retención de nutrientes y otros contaminantes a lo largo de toda la cuenca, además de mitigar las pérdidas de suelo.

Como se evidencia en la literatura científica, la reconfiguración de los paisajes agrarios, incorporando humedales, vegetación ligada a los sistemas de drenaje y la recuperación de manchas de vegetación natural en conexión con los flujos hídricos, es clave para mantener y mejorar la capacidad de las cuencas y llanuras fluviales a la hora de reducir los flujos de contaminación (Boesch & Brinsfield, 2000; Comín *et al.*, en prensa). Estos componentes (humedales, pequeños cuerpos de agua, vegetación asociada a ramblas y redes de drenaje) pueden tener una capacidad de retención de nutrientes que una revisión de once casos de estudio sitúa entre el 66 y el 89% (Pärn *et al.*, 2012).

### ***4.4. Recuperación de superficies de humedal natural en las proximidades de la laguna***

En las proximidades de la laguna, se propone llevar a cabo actuaciones de recuperación de superficies de humedal, reforzando su capacidad de retención de nutrientes, a la vez que se mantienen sus valores naturalísticos y de conservación de la biodiversidad. Los datos disponibles de los humedales litorales del Mar Menor (Vidal-Abarca *et al.*, 1998; Álvarez Rogel *et al.*, 2006; Jiménez-Cárceles *et al.*, 2006, Jiménez-Cárceles y Álvarez-Rogel, 2008; González Alcaraz *et al.*, 2011a; Álvarez-Rogel *et al.*, 2016b; Tercero *et al.*, 2016) evidencian la gran capacidad de los mismos para retirar y eliminar los nutrientes contenidos en los flujos hídricos. Además, las grandes avenidas, una de las principales fuentes de aportación de nutrientes a la laguna, no pueden ser tratadas con sistemas de obra civil, sino además con la superficie de humedales, tanto la ya existente como la que se puede recuperar.

Estudios realizados en el caso del Mar Menor (Martínez-Paz *et al.*, 2007; Perni y Martínez-Paz, 2013) indican que la recuperación de humedales naturales es además una medida más coste-efectiva que otro tipo de medidas, como la reutilización de drenajes, dado que los costes unitarios de la recuperación de humedales (euros por kg de nutriente eliminado) se sitúan en torno a la mitad de los correspondientes a la reutilización de drenajes. Estos resultados son consistentes con los obtenidos en otros estudios (Gren *et al.*, 1997; Turner *et al.*, 1999; Gustafson *et al.*, 2000; Zanou *et al.*, 2003; Lacroix *et al.*, 2005; Elofsson, 2010; Trepel, 2010), que demuestran que la construcción y sobre todo la restauración de humedales naturales es una opción con una elevada relación efectividad-coste.

### ***4.5. Puesta en marcha de medidas para mitigar la contaminación por***

## *Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor*

### ***residuos mineros***

Se requieren acciones que eviten la dispersión de contaminantes procedentes de residuos mineros, especialmente para recuperar y descontaminar el espacio protegido de Lo Poyo. Experiencias similares son las del Grupo de Investigación de Contaminación de suelos de la UMU, junto a la empresa TRAGSA, llevadas a cabo en el Proyecto Piloto de la Bahía de Portman, donde se estudiaron el diagnóstico, análisis de riesgos, diseño de tecnologías de descontaminación ecoeficientes y sostenibles, optimización de las tecnologías en nave cerrada, coste-beneficio, proyecto piloto en parcelas, puesta a punto de test de ecotoxicidad marina y terrestre, humedales, etc, para el Ministerio de Medio Ambiente, desde el año 2006, en que se realizó el Concurso de ideas, hasta el año 2011 (se puede visitar en la bahía); también se aportaron conocimientos en sobre este tema Tesis Doctorales del Grupo de Investigación (Agudo Juan, I, 2016; González Ciudad, E. 2014; Marimón, J, 2016; Pérez Espinosa, V, 2014).

Se han realizado estudios experimentales encaminados a comprender el comportamiento de los metales en las condiciones geoquímicas específicas de los humedales afectados y su respuesta frente a diversas enmiendas (González-Alcaraz *et al.*, 2011c, 2013 y c; González-Alcaraz y Álvarez-Rogel, 2013; María-Cervantes *et al.*, 2010, 2011). Como síntesis de estos trabajos se puede afirmar que las medidas a adoptar y las enmiendas a emplear nunca deben ser generalistas, sino adaptadas a las características físico-químicas del suelo, los metales presentes, el régimen hídrico y/o de inundación de los suelos y la presencia o no de plantas. Como ejemplo, el uso de carbonato cálcico puede favorecer la inmovilización de metales al elevar el pH, pero también puede estimular la actividad microbiológica, sobre todo en presencia de plantas y de fases de desecación e inundación del suelo, incentivando cambios de potencial redox que lleven a la disolución de óxidos metálicos que liberarían a la fase soluble los metales que se pretendía inmovilizar.

La prevención, gestión y minimización de la contaminación por metales pesados constituye un problema de enorme complejidad, que requiere líneas de investigación específicas, ámbito en el que se están realizando contribuciones significativas desde los proyectos de investigación y tesis doctorales del Grupo de Investigación GARSA, en cuanto a métodos de diagnóstico y estrategias de mitigación (Véase ejemplo Zornoza *et al.*, 2012 y Martínez Martínez *et al.*, 2013).

La prevención, gestión y minimización de la contaminación por metales pesados constituye un problema de enorme complejidad, que requiere líneas de investigación específicas, ámbito en el que se están realizando contribuciones significativas desde los proyectos de investigación y tesis doctorales de los grupos de investigación GARSA y Edafología Ambiental, Química y Tecnología Agrícola de la ETSIA-UPCT, en cuanto a métodos de diagnóstico y estrategias de mitigación (Véase ejemplo Zornoza *et al.*, 2012; Martínez Martínez *et al.*, 2013; Conesa *et al.*, 2012b), que incluyen el análisis de los procesos naturales que se dan en el sistema suelo-planta en la zona para diseñar medidas de fitomanejo (Conesa *et al.*, 2012a, Párraga *et al.*, 2013a, b; 2014a, b, c, d; 2016). Destacar que estudios recientes han demostrado un aumento de toxicidad de los residuos mineros bajo escenarios previstos de cambio climático (Barmiento *et al.*, 2017; González-Alcaraz *et al.*, 2015, 2016a y b), por lo que la adopción de medidas para minimizar los riesgos deberán priorizarse en los próximos años.

## **5.- Seguimiento y evaluación de las medidas de actuación y gestión**

## *Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor*

La estrategia integrada expuesta en el apartado anterior necesita i) el apoyo imprescindible de un buen programa de monitoreo; ii) herramientas de modelado para el análisis del estado del sistema y la simulación de opciones de gestión; iii) la evaluación *ex-ante* para la selección de alternativas; iv) el seguimiento y evaluación *ex-post* de las medidas y v) una gestión adaptativa que garantice el cumplimiento de los objetivos esperados. Estos componentes deberían explicitarse y vincularse con el Plan de Gestión Integral de los espacios protegidos del Mar Menor y de la Franja Litoral Mediterránea de la Región de Murcia y con el resto de planes estratégicos de gestión integrada de la cuenca vertiente para alcanzar el vertido cero y la reducción de los riesgos asociados a la presencia de residuos mineros. A continuación se presentan sucintamente estos componentes.

1. Creación de un sistema de monitoreo de la cuenca vertiente integrado con el sistema de monitoreo en la laguna. El sistema de monitoreo debe permitir evaluar los flujos de aguas superficiales y subterráneas, sus respectivas cargas de sedimentos y contaminantes, el aporte de nutrientes y la pérdida de suelo en los campos de cultivo, con especial atención a la evaluación del efecto de las medidas de mitigación, la evolución de la calidad del suelo e indicadores de biodiversidad en las zonas agrarias y humedales. La integración con el sistema de monitoreo en la laguna se realizará atendiendo al tipo de variables medidas, a la optimización de la distribución espacial y la temporización de las medidas en ambos subsistemas (terrestre y lagunar). Se evaluará también en el diseño de la red de seguimiento la consistencia con las bases de datos históricas.
2. Como establece la Comisión Europea, debe llevarse a cabo un análisis coste-efectividad de las distintas alternativas y medidas de gestión, con carácter previo (*ex-ante*) a la selección de las alternativas finalmente adoptadas. Entre los indicadores a utilizar en esta fase de selección de alternativas, se han de incorporar *indicadores de eficiencia*, específicamente indicadores de coste-efectividad en relación con la retirada de nutrientes (kg de N y de P eliminados por euro invertido).
3. Tras la ejecución de las medidas, debe llevarse a cabo un seguimiento y evaluación sistemáticos de las medidas (*ex-post*). El procedimiento de evaluación ha de incorporar *indicadores de eficacia*, es decir, indicadores del grado en el que se han alcanzado los objetivos esperados, específicamente indicadores de la contribución relativa de cada medida a la reducción de la entrada total de nutrientes a la laguna del Mar Menor.
4. Ha de aplicarse una gestión adaptativa, con el fin de garantizar la eficacia de las medidas para alcanzar los objetivos previstos. Este ciclo adaptativo ha de permitir reorientar y mejorar la eficacia de las medidas, en aplicación del mejor conocimiento disponible. Específicamente, la gestión adaptativa debe mejorar de forma continuada la eficacia de las medidas para la reducción de la entrada de nutrientes al Mar Menor.



## *Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor*

### REFERENCIAS

- Acosta, J.A., Faz, A., Zornoza, R., Martínez-Pagán, P., Martínez-Martínez, S., Gómez-Garrido, M. 2014. Procedimiento para determinar cuantitativamente propiedades físico-químicas de suelos o residuos sólidos. Universidad Politécnica de Cartagena. NR: ES 2 474 919
- Acosta, J.A., Faz, A., Martínez-Martínez, S., Zornoza R., Carmona D.M., Kabas S. 2011. Multivariate statistical and GIS-based approach to evaluate heavy metals behaviour in mine sites for future reclamation. *Geochemical Exploration* 109, 8-17.
- Acosta, J.A., Faz, A., Zornoza, R., Martínez-Pagán, P., Martínez-Martínez, S., Gómez-Garrido, M. 2015. Procedimiento para determinar cuantitativamente propiedades físico-químicas de suelos o residuos sólidos. Universidad Politécnica de Cartagena. NR: PCT/ES2015/070061
- Alvarez Rogel J., Martínez Sánchez, J.J., Carrasco Blázquez, L., Marín Semitiel, C. 2006. A Conceptual Model of Salt Marsh Plant Distribution in Coastal Dunes of Southeastern Spain. *Wetlands*, 26: 703-717.
- Álvarez Rogel, J., Alcaraz Ariza, F., Ortiz Silla, R. 2000. Edaphic gradients and plant zonation in mediterranean salt-marshes of SE Spain. *Wetlands*, 20: 357-372.
- Álvarez Rogel, J., Ortiz Silla, R., Vela de Oro, N., Alcaraz Ariza, F. 2001. The application of the FAO and US soil taxonomy systems to saline soils in relation to halophytic vegetation in SE Spain. *CATENA.*, 45: 73-84.
- Álvarez-Rogel J, Jiménez-Cárceles FJ, Egea C. 2006. Phosphorus and nitrogen content in the water of a coastal wetland in the Mar Menor lagoon (SE Spain): relationships with effluents from urban and agricultural areas. *Water Air Soil Pollut*, 173: 21–38.
- Alvarez-Rogel, J., Carrasco, L., Marín, C. M., Martínez-Sánchez, J. J. 2007a. Soils of a dune coastal salt marsh system in relation to groundwater level, micro-topography and vegetation under a semiarid Mediterranean climate in SE Spain. *Catena*, 69, 111-121.
- Alvarez-Rogel, J., González-Alcaraz, M.N.; Conesa Alcaraz, H.; Tercero Gómez, M.C.; Párraga-Aguado; I. María-Cervantes, I.; Jiménez-Cárceles, F.J. 2016a. Eutrofización y contaminación por residuos mineros en humedales del Mar Menor: comprendiendo los procesos biogeoquímicos para plantear posibles actuaciones de manejo. En Leon, V.M y J.M. Bellido. *Mar Menor: una laguna singular y sensible. Evaluación científica de su estado.* Madrid, Instituto Español de Oceanografía, Ministerio de Economía y Competitividad. 414 p. Temas de Oceanografía, 9. ISBN 978-84-95877-55-0.
- Álvarez-Rogel, J., Hernández Bastida, J., Ortiz Silla, R., Alcaraz, F. 1997. Patterns of spatial and temporal variations in soil salinity: an example of a natural salt marsh in a semiarid climate. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 11: 315-319.
- Álvarez-Rogel, J., Jiménez-Cárceles, F.J., Egea, C. 2007c. Phosphorous retention in a coastal salt marsh in SE Spain. *The Science of the Total Environment*, 378: 71-74.
- Álvarez-Rogel, J., Jiménez-Cárceles, F.J., Roca, M.J., Ortiz, R. 2007b. Changes in soils and vegetation in a Mediterranean coastal salt marsh impacted by human activities. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 73: 510-526.
- Álvarez-Rogel, J., Ramos-Aparicio, M.J., Delgado-Iniesta, M.J. & Arnaldos-Lozano, R. 2004. Metals in soils and above-ground biomass of plants from a salt marsh polluted by mine wastes in the coast of the Mar Menor Lagoon, SE Spain. *Fresenius Environmental Bulletin* 13, 274-278.
- Álvarez-Rogel, J., Tercero, M.C., Arce, M.I., Delgado, M.J., Conesa, H.M., González-Alcaraz, M.N. 2016b. Nitrate removal and potential soil N<sub>2</sub>O emissions in eutrophic salt marshes with and without *Phragmites australis*. *Geoderma*. 282:49-58.
- Álvarez-Rogel, J.; Jiménez-Cárceles, F.J.; Egea Nicolás, C.; María-Cervantes, A.; González-Alcaraz, M.N.; Párraga Aguado, I.; Conesa Alcaraz, H.M. 2009. Papel de los humedales costeros del Mar Menor en la depuración de aguas eutrofizadas: el caso de la Marina del Carmolí. En Cabezas & Senent (Eds):

## *Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor*

Mar Menor. Estado actual del conocimiento científico. Fundación Cluster-Instituto Euromediterráneo del agua. pp. 321-358

- Aoukour , Fakher . 2002. Evaluación de la degradación por sales y metales pesados en suelos rojos mediterráneos. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia.
- Aragon, C.; Jiménez-Martínez, J.; Gaquía-Aróstegui, J.L.; Hornero, J. 2009. Hidrogeología y recursos subterráneos en el área Campo de Cartagena-Mar Menor. En Cabezas & Senent (Eds): Mar Menor. Estado actual del conocimiento científico. Fundación Cluster-Instituto Euromediterráneo del agua. pp. 85-108.
- Barmiento, S.H., van Gestel, C.A.M., Álvarez-Rogel J., González-Alcaraz MN. 2017. Influence of climate change on the multi-generation toxicity to *Enchytraeus crypticus* of soils polluted by metal/metalloid mining wastes. *Environmental Pollution*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.078>.
- Boesch, D.F; Brinsfield, R.B. 2000. Coastal eutrophication and agriculture: contributions and solutions. *Biological Resource Management: connecting science and policy*. 93-115.
- Canton, M.; Anschutz, P.; Coynel, A.; Posenaeere, P.; Auby, I.; Poirier, D. 2012. Nutrient export to an Eastern Atlantic coastal zone: first modeling+ and nitrogen mass balance. *Biogeochemistry*, 107: 361-377.
- Carreño, M.F. 2015. Seguimiento de los cambios de usos y su influencia en las comunidades naturales en la cuenca del Mar Menor, 1988-2009, con el uso de SIG y Teledetección. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia.
- Carreño, M.F., Esteve, M.A., Martínez, J., Palazón, J.A. and Pardo, M.T. 2008. Habitat changes in coastal wetlands associated to hydrological changes in the watershed. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 77, 475-483.
- Comín, F.; Sánchez Pérez, J.M.; Español, C.; Carranza, F.; Sauvage, S.; Antigüedad, I.; Zabaleta, A. *et al.*. Floodplain capacity to depollute water in relation to the structure of biological communities. *Ecological Engineering* (en prensa).
- Conesa, H.M., Evangelou, M.W., Robinson, B.H., Schulin, R. 2012a. A critical view of current state of phytotechnologies to remediate soils: still a promising tool? *Scientific World Journal*, 12: 1-10.
- Conesa, H.M., Jiménez-Cárceles, F. J. 2007. The Mar Menor lagoon (SE Spain): a singular natural ecosystem threatened by human activities. *Marine Pollution Bulletin*, 54, 839-849.
- Conesa, H.M., María-Cervantes, A., Álvarez-Rogel, J., González-Alcaraz, M.N. 2011. Influence of soil properties on trace element availability and plant accumulation in a Mediterranean salt marsh polluted by mining wastes: Implications for phytomanagement. *Science of the Total Environment*, 409, 4470-4479.
- Conesa, H.M., María-Cervantes, A., Álvarez-Rogel, J., González-Alcaraz, M.N. 2014. Role of rhizosphere and soil properties for the phytomanagement of a salt marsh polluted by mining wastes. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11, 1353-1364.
- Conesa, H.M., Schulin, R. 2010. The Cartagena-La Unión Mining District (SE Spain): a review of environmental problems and emerging phytoremediation solutions after fifteen years research. *Journal of Environmental Monitoring*, 12:1225-1
- Conesa, H.M., Wieser, M., Studer, B., González-Alcaraz, M.N., Schulin, R. 2012b. A critical assessment of soil amendments (slaked lime/acidic fertilizer) for the phytomanagement of moderately contaminated shooting range soils. *Journal of Soils and Sediments*, 12: 565-575.
- David, M. B., L. E. Gentry, D. A. Kovacic & K. M. Smith, 1997. Nitrogen balance in and export from an agricultural watershed. *Journal of Environmental Quality* 26: 1038-1048.
- Elofsson K. 2010. Cost-effectiveness of the Baltic Sea action plan. *Mar Policy*, 34:1043-1050.
- Esteve Selma, M.A., Martínez Martínez, J.; Fitz, C.; Robledano, F.; Martínez Paz, J.M.; Carreño, M.F.; Guaita, N.; Martínez López, J.; Miñano, J. 2016. Conflictos ambientales derivados de la intensificación de los usos en la cuenca del Mar Menor: una aproximación interdisciplinar. pp. 79-



## *Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor*

112. En Leon, V.M y J.M. Bellido. Mar Menor: una laguna singular y sensible. Evaluación científica de su estado. Madrid, Instituto Español de Oceanografía, Ministerio de Economía y Competitividad. 414 p. Temas de Oceanografía, 9. ISBN 978-84-95877-55-0.
- Esteve, M.A.; Carreño, M.F.; Robledano, F.; Martínez-Fernández, J.; Miñano, J. 2008. Dynamics of coastal wetlands and land use changes in the watershed: implications for the biodiversity. In Raymundo E. Russo (Ed.): Wetlands: Ecology, Conservation and Restoration. Nova Science Publishers. New York. pp. 133-175.
- Esteve, M.A.; Calvo, J.F. 2000. Conservación de la naturaleza y biodiversidad en la Región de Murcia. En: Calvo, J.F.; Esteve, M.A. y López Bermúdez, F. (Coord.). Biodiversidad. Contribución a su conocimiento y conservación en la Región de Murcia. Instituto del Agua y Medio Ambiente. Servicio de Publicaciones Universidad de Murcia.
- Farinós, P., F. Robledano, Ma F. Carreño. 2016. Las aves acuáticas del Mar Menor: respuesta al cambio ambiental a distintas escalas. En Leon, V.M y J.M. Bellido (Eds). Mar Menor: una laguna singular y sensible. Evaluación científica de su estado. Madrid, Instituto Español de Oceanografía, Ministerio de Economía y Competitividad. Temas de Oceanografía, 9. pp 213-240.
- Faz, A., Gómez-López, M.D., Zornoza, R., Acosta, J.A., Martínez-Martínez, S., Gómez-Garrido, M. 2014. Composición para la rehabilitación de suelos. Universidad Politécnica de Cartagena. NR: ES 2 450 090 B1
- Fernández, J.A., Esteban, A., Conesa, E., Ochoa, J., Álvarez-Rogel, J. 2012. Nitrate Evolution in Soil, Leaching Water, and Lettuce Plant Crops using Different Fertilization Strategies. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 43:2467-2483.
- García Lorenzo, M.L.; Marimón, J.; Navarro Hervás, M.C.; Pérez Sirvent, C.; Martínez Sánchez, M.J.; Molina Ruiz, J. 2016. Impact of acid mine drainages on surficial waters of an abandoned mining site. Environ Sci Pollut Res () 23:6014–6023.
- García Lorenzo, María de la Luz. 2009. Evaluación de la contaminación por vía hídrica de elementos traza en áreas con influencia de actividades minero-metalúrgicas. Aplicación a la Sierra Minera de Cartagena-la Unión. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia.
- García Pintado, J.; Barberá, G.; Martínez-Mena, M.; Albaladejo, J.; Erena, M.; Castillo, V. 2009. Caracterización y evaluación de fuentes antrópicas de nutrientes transportados por la rambla del Albuñón hacia el Mar Menor. In Cabezas & Senent (Eds): Mar Menor. Estado actual del conocimiento científico. Fundación Cluster-Instituto Euromediterráneo del agua. pp. 167-206.
- García-Aróstegui, J.L., Jiménez-Martínez, J.; Baudron, P.; Hunink, J.; Contreras, S.; Candela, L. 2016. Las aguas subterráneas en el Campo de Cartagena-Mar Menor. En Leon, V.M y J.M. Bellido. Mar Menor: una laguna singular y sensible. Evaluación científica de su estado. Madrid, Instituto Español de Oceanografía, Ministerio de Economía y Competitividad. 414 p. Temas de Oceanografía, 9. ISBN 978-84-95877-55-0.
- García-Lorenzo, M.L.; Martínez-Sánchez, M.J.; Pérez-Sirvent, C. 2014c. Application of a plant bioassay for the evaluation of ecotoxicological risks of heavy metals in sediments affected by mining activities. J. Soils Sediments 14:1753–1765
- García-Lorenzo, M.L.; Martínez-Sánchez, M.J.; Pérez-Sirvent, C; Agudo, I.; Recio, C. 2014b. Isotope geochemistry of waters affected by mining activities in Sierra Minera and Portman Bay (SE, Spain). Applied Geochemistry 51,139–147.
- García-Lorenzo, M.L.; Pérez-Sirvent, C; Martínez-Sánchez, M.J.; Molina-Ruiz, J. 2012a. Trace elements contamination in an abandoned mining site in a semiarid zone. Journal of Geochemical Exploration 113) 23–35
- García-Lorenzo, M.L.; Pérez-Sirvent, C; Martínez-Sánchez, M.J.; Molina Ruiz, J.; Tudela, M.L. 2012b. Spatial distribution and sources of trace elements in sediments affected by old mining activities. Environ Monit Assess 184:7041–7052
- García-Lorenzo, M.L.; Pérez-Sirvent, C; Molina-Ruiz, J.; Martínez-Sánchez, M.J. 2014a. Mobility indices for

## *Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor*

- the assessment of metal contamination in soils affected by old mining activities. *Journal of Geochemical Exploration* 147, 117–129.
- García-Pintado, J., Martínez-Mena, M., Barberá, G.G., Albadalejo, J., Castillo, V.M. 2007. Anthropogenic nutrient sources and loads from a Mediterranean catchment into a coastal lagoon: Mar Menor, Spain. *Science of the Total Environment*, 373: 220-239.
- González Alcaraz, M.N.; Egea, C., Jiménez-Cárceles ,F.J., Párraga, I., María-Cervantes, A., Delgado, M.J., Álvarez-Rogel, J. 2012a. Storage of organic carbon, nitrogen and phosphorus in the soil-plant system of *Phragmites australis* stands from a eutrophicated Mediterranean salt marsh. *Geoderma*, 185-186: 61-72.
- Gonzalez Ciudad, E. 2014. Evaluación en nave cerrada de los riesgos para la salud en tecnosoles procedentes de residuos de minería polimetálica. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia
- González-Alcaraz, M.N., Álvarez-Rogel, J. 2013. Liming and vegetation favor Fe-mobilization in eutrophic wetland soils affected by mine wastes. *Ecological Engineering*, 53, 183-193.
- González-Alcaraz, M.N., Álvarez-Rogel, J., María-Cervantes, A., Egea, C., Conesa, H.M. 2012b. Evolution and phosphorus fractionation in saline Spolic Technosols flooded with eutrophic water. *Journal of Soils and Sediments*, 12, 1316-1326.
- González-Alcaraz, M.N., Conesa, H.M., Álvarez-Rogel, J. 2013a. Nitrate removal from eutrophic wetlands polluted by metal-mine wastes: Effects of liming and plant growth. *Journal of Environmental Management*, 128, 964-972.
- González-Alcaraz, M.N., Conesa, H.M., Álvarez-Rogel, J. 2013b. When liming and revegetation contribute to the mobilization of metals: learning lessons for the phytomanagement of metal-polluted wetlands. *Journal of Environmental Management*, 116, 72-80.
- González-Alcaraz, M.N., Conesa, H.M., Tercero, M.C., Schulin, R., Álvarez-Rogel, J., Egea, C. 2011c. The combined use of liming and *Sarcocornia fruticosa* development for phytomanagement of salt marsh soils polluted by mine wastes. *Journal of Hazardous Materials*, 186, 805-813.
- González-Alcaraz, M.N., Conesa, H.M.; Álvarez-Rogel, J. 2013c. Phytomanagement of strongly acidic, saline eutrophic wetlands polluted by mine wastes: the influence of liming and *Sarcocornia fruticosa* in metals mobility. *Chemosphere*, 90, 2512-2519.
- González-Alcaraz, M.N., Egea, C., María-Cervantes, A., Jiménez-Cárceles, F.J., Álvarez-Rogel, J. 2011b. Effects of eutrophic water flooding on nitrate concentrations in mine wastes. *Ecological Engineering*, 37, 693-702.
- González-Alcaraz, M.N., Jiménez Cárceles, F.J., Egea, C., María-Cervantes, A., Párraga-Aguado, I., Álvarez-Rogel, J., Conesa, H.M. 2011a. Papel de los humedales costeros del Mar Menor en la depuración de aguas eutrofizadas: el caso de la Marina del Carmolí, En: *El Mar Menor. Estado actual del conocimiento científico*. pp. 73-104. Instituto Euromediterráneo del Agua. Murcia.
- González-Alcaraz, M.N., van Gestel, C.A.M. 2015. Climate change effects on enchytraeid performance in metal-polluted soils explained from changes in metal bioavailability and bioaccumulation. *Environmental Research*, 142: 177-184.
- González-Alcaraz, N.N., van Gestel, C.A.M. 2016a. Metal/metalloid (As, Cd and Zn) bioaccumulation in the earthworm *Eisenia andrei* under different scenarios of climate change. *Environmental Pollution*, 215: 178-186.
- González-Alcaraz, N.N., van Gestel, C.A.M. 2016b. Toxicity of a metal(loid)-polluted agricultural soil to *Enchytraeus crypticus* changes under a global warming perspective: variations in air temperature and soil moisture content. *Science of the Total Environment*, 573: 203-211.
- Gren, I.M., Elofsson, K, Jannke, P. 1997. Cost-effective nutrient reductions to the Baltic Sea. *Environmental and Resource Economics* 10, 341-362.
- Gustafson, A., Fleischer, S., Joelsson, A. 2000. A catchment-oriented and cost-effective policy for water protection. 2000. *Ecological Engineering* 14, 419-427.

## *Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor*

- Jiménez-Cárceles, F.J., Álvarez-Rogel, J. 2008. Phosphorus fractionation and distribution in salt marsh soils affected by mine wastes and eutrophicated water: A case study in SE Spain. *Geoderma*, 144: 299-309.
- Jiménez-Cárceles, F.J., Egea, C., Rodríguez-Caparrós, A.B., Barbosa, O.A., Delgado, M.J., Ortiz, R., Álvarez-Rogel, J. 2006. Contents of nitrogen, ammonium, phosphorus, pesticides and heavy metals, in a salt marsh in the coast of the Mar Menor lagoon (SE Spain). *Fresenius Environmental Bulletin*, 15(5): 370-378.
- 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.
- Kabas, S., Arocena, J., Acosta, J.A., Faz, A., Martínez, S., Zornoza, R., Carmona, D.M. 2014. Syrian Bean-caper (*Zygophyllum fabago* L.) Improves Organic Matter and Other Properties of Mine Wastes Deposits. *Journal of Phytoremediation* 16, 366-378.
- Kabas, S., Faz, A., Acosta, J.A., Arocena, J., Zornoza, R., Martínez, S., Carmona, D.M. 2014. Marble Wastes and Pig Slurry Improve the Environmental and Plant-relevant Properties of Mine Tailings. *Environmental Geochemistry and Health* 64, 168-175.
- Kabas, S., Faz, A., Acosta, J.A., Zornoza, R., Martínez, S., Carmona, D.M., Bech, J., 2012. Effect of marble waste and pig slurry on the growth of native vegetation and heavy metal mobility in a mine tailing pond. *Geochemical Exploration* 123, 69-76.
- Kronvang, B., Svendsen, L.M., Jensen, J.P., Dørge, J., 1999. "Scenario analysis of nutrient management at the river basin scale." *Hydrobiologia* vol. 410, pp. 207–212.
- Lacroix, A., Beaudoin, B., Makowsk, D. 2005. Agricultural water nonpoint pollution control under uncertainty and climate variability. *Ecological Economics* 53, 115– 127.
- León, V., Moreno-González, R.; Campillo, J.A. 2016. Contaminantes orgánicos regulados y emergentes en el Mar Menor. En León, V.M y J.M. Bellido. *Mar Menor: una laguna singular y sensible. Evaluación científica de su estado*. Madrid, Instituto Español de Oceanografía, Ministerio de Economía y Competitividad. 414 p. Temas de Oceanografía, 9. ISBN 978-84-95877-55-0.
- Lloret, J.; Marín, A.; Marín-Guirao, L.; Velasco, J. 2005. Changes in macrophytes distribution in a hypersaline coastal lagoon associated with the development of intensively irrigated agriculture. *Ocean & Coastal Management*, 48, 828-842.
- Mantilla Orduz, W. 2010. Desertificación de zonas agrícolas por degradación química en ambientes semiáridos: aplicación Campo de Cartagena (Murcia). Tesis Doctoral. Universidad de Murcia.
- María-Cervantes, A., Conesa, H.M., González-Alcaraz, M.N., Álvarez-Rogel, J. 2010. Rhizosphere and flooding regime as key factors for the mobilization of arsenic and potentially harmful metals in basic mining polluted salt marsh soils. *Applied Geochemistry*, 25, 1722-1733.
- María-Cervantes, A., Conesa, H.M., González-Alcaraz, M.N., Álvarez-Rogel, J. 2011. Mobilisation of As and trace metals in saline, acidic Spolic Technosols: the role of the rhizosphere and flooding conditions. *Journal of Soils and Sediments*, 11, 800-814.
- María-Cervantes, A., Jiménez-Cárceles, F.J., Álvarez-Rogel, J. 2009. As, cd, Cu, Mn, Pb, and Zn contents in sediments and mollusks (*Hexaplex trunculus* and *Tapes decussatus*) from coastal zones of a Mediterranean lagoon (Mar Menor, SE Spain) affected by mining wastes. *Water, Air and Soil Pollution*, 200, 289-304.
- Marimón Sánchez, J.2016. Valorización de residuos industriales en el desarrollo de técnicas de tratamiento innovadoras en la recuperación de suelos contaminados en la Región de Murcia. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia.
- Marín-Guirao, L., Cesar, A., Marín, A. & Vita, R. 2005b. Assessment of sediment metal contamination in the Mar Menor costal lagoon (SE Spain): Metal distribution, toxicity, bioaccumulation and benthic community structure. *Ciencias Marinas* 31, 413-428.
- Marín-Guirao, L., Cesar, A., Marín, A., Lloret, J. & Vita, R. 2005a. Establishing the ecological quality status of

## *Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor*

soft-bottom mining-impacted coastal water bodies in the scope of the Water Framework Directive. *Marine Pollution Bulletin* 50, 374-387.

- Marín-Guirao, L., Marín-Atucha, A., Lloret-Barba, J., Martínez-López, E. & García-Fernández, A.J. 2005c. Effects of mining wastes on a seagrass ecosystem: metal accumulation and bioavailability, seagrass dynamics and associated community structure. *Marine Environmental Research* 60, 317-337.
- Martínez Fernández J., Esteve M.A., Martínez-Paz J.M., Carreño F., Robledano, F., Ruiz M., Alonso F. 2007. Simulating management options and scenarios to control nutrient load to Mar Menor, Southeast Spain. *Transitional Waters Monographs. TWM, Transit. Waters Monogr.* 1: 53-70.
- Martínez Fernández, J. & M. A. Esteve Selma, 2003. El papel de las aguas subterráneas en la exportación de nutrientes de origen agrícola hacia la laguna del Mar Menor. In Fornés, J.M. & R. Llamas (eds), *Conflictos entre el desarrollo de las aguas subterráneas y la conservación de los humedales: litoral mediterráneo*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 191-213.
- Martínez Fernández, J., Esteve, M.A., Robledano, F., Pardo, M.T., Carreño, M.F. 2005. Aquatic birds as bioindicators of trophic changes and ecosystem deterioration in the Mar Menor lagoon (SE Spain). *Hydrobiologia*, 550: 221-235.
- Martínez Fernández, J., Fitz, C., Esteve, MA, Guaita, N., Martínez-López, J. 2013. Modelización del efecto de los cambios de uso del suelo sobre los flujos de nutrientes en cuencas agrícolas costeras: el caso del Mar Menor (Sudeste de España). *Ecosistemas* 22(3):84-94
- Martínez López, S. 2010. El arsénico en suelos con influencia minera en ambientes semiáridos. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia.
- Martínez López, S.; Martínez-Sánchez, M.J.; Pérez-Sirvent, C; Bech, J.; Gómez Martínez, M.C; García Fernández, A.J. 2014. Screening of wild plants for use in the phytoremediation of mining-influenced soils containing arsenic in semiarid environments. *J. Soils Sediments* , 14:794-809
- Martínez P., Faz, Á., Acosta J.A., Carmona, D.M., Martínez, S. 2011. A multidisciplinary study for mining landscape reclamation. A study case on two tailing ponds in the Region of Murcia (SE Spain). *Physics and Chemistry of the Earth* 36, 1331-1344.
- Martínez Paz, J.M.; Martínez Fernández, J.; Esteve Selma, M.A. 2007. Evaluación económica del tratamiento de drenajes agrícolas en el Mar Menor (SE España). *Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros*, 215/216. 211-231.
- Martínez Sánchez y Pérez Sirvent. 2014. Diagnóstico y recuperación de la contaminación del suelo en portmán-sierra minera en: *El Portus Magnus del Mediterráneo Occidental. Pasado, presente y futuro de portmán*. Editor Pedro Baños. Servicio de Publicaciones Universidad de Murcia. 501 pag.
- Martínez Sánchez, M. J., Pérez Sirvent, C., *et al.* 2005.. Desertificación: Monitorización mediante indicadores de degradación química. Programa de iniciativa comunitaria INTERREG IIIB ESPACIO MEDOCC. Proyecto Desernet. Acción piloto Región de Murcia. 250pp. Ed. Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente.
- Martínez Sanchez, M. J.; Perez Sirvent, C y Martínez Martínez, L.B. 2017, en ejecución. Estudio de los sedimentos en suspensión en la columna de agua del Mar Menor en 2016.
- Martínez Sanchez, M. J.; Perez Sirvent, C., 2009b. Análisis del estado de la contaminación del suelo en el sistema Campo de Cartagena - Mar Menor. 207-245. En: *el mar Menor. Estado actual del conocimiento científico*. 2009b.
- Martínez-Fernández, J.; Esteve-Selma, M.A; Martínez-Paz, J.M.; Carreño-Fructuoso, M.F.; Martínez-López, J.; Robledano, F.; Farinós, P. 2014. Trade-Offs Between Biodiversity Conservation and Nutrients Removal in Wetlands of Arid Intensive Agricultural Basins: The Mar Menor Case, Spain. En S. E. Jørgensen, N-B. Chang & F-L Xu (Eds.): *Ecological Modelling and Engineering of Lakes and Wetlands. Developments in Environmental Modelling*, Volume 26. pp. 275-310.
- Martínez-López J., Martínez-Fernández J., Naimi B., Carreño M.F., Esteve M.A. 2015. An open-source spatio-dynamic wetland model of plant community responses to hydrological pressures. *Ecological*



## *Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor*

Modelling, 306: 326-333.

- Martínez-López, J.; Carreño, M.F.; Palazón-Ferrando, J.A.; Martínez-Fernández, J.; Esteve, M.A. 2016. Remote sensing of plant communities as a tool for assessing the condition of semiarid Mediterranean saline wetlands in agricultural catchments. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 26: 193-204.
- Martínez-Martínez, S., J.A. Acosta, A. Faz, D.M. Carmona, R. Zornoza, C. Cerda, 2013. Assessment of the lead and zinc contents in natural soils and tailing ponds from the Cartagena-La Unión mining district, SE Spain. *Journal of Geochemical Exploration*. 124, pp. 166 - 175.
- Martínez-Paz JM, Perni A, Martínez-Carrasco F. 2013. Assessment of the programme of measures for coastal lagoon environmental restoration using cost-benefit analysis. *Eur Plan Stud*, 21: 131-148.
- Martínez-Sánchez, M. J., Pérez-Sirvent, C., *et al.* 2009a. Manual de procedimientos para el diagnóstico y la monitorización de la desertificación mediante indicadores de degradación química (Método IADQS). Desertification diagnosis and monitoring by way of chemical degradation indicators produce handbook. Proyecto DESERTNET 2.. INTERREG IIIB. . ISBN 978-84-693-0003-9. 80 pp.
- Martínez-Sánchez, M. J., Pérez-Sirvent, C., *et al.* Niveles de fondo y niveles referencia de metales pesados en suelos de la Región de Murcia. . 2007. Universidad de Murcia y Consejería de Desarrollo Sostenible y Ordenación del Territorio, CARM. Murcia. 306 pp.
- Martínez-Sánchez, M.J.; García-Lorenzo, M.L.; Pérez-Sirvent, C; Bech, J. 2012. Trace element accumulation in plants from an aridic area affected by mining activities. *Journal of Geochemical Exploration* 123, 8-12.
- Martínez-Sánchez, M.J.; Martínez López, S.; Martínez Martínez, L.B.; Pérez Sirvent, C 2013. Importance of the oral arsenic bioaccessibility factor for characterising the risk associated with soil ingestion in a mining-influenced zone. *Journal of Environmental Management* 116 10-17.
- Martínez-Sánchez, M.J.; Pérez-Sirvent, C; Molina-Ruiz, J.; Tudela, M.L.; García Lorenzo, M.L. 2011. Monitoring salinization processes in soils by using a chemical degradation indicator. *Journal of Geochemical Exploration* 109, 1-7
- Mattikalli, N; Richards, K. 1996. Estimation of Surface Water Quality Changes in Response to Land Use Change: Application of The Export Coefficient Model Using Remote Sensing and Geographical Information System. *Journal of Environmental Management* 48: 263-282.
- Meissner, R., Seeger, J., Rupp, H., 2002. "Effects of agricultural land use changes on diffuse pollution of water resources." *Irrigation and Drainage*, vol. 51, pp. 119-127.
- Moreno-Cornejo, J., R. Zornoza, A. Faz, 2014. Carbon and nitrogen mineralization during decomposition of crop residues in a calcareous soil. *Geoderma*. 230-231, pp. 58 - 63. Elsevier, ISSN 0016-7061.
- Moreno-Cornejo, J., R. Zornoza, A. Faz, R.M. Rosales, 2013. Effects of pepper crop residues and inorganic fertilizers on soil properties relevant to C cycling and broccoli production. *Soil Use and Management*. 29, pp. 519 - 530. ISSN 1475-2743.
- Moreno-Cornejo, J., R. Zornoza, T.A. Doane, A. Faz, W.R. Horwath, 2015. Influence of cropping system management and crop residue addition on soil carbon turnover through the microbial biomass. *Biology and Fertility of Soils*. 51 - 7, pp. 839 - 845. ISSN 1432-0789.
- Moreno-González, R., Campillo, J.; García, V., León, V. M. 2013. Seasonal input of regulated and emerging organic pollutants through surface watercourses to a Mediterranean coastal lagoon. *Chemosphere*, 92, 247-257.
- Navarro Hervás, C.; Pérez Sirvent, C.; Martínez-Sánchez, M.J.; García-Lorenzo, M.L.; Molina-Ruiz, J. 2012. Weathering processes in waste materials from a mining area in a semiarid zone. *Applied Geochemistry* 27, 1991-2000.
- Navarro Hervás, Cortes. 2004. Movilidad y biodisponibilidad de metales pesados en el emplazamiento minero Cabezo Rajao (Murcia). Tesis Doctoral. Universidad de Murcia.

## *Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor*

- Navarro, M.C.; C. Pérez-Sirvent, M.J. Martínez-Sánchez, J. Vidal, P.J. Tovar and J. Bech..2008. Abandoned mine sites as a source of contamination by heavy metals: A case study in a semi-arid zone. *Journal of Geochemical Exploration*, 96, 183–193.
- Pardo, M. T., Esteve, M .A., Giménez, A., Martínez-Fernández, J., Carreño, M. F., Serrano, J. and Miñano, J. 2008. Assessment of the hydrological alterations on wandering beetle assemblages (coleoptera: Carabidae and Tenebrionidae) in coastal wetlands of arid mediterranean systems). *Journal of Arid Environments*, 72: 1803– 1810.
- Pärn, J; Pinay, G.; Mander, U. 2012. Indicators of nutrients transport from agricultural catchments under temperate climate: A review. *Ecological Indicators*, 22: 412.
- Parra, A., Zornoza, R., Conesa, E., Gómez-López, M.D., Faz, A., 2016. Evaluation of the suitability of three Mediterranean shrub species for phytostabilization of pyritic mine soils. *Catena*, 136, pp. 59 - 65.
- Párraga Aguado, I., González-Alcaraz, M.N., Álvarez-Rogel, J., Conesa, H.M. 2014a. Assessment of the employment of halophyte plant species for the phytomanagement of mine tailings in semiarid areas. *Ecological Engineering*, 71: 598-604.
- Párraga-Aguado, I., Álvarez-Rogel, J., González-Alcaraz, M.N., Jiménez-Cárceles, F.J., Conesa, H.M. 2013a. Assessment of metal(loid)s availability and their uptake by *Pinus halepensis* in a Mediterranean forest impacted by abandoned tailings. *Ecological Engineering* 58: 84– 90.
- Párraga-Aguado, I., González-Alcaraz, M.N., Álvarez-Rogel, J., Jiménez-Cárceles, F.J., Conesa, H.M. 2013b. The importance of edaphic niches and pioneer plant species succession for the phytomanagement of mine tailings. *Environmental Pollution*, 176: 134-143.
- Párraga-Aguado, I., González-Alcaraz, M.N., Schulin, R., Conesa, H.M. 2015. The potential use of *Piptatherum miliaceum* for the phytomanagement of mine tailings in semiarid areas: role of soil fertility and plant competition. *Journal of Environmental Management*.158:74-84.
- Párraga-Aguado, I., López-Orenes, A., Ferrer-Ayala, M.A, González-Alcaraz, M.N., Conesa, H.M. 2016. Evaluation of the environmental plasticity in the xerohalophyte *Zygophyllum fabago* L. for the phytomanagement of mine tailings in semiarid areas. *Chemosphere*. 161: 259-265.
- Párraga-Aguado, I., Querejeta, J.I., González-Alcaraz, M.N., Conesa, H.M. 2014b. Metal(loid) allocation and nutrient retranslocation in *Pinus halepensis* trees growing on semiarid mine tailings. *Science of the Total Environment*, 485: 406 -414.
- Párraga-Aguado, I., Querejeta, J.I., González-Alcaraz, M.N., Jiménez-Cárceles, F.J., Conesa, H.M. 2014c. Elemental and stable isotope composition of *Pinus halepensis* foliage along a metal(loid) polluted gradient: implications for phytomanagement of mine tailings in semiarid areas. *Plant and Soil*, 379: 93-107.
- Pérez Espinosa, V. 2014. Inmovilización de elementos potencialmente tóxicos en zonas mineras abandonadas mediante la construcción de Tecnosoles y barreras reactivas permeables. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia.
- Pérez Ruzafa, A. & R. Aragón, 2003. Implicaciones de la gestión y el uso de las aguas subterráneas en el funcionamiento de la red trófica de una laguna costera. In Fornés, J. M. & R. Llamas (eds), *Conflictos entre el desarrollo de las aguas subterráneas y la conservación de los humedales: litoral mediterráneo*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid: 215–245.
- Pérez Sirvent, C.; Hernández Pérez, C.; Martínez Sánchez, M.J.; García Lorenzo, M.L.; Bech. 2015. J. Geochemical characterization of surface waters, topsoils and efflorescences in a historic metal-mining area in Spain.. *J Soils Sediments* DOI 10.1007/s11368-015-1141-3.
- Pérez-Sirvent, C; Martínez-Sánchez, M.J.; Martínez López, S.; Bech, J.; Bolan, N. 2012. Distribution and bioaccumulation of arsenic and antimony in *Dittrichia viscosa* growing in mining-affected semiarid soils in southeast Spain. *Journal of Geochemical Exploration* 123 () 128–135.
- Pérez-Sirvent, C. Martínez-Sánchez, M.J., García-Lorenzo, M.L. Molina, J. Tudela, M.L 2009. Geochemical background levels of zinc, cadmium and mercury in anthropically influenced soils located in a semi-

## *Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor*

- arid zone (SE, Spain). *Geoderma*, Volume 148, Issues 3-4, 15 January, Pages 307-317.
- Perni, A.; Martínez-Carrasco, F.; Martínez-Paz, J.M. 2011. Economic valuation of coastal lagoon environmental restoration: Mar Menor (SE Spain). *Ciencias Marinas*, 37: 175-190.
- Perni, A.; Martínez-Paz, J.M. 2013. A participatory approach for selecting cost-effective measures in the WFD context: The Mar Menor (SE Spain). *Science of the Total Environment*, 458–460: 303–311.
- Robledano F, Esteve M.A, Farinós P, Carreño M.F, Martínez J. 2010. Terrestrial birds as indicators of agricultural-induced changes and associated loss in conservation value of mediterranean wetlands. *Ecological Indicators*, 10: 274-286
- Robledano, F., Esteve, M.A., Martínez-Fernández, J., Farinos, P. 2011. Determinants of wintering waterbird changes in a Mediterranean coastal lagoon affected by eutrophication. *Ecological Indicators* 11. 395-406.
- Rodríguez Estrella, T. 2009. El Mar Menor: Geología y sus relaciones con las aguas subterráneas del continente. In Cabezas & Senent (Eds): *Mar Menor. Estado actual del conocimiento científico*. Fundación Cluster-Instituto Euromediterráneo del agua. pp. 47-84.
- Ruiz, M. y Velasco, J. 2009. Nutrient Bioaccumulation in *Phragmites australis*: Management Tool for Reduction of Pollution in the Mar Menor. *Water, Air and Soil Pollution*. DOI 10.1007/s11270-009-0064-2.
- Science for Environment Policy. 2010. Irrigation threatening steppe birds in Mediterranean wetlands. *Science for Environment Policy, News Alert Issue*, 181. January 2010. European Commission DG Environment News Alert Service.
- Senent Alonso, M.; Martínez Vicente, D.; Cabezas, F.; García Aróstegui, J.L.; Baudron, P. 2009. Aproximación mediante modelización matemática a la evaluación de las descargas del acuífero cuaternario del Campo de Cartagena al Mar Menor (Murcia). In Cabezas & Senent (Eds): *Mar Menor. Estado actual del conocimiento científico*. Fundación Cluster-Instituto Euromediterráneo del agua. pp. 109-130.
- Serrano, J.F.; Sironi, J.S. 2009. Cuantificación y evolución de la carga contaminante de nutrientes y plaguicidas en aguas del Mar Menor y su relación con los aportes hídricos de la Rambla del Albuñón y otros aportes subterráneos. In Cabezas & Senent (Eds): *Mar Menor. Estado actual del conocimiento científico*. Fundación Cluster-Instituto Euromediterráneo del agua. pp. 245-284.
- Tercero MC, Álvarez-Rogel, J., Conesa HM, Párraga, I, González-Alcaraz MN. 2016. Phosphorus retention and fractionation in soils and *Phragmites australis* plants in eutrophic wetlands: a one-year mesocosms experiment under fluctuating conditions. *Journal of Environmental Management*, 190: 197-207.
- Tercero, M.C., Álvarez-Rogel, J., Conesa, H.M., Ferrer, M.A., Calderón, A.A., López-Orenes, A., González-Alcaraz, M.N. 2015. The role of *Phragmites australis* in the biogeochemical processes of the water-soil-plant system under alternating flooding-drying conditions with eutrophic water: a one-year mesocosms experiment. *Plant and Soil*. 396:109-125.
- Tovar Frutos, P.J. 2009. Metodología de diagnóstico físico-químico e isotópico de aguas superficiales y sus fuentes contaminantes. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia.
- Trepel M. 2010. Assessing the cost-effectiveness of the water purification function of wetlands for environmental planning. *Ecol Complex*, 7: 320–326.
- Turner, K., Georgiou, S., Green, I.M., Wulff, F., Barret, S., Soderqvist, T., Bateman, I., Folke, C., Langaas, S., Zyllicz, T, Maler, K.G., Markowska, A. 1999. Managing nutrient fluxes and pollution in the Baltic: an interdisciplinary simulation study. *Ecological economics* 30, 333-352.
- Velasco, J.; Lloret, J.; Millan, A.; Marin, A.; Barahona, J.; Abellán, P.; Sánchez-Fernández, D. 2006. Nutrient and particulate inputs into the Mar Menor lagoon (SE Spain) from an intensive agricultural watershed. *Water, Air and Soil Pollution*, 176: 37-56.
- Vidal-Abarca, M.R., Esteve, M.A., Suárez, M.L. (Coordinadores), 2003. *Los humedales de la Región de*



## *Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor*

Murcia. Dirección General del Medio Natural. Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente de la Región de Murcia, Murcia, 50 pp.

- Vidal-Abarca, M.R.; Esteve, M.A.; Suárez, M.L.; Gómez, R.; Robledano, F.; Martínez, 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. Murcia.
- Xue, Y., B. M. David, E. L. Gentry & D. A. Kovacic, 1998. Kinetics and modelling of dissolved phosphorus export from a tile-drained agricultural watershed. *Journal of Environmental Quality* 27: 917–922.
- Zanou, B.; Kontogianni, A.; Skourtos, M. 2003. A classification approach of cost effective management measures for the improvement of watershed quality. *Ocean & Coastal Management* 46: 957-983.
- Zanuzzi, A., Faz, A., Acosta, J.A. 2013. Chemical stabilization of metals in the environment: a feasible alternative for remediation of mine soils. *Environmental Earth Science* 70, 2623-2632.
- Zornoza, R., Acosta, J.A., Faz, A., Bååth, E. 2016. Microbial growth and community structure in acid mine soils after addition of different amendments for soil reclamation. *Geoderma* 272, 64-72.
- Zornoza, R., Acosta, J.A., Martínez-Martínez, S., Faz, A., Bååth, E. 2015. Main factors controlling microbial community structure and function after reclamation of a tailing pond with aided phytostabilization. *Geoderma* 245-246, 1-10.
- Zornoza, R., D.M. Carmona, J.A. Acosta, S. Martínez-Martínez, N. Weiss, A. Faz., 2012. The effect of former mining activities on contamination dynamics in sediments, surface water and vegetation in El Avenque stream, SE Spain. *Water, Air and Soil Pollution*. 223, pp. 519 – 532.
- Zornoza, R., Faz, A., Carmona, D.M., Acosta, J.A., Martínez, S., De Vreng, A. 2013. Carbon mineralization, microbial activity and metal dynamics in tailing ponds amended with pig slurry and marble waste. *Chemosphere* 90, 2606- 2613.
- Zornoza, R., Faz, A., Carmona, D.M., Kabas, S., Martínez-Martínez, S., Acosta, J.A. 2012. Plant Cover and Biochemical Properties in a Mine Tailing Pond Five Years after Application of Marble Wastes and Organic Amendments. *Pedosphere* 22, 22-32.
- Zornoza, R., Moreno-Barriga, F., Acosta, J.A., Muñoz, M.A., Faz, A. 2016. Stability, nutrient availability and hydrophobicity of biochars derived from manure, crop residues, and municipal solid waste for their use as soil amendments. *Chemosphere* 144, 122-130.