

¿Cómo puede la restauración de los humedales costeros mitigar el cambio climático? Qué sabemos y qué queda por esclarecer



© Universidad de Salento-LIFEWatch ERIC

MENSAJES CLAVE

- **La restauración de los humedales costeros es una potencial solución basada en la naturaleza (NbS) para mitigar el cambio climático.** Los humedales restaurados actúan como sumideros netos de carbono al aumentar las reservas de carbono en la biomasa vegetal y los suelos/sedimentos sin el correspondiente aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).
- **Existen variaciones significativas en la evidencia sobre las reservas de carbono y las emisiones de GEI son desiguales según el sitio y el tipo de humedal.** Si bien la mayoría de los datos existentes proceden de regiones tropicales y subtropicales, la Europa templada apenas se ha estudiado. Los humedales de agua dulce y las aguas de transición son frecuentes en Europa, pero están infrarrepresentados a la hora de aportar pruebas empíricas de los efectos de la restauración en el almacenamiento de carbono y los flujos de GEI. La puesta en marcha de un seguimiento específico en Europa puede salvar estas lagunas.
- **Numerosos estudios se centran en las reservas de carbono, pero no en las emisiones de GEI.** A pesar de la importancia de los flujos netos de GEI para comprender y cuantificar eficazmente los beneficios de las medidas de restauración, no hay muchos estudios sobre el balance de masas. Priorizar las mediciones de los flujos de GEI es fundamental para superar las lagunas en el conocimiento y orientar la financiación de las medidas de restauración.
- **El reporte de los datos sobre los flujos de GEI no está estandarizado.** Los datos existentes, especialmente los relativos a los flujos de GEI, no están normalizados y, por lo tanto, los resultados no son comparables. Es necesario estandarizar tanto el monitoreo como el reporte, siguiendo el ejemplo de los informes de la Directiva Marco del Agua (DMA), así como una verificación para ampliar estas cifras del ámbito local al de la UE.

Introducción

Entre los servicios ecosistémicos que proporcionan los humedales costeros, su capacidad para capturar y almacenar carbono en los suelos y sedimentos a largo plazo ha suscitado un interés especial. Este potencial de secuestro de carbono a largo plazo sitúa actualmente la protección y restauración de los humedales costeros como uno de los componentes clave de las opciones de mitigación del cambio climático a nivel de la UE y mundial.

¿Qué son los humedales costeros?

Los humedales costeros son ecosistemas situados en la interfaz entre la tierra y el mar, caracterizados por inundaciones periódicas o permanentes con agua salada, salobre o dulce. Albergan vegetación hidrófita o sumergida e incluyen hábitats como marismas saladas, praderas marinas, marismas y manglares. Según la Convención de Ramsar, los humedales abarcan zonas de marismas, turberas, pantanos o aguas, ya sean naturales o artificiales, con agua estancada o corriente, dulce, salobre o salada, incluidas las zonas marinas costeras con menos de seis metros de profundidad en marea baja. Estos ecosistemas pres-

tan servicios fundamentales, como el apoyo a la biodiversidad, la protección del litoral y el almacenamiento de carbono, pero sigue siendo difícil cartografiar su extensión total, lo que a menudo lleva a subestimar su cobertura mundial.

¿Cuáles son las trayectorias de carbono en los humedales costeros?

Los humedales costeros actúan como sumideros de carbono, almacenando carbono en la biomasa vegetal y en los suelos/sedimentos a través de procesos conocidos colectivamente como "trayectorias de carbono azul" (Figura 1). La fotosíntesis captura el CO_2 atmosférico, el cual se almacena en la vegetación y los sedimentos. Las condiciones anóxicas y anegadas ralentizan la descomposición, lo que permite que el carbono se acumule a lo largo de siglos. Los procesos microbianos, como la metanogénesis, se producen en condiciones de bajo nivel de oxígeno, lo que genera metano (CH_4), aunque a menudo se suprime en entornos salinos. La degradación de los humedales, especialmente la provocada por el aumento de la materia orgánica, conduce a una disminución del potencial de oxidación-reducción en los sedimentos y da lugar a un aumento de las emisiones de CH_4 . La restauración de los humedales degradados puede reactivar las trayectorias del carbono azul, mejorar la captura de carbono y contribuir a la mitigación del cambio climático.

¿Qué son los flujos de GEI en los humedales costeros?

Los flujos de gases de efecto invernadero (GEI) en los humedales costeros implican intercambios de CO_2 , CH_4 y N_2O entre los suelos, el agua y la vegetación de los humedales y la atmósfera (Figura 1). Si bien estos ecosistemas actúan como fuertes sumideros de carbono, también pueden emitir metano y óxido nitroso, especialmente en condiciones de agua dulce o ricas en nutrientes. La restauración suele mejorar el almacenamiento de carbono, pero no siempre garantiza la reducción de las emisiones de CH_4 o N_2O , lo que pone de relieve la complejidad de los flujos netos de GEI. Por lo tanto, es fundamental realizar mediciones y elaborar informes precisos para fundamentar las medidas climáticas.

La cuestión política clave es si la restauración mejora realmente el balance neto de gases de efecto invernadero (GEI) en los humedales costeros, más allá de los modelos teóricos. En el marco de RESTORE4Cs, hemos realizado una síntesis de estudios revisados por pares¹ que comparan humedales costeros degradados y restaurados para evaluar su potencial de mitigación del cambio climático en todo el mundo.

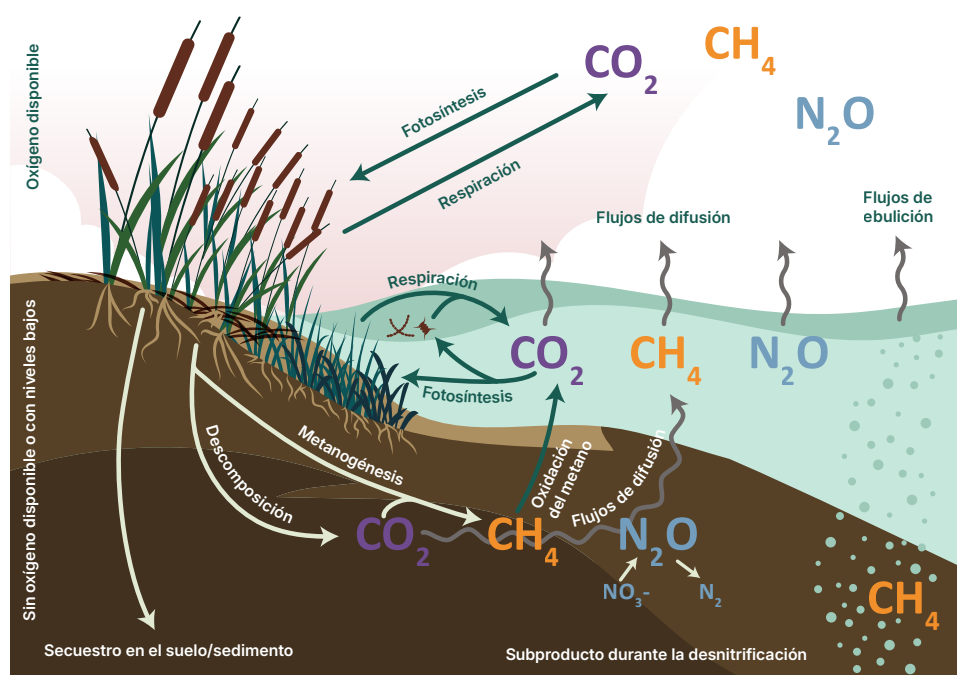


Figura 1. Resumen esquemático de los flujos de carbono y las trayectorias de los GEI en los humedales costeros. © Universidad de Salento-LIFEWatch ERIC

Lecciones aprendidas de una revisión sistemática de los conocimientos sobre la restauración de humedales costeros

La restauración de los humedales costeros es una potencial solución basada en la naturaleza para la mitigación del cambio climático

La restauración de los humedales costeros aumenta el carbono almacenado tanto en la biomasa vegetal aérea y subterránea como en los suelos o sedimentos de marea. Las emisiones de GEI de CO_2 , CH_4 y N_2O reportadas no muestran un cambio sistemático después de la restauración, como es habitual en otros tipos de humedales. Basándonos en los conocimientos científicos actuales, podríamos concluir que, en general, la restauración es una herramienta potencial para la mitigación del cambio climático (Figura 2).

La evidencia sobre los flujos de GEI es limitada y desigual

Los datos existentes sobre los flujos netos de gases de efecto invernadero (GEI), que representan el equilibrio entre las emisiones y el almacena-

miento, son limitados e incoherentes en el caso de los humedales costeros. Esto dificulta la evaluación completa de los beneficios climáticos de los esfuerzos de restauración en Europa. La mayoría de los estudios disponibles proceden de regiones tropicales, mientras que las costas templadas europeas, y especialmente los humedales de agua dulce y salobre comunes en toda Europa, siguen estando poco estudiados. La investigación se centra principalmente en las reservas de carbono, y son mucho menos numerosos los estudios que miden los flujos de GEI, a pesar de que estos flujos determinan si la restauración conduce a beneficios climáticos netos.

Ejemplos relacionados de las costas europeas, concretamente de los humedales mediterráneos²⁻⁵, muestran que la gestión hidrológica y el estado de conservación influyen considerablemente en los flujos netos de carbono y las emisiones de gases de efecto invernadero. Estos estudios indican de manera sistemática que las prácticas de restauración o gestión adaptativa

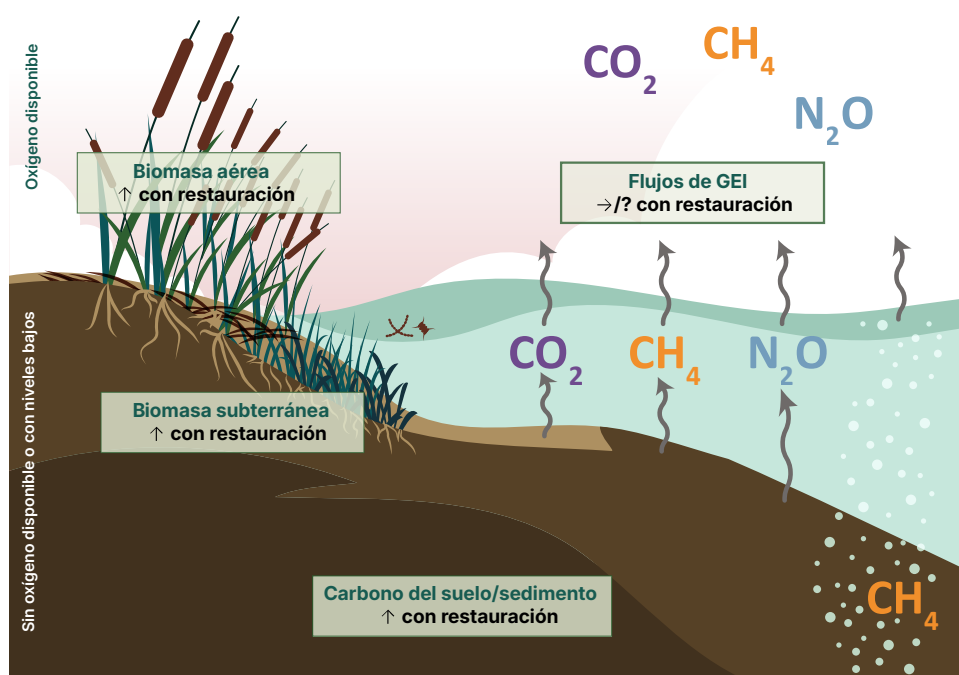


Figura 2: Resumen de las reservas de carbono y los flujos de GEI estudiados en nuestra síntesis bibliográfica, incluidos los resultados clave. © Universidad de Salento-LIFEWatch ERIC



Delta del Danubio, Rumanía © Universidad de Salento-LIFEWatch ERIC

tienden a mejorar la reducción neta de emisiones, y que el metano desempeña un papel especial debido a su alta sensibilidad a factores ambientales como la salinidad y la temperatura⁴. También destacan que la gestión adaptativa solo será eficaz si se mantienen el régimen hidrológico y la estructura del ecosistema. Aunque esto requiere una mayor confirmación empírica, esto debería servir como principio rector para la planificación y la ejecución de la restauración. Más concretamente, estos estudios muestran que una buena gestión hidrológica y un estado general saludable del ecosistema son esenciales para reducir las emisiones, en particular el metano, que es muy sensible a los cambios ambientales.

Se necesita un seguimiento y reporte estandarizados sobre los resultados de la restauración

Nuestra síntesis bibliográfica revela que los resultados de la restauración se comunican de forma no sistemática e incompleta, lo que limita enormemente cualquier síntesis cuantitativa. Muchos estudios carecen de protocolos de seguimiento estandarizados, bases de referencia previas a la restauración o sitios de control comparables. A menudo faltan detalles metodológicos clave, como el momento y el número de mediciones, el contexto medioambiental y las acciones específicas de restauración. Los datos sobre las reservas

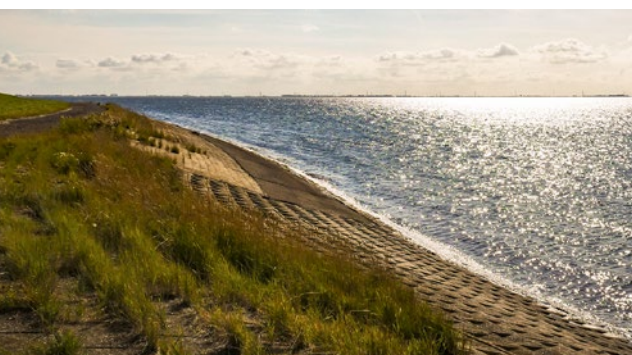
de carbono del suelo y la biomasa, y sobre los flujos de CO₂, CH₄ y N₂O, suelen estar ausentes o se recopilan utilizando enfoques no comparables, lo que dificulta las evaluaciones a escala continental o mundial de los beneficios climáticos.

El proyecto RESTORE4Cs demuestra cómo garantizar la coherencia metodológica entre los distintos sitios, lo cual es fundamental para la fiabilidad de la recopilación de datos. Al armonizar de antemano los protocolos de muestreo y los procedimientos de laboratorio, el proyecto minimiza la variabilidad y refuerza la comparabilidad de los resultados. Este enfoque estandarizado sustenta la integración de indicadores ecológicos, datos sobre el uso del suelo y variables climáticas en modelos espacialmente explícitos, lo que permite evaluar las presiones y el potencial de mitigación en todos los tipos de humedales. Este rigor no solo mejora la validez científica, sino que también garantiza que los resultados de la restauración sean escalables y relevantes para las políticas.

Relevancia de la restauración de los humedales costeros, conocimiento sobre el almacenamiento de carbono y flujos de GEI para la legislación, marcos estratégicos y procesos relacionados

La importancia de la restauración de los humedales costeros para el almacenamiento de carbono y la mitigación de los GEI ya está reconocido en las políticas y procesos de la UE y mundiales. Las conclusiones de esta revisión de los conocimientos existentes pueden ayudar a mejorar su aplicación. Entre ellas se incluyen, en particular:

- **Acuerdo de París y NDC.** Los humedales costeros restaurados pueden servir como sumideros netos de carbono y ser reconocidos como medidas de mitigación basadas en la naturaleza dentro de las contribuciones determinadas a nivel nacional de la UE, con una contabilidad explícita de la biomasa y el carbono del suelo respaldada por un sistema adecuado de monitoreo, reporte y verificación (MRV).
- **Convención de Ramsar sobre los Humedales.** Muchos humedales costeros son sitios Ramsar. Su restauración promueve la conservación del hábitat, la regulación del agua y los objetivos de mitigación del cambio climático.
- **Ley del Clima de la UE.** El objetivo vinculante de neutralidad climática para 2050 y el objetivo de reducción para 2030 reconocen la restauración de los ecosistemas, incluidos los humedales costeros, como contribuyentes a los sumideros de carbono de la UE.
- **Reglamento LULUCF de la UE (2023-2030).** Los humedales costeros restaurados pueden reforzar los sumideros nacionales del sector terrestre y contribuir al cumplimiento del objetivo de sumideros a escala de la UE.
- **Reglamento de la UE sobre la restauración de la naturaleza y Estrategia de Biodiversidad 2030.** Los objetivos de restauración de las marismas salinas, las praderas marinas y otros ecosistemas costeros contribuyen tanto a la mejora de los sumideros de carbono como a los objetivos de biodiversidad.
- **Decenio de las Naciones Unidas para la Restauración de los Ecosistemas y Decenio de los Océanos de las Naciones Unidas.** Ambas iniciativas dan prioridad a la ampliación de la restauración de los humedales costeros, incluidas las marismas salinas y los manglares, como soluciones clave basadas en la naturaleza para la acción climática, la resiliencia costera y el progreso hacia los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Las acciones en estos hábitats pueden servir de ejemplo al demostrar una captura de carbono cuantificable junto con beneficios ecológicos colaterales, monitoreados con indicadores combinados de carbono y ecológicos.
- **Mercados y financiación del carbono.** Los marcos de certificación del carbono azul están siendo ampliados para incluir los humedales costeros, lo que exige que los proyectos demuestren su “adicionalidad”, permanencia y ausencia de fugas. Las normas se alinean cada vez más con las normas de la UE, como el Reglamento sobre la absorción de carbono y la agricultura de carbono (CRCF) y los marcos actualizados de financiación sostenible (2025), lo que refuerza la MRV y dirige el capital hacia resultados climáticos de alta integridad, abriendo nuevas fuentes de financiación para la restauración.
- **Inventarios y modelos nacionales de GEI.** Los inventarios nacionales de GEI y los modelos del sistema terrestre deben distinguir entre humedales restaurados y degradados, ya que los sistemas restaurados almacenan más biomasa y carbono del suelo y emiten una cantidad mínima de metano. Reflejar estas diferencias mejora la precisión de los informes nacionales y permite captar todo el valor de mitigación de la restauración.



Delta del suroeste de los Países Bajos, Países Bajos
© Universidad de Salento-LIFEWatch ERIC

Integración de la restauración de los humedales costeros en la política climática de la UE y la contabilidad del carbono: recomendaciones políticas

A partir de los conocimientos generados por el proyecto RESTORE4Cs, existe la oportunidad de promover la restauración de los humedales costeros y potenciar su papel en el almacenamiento de carbono y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero dentro de las políticas existentes. Sin embargo, la función de mitigación del cambio climático de estos ecosistemas no puede compensar las emisiones globales de gases de efecto invernadero, por lo que sigue siendo esencial una profunda descarbonización de la economía mundial. Bajo estas premisas, el papel de los ecosistemas y, en particular, de los humedales costeros, en la mitigación del cambio climático puede potenciarse mediante las siguientes medidas políticas:

Acción 1

Establecer un sistema armonizado de monitoreo, reporte y verificación (MRV) con datos abiertos (principios FAIR).

Un marco MRV unificado es esencial para una contabilidad climática creíble y comparable en toda la UE. Ya se ha logrado una armonización similar en el caso de la eutrofización, por ejemplo, a través del Manual del Protocolo para NICE (Ciclo del nitrógeno en los estuarios)⁶, que, en el marco del programa MAST III de la UE en 2000, proporcionó métodos estandarizados de muestreo, análisis y cálculo de los flujos de nitrógeno en los estuarios. Para ello se requieren varios pasos:

- **Adoptar protocolos estandarizados** alineados con las directrices del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) para medir los principales depósitos de carbono y flujos de GEI (carbono del suelo, biomasa, flujos de CO₂, CH₄, N₂O).
- **Incluir mediciones de referencia** antes de la restauración y garantizar un seguimiento regular y a largo plazo para registrar los cambios a lo largo del tiempo.
- **Informar de los resultados con comparaciones de referencia**, presentando los resultados junto con sitios degradados y naturales comparables.
- **Garantizar datos abiertos e interoperables**, publicando métodos, resultados e información

geoespacial en repositorios accesibles compatibles con los sistemas de inventario nacionales.

- **Garantizar la calidad y la credibilidad de los datos** mediante procedimientos de garantía de calidad, evaluación de la incertidumbre y verificación independiente para respaldar la presentación de informes a nivel nacional y de la UE.

Se pueden extraer lecciones del proceso que sustentó el manual del Protocolo para NICE (Ciclo del nitrógeno en los estuarios)⁶, con el fin de normalizar los estudios sobre la eutrofización en los estuarios y apoyar la aplicación de la DMA en las aguas de transición.

Acción 2

Alinear los objetivos y la contabilidad del carbono con los marcos de política climática.

Los esfuerzos de restauración deben guiarse por objetivos claros, medibles y alineados con las políticas climáticas. Esto implica varios elementos clave:

- **Definir objetivos de carbono medibles**, incluidos los aumentos del carbono almacenado en la biomasa y los suelos, y los umbrales de emisiones aceptables de CH₄ y N₂O, contabilizados como equivalentes de CO₂.
- **Alinear los objetivos de restauración con los instrumentos políticos nacionales y de la UE existentes**, incluyendo las contribuciones determinadas a nivel nacional de los países de la UE, la Ley Europea del Clima, el Reglamento LULUCF de la UE y el Reglamento de la UE sobre la restauración de la naturaleza.
- **Establecer bases de referencia coherentes para las condiciones degradadas** a fin de garantizar la comparabilidad entre los distintos lugares y Estados miembros.
- **Aplicar plazos realistas para la recuperación ecológica**, que reflejen el tiempo necesario para que los ecosistemas se establezcan y proporcionen beneficios climáticos cuantificables, teniendo en cuenta que la mayoría de los humedales costeros son sistemas socioecológicos.

- **Apoyar la integración en los inventarios nacionales de GEI** garantizando que los objetivos, las bases de referencia y los plazos sean compatibles con los requisitos de notificación.
- **Desarrollar la capacidad local** para gestionar los créditos de carbono:
 - Apoyar el diseño de sistemas MRV.
 - Ayudar en los procesos de certificación y acceso al mercado.

Acción 3

Facilitar el acceso a la financiación del carbono mediante créditos de carbono azul fiables.

La restauración de los humedales costeros puede generar financiación del carbono a través de los mercados de carbono voluntarios y de cumplimiento. Para garantizar la credibilidad y maximizar el impacto es necesario adoptar varias medidas clave:

- **Establecer criterios claros de elegibilidad** para los proyectos de carbono:
 - Demostrar la adicionalidad, el almacenamiento de carbono a largo plazo (permanencia) y las fugas mínimas.
 - Evitar daños al medio ambiente y la biodiversidad.
 - Utilizar bases de referencia conservadoras y metodologías alineadas con el IPCC.
 - Aplicar normas reconocidas cuando estén disponibles y elaborar directrices específicas para la UE a fin de agilizar su adopción.
 - Basarse en los efectos climáticos según el potencial radiativo de los diferentes GEI, contabilizados como equivalentes de CO₂.
- **Reducir los costes de transacción y ampliar la participación:**
 - Implementar canales de financiación y acreditación preaprobados.
 - Cuando sea posible, vincular la generación de créditos de carbono a los inventarios nacionales de GEI, evitando la doble contabilidad.
- **Adoptar marcos de gestión adaptativa:**
 - Alinear las prácticas de restauración con los procesos dinámicos de hidrología, vegetación y carbono.
 - Las pruebas obtenidas en proyectos europeos (por ejemplo, LIFE Wetlands4Climate) demuestran que la gestión de los regímenes hídricos, los suelos y la vegetación es fundamental para mantener el potencial de mitigación.
- **Maximizar los beneficios colaterales:**
 - Más allá del carbono, los humedales restaurados proporcionan una mejora de la biodiversidad, la regulación de las inundaciones y la retención de nutrientes, lo que refuerza la resiliencia general del ecosistema.



Referencias

1. Misteli, B., Morant, D., Camacho, A., Adamo, M., Bachi, G., Bègue, N., Bučas, M., Cabrera-Brufau, M., Carballeira, R., Cavalcante, L., Cazacu, C., Coelho, J. P., Doebke, C., Dinu, V., Guel-mami, A., Giuca, R., Kataržytė, M., Lillebø, A. I., ... Attermeyer, K. (2025). Coastal wetland restoration and greenhouse gas pathways: A global meta-analysis. EarthArXiv preprint. <https://doi.org/10.31223/X51B39>
2. Morant, D., Picazo, A., Rochera, C., Santamans, A. C., Miralles-Lorenzo, J., & Camacho, A. (2020). Carbon metabolic rates and GHG emissions in different wetland types of the Ebro Delta. *PLOS ONE*, 15(4), e0231713. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231713>
3. Morant, D., Rochera, C., Picazo, A., Miralles-Lorenzo, J., Camacho-Santamans, A., & Camacho, A. (2024). Ecological status and type of alteration determine the C-balance and climate change mitigation capacity of Mediterranean inland saline shallow lakes. *Scientific Reports*, 14, 29065. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79578-7>
4. Rochera, C., Picazo, A., Morant, D., Miralles-Lorenzo, J., Sánchez-Ortega, V., & Camacho, A. (2025). Linking carbon fluxes to flooding gradients in sediments of Mediterranean wetlands. *ACS ES&T Water*. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.4c00940>
5. Camacho, A., Picazo, A., Rochera, C., Santamans, A. C., Morant, D., Miralles-Lorenzo, J., & Castillo-Escrivà, A. (2017). Methane emissions in Spanish saline lakes: Current rates, temperature and salinity responses, and evolution under different climate change scenarios. *Water*, 9(9), 659. <https://doi.org/10.3390/w9090659>
6. Dalsgaard, T. (Ed.), Nielsen, L. P., Brotas, V., Viaroli, P., Underwood, G., Nedwell, D. B., Sundbäck, K., Rysgaard, S., Miles, A., Bartoli, M., Dong, L., Thornton, D. C. O., Ottosen, L. D. M., Castaldelli, G., & Risgaard-Petersen, N. (2000). *Protocol handbook for NICE – nitrogen cycling in estuaries: A project under the EU research programme Marine Science and Technology (MAST III)*. Silkeborg, Denmark: National Environmental Research Institute.

RESTORE4Cs es un proyecto del programa Horizonte Europa que pretende evaluar los efectos de las acciones de restauración en la capacidad de los humedales para mitigar el cambio climático y proporcionar diversos servicios ecosistémicos, utilizando un enfoque socio ecológico integrador. Más información disponible en: <https://www.restore4cs.eu/>

Autores: Misteli, B.¹, Attermeyer, K.^{1,2}, Rochera, C.³, Lillebø, A.I.⁴, Camacho, A.³

Revisores: Elkina, E.⁵, Štrbenac, A.⁶, Suárez, S.⁶

¹ WWasserCluster Lunz, Austria; ² Universidad de Viena, Austria; ³ Universidad de Valencia, España; ⁴ Universidad de Aveiro, Portugal;

⁵ Instituto Ecológico, Alemania; ⁶ MedWet, Francia

Cita: Misteli, B., Attermeyer, K., Rochera, C., Lillebø, A.I., Camacho, A. 2025. ¿Cómo puede la restauración de los humedales costeros mitigar el cambio climático? Lo que sabemos y lo que aún no está claro. Informe de políticas. *Proyecto RESTORE4Cs*.



SOCIOS

