



**UNIVERSIDAD DE MURCIA**  
ESCUELA INTERNACIONAL DE  
DOCTORADO

TESIS DOCTORAL

Ensayo de agricultura sostenible en hortalizas al aire libre:  
influencia en las propiedades del suelo, la producción y el  
medio ambiente

**D.<sup>a</sup> Aldara Girona Ruiz**

**2024**





**UNIVERSIDAD DE MURCIA**  
**ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO**  
**TESIS DOCTORAL**

Ensayo de agricultura sostenible en hortalizas al aire libre: influencia en las propiedades del suelo, la producción y el medio ambiente

Autor: D.<sup>a</sup> Aldara Girona Ruiz

Director/es: D. Antonio Sánchez Navarro y D.<sup>a</sup> Maria José Delgado Iniesta



## Agradecimientos

Me gustaría agradecer, en primer lugar, todo el esfuerzo, la dedicación, la delicadeza, la comprensión, todas las horas de trabajo y un largo etcétera, a mis directores de tesis, Antonio Sanchez Navarro y Maria José Delgado Iniesta, porque sin ellos nunca nada de esto habría sido posible. Siempre han encontrado la forma de hacerme sentir en casa, de no juzgarme, de apoyarme y de sacarme una sonrisa, más como unos padres o unos amigos que como unos directores. Su calidad humana es poco común. Soy muy afortunada.

A lo largo de estos años he podido comprobar que Edafología y Geología en la Universidad de Murcia es una gran familia de la que nunca me voy a poder olvidar.

Quiero dar las gracias a Joaquín Gómez y Luis Arrufat, dos grandes colaboradores del departamento, que me han hecho siempre sentir como una amiga, o una hermana. Los más de treinta años que nos separan me han enriquecido y me han revelado definitivamente, que la edad es solo un número. Las horas que he pasado hablando con ellos de mieraes y fósiles no las cambio por nada, son un bien preciado que siempre llevaré conmigo.

También quiero agradecer a Asun, Pura y Natalia, por aceptarme en todas sus conversaciones, por hacerme sentir en casa y sobre todo por las innumerables sonrisas que con ellas he compartido.

No me olvido de Paco Guillén, esa persona amante de la geología general, que siempre que habla te hace llegar al último átomo de cada mineral, de cada piedra. Con él las excursiones siempre son enriquecedoras, te hace sentir lo que es un profesor que ama su materia pero que, sobre todo, ama transmitirla.

Gracias a la técnica de laboratorio del departamento, Feli, he podido desarrollar todos mis experimentos. Ella siempre dispuesta, me ha ayudado en todo con una gran sonrisa y resolución, envidio ese ímpetu que la hace ser la mejor en su trabajo, que la hace levantarse de un brinco de su silla para llevar a cabo cualquier procedimiento que necesite de su ayuda. Y agradezco, sobre todo, las grandes oportunidades que me ha proporcionado la vida gracias a ella.

Pepe Carrión ha sido un gran apoyo también, porque a parte de un jefe que te proporciona tus tiempos, y te agradece todos tus avances, ha sabido darme unos tiempos que pocos saben proporcionar para poder llevar a cabo mi tesis a la par que mi trabajo. Ojalá todos mis jefes a partir de ahora sean como tú. Te voy a echar mucho de menos. Ya lo hago.

Gracias a mi madre y mi hermana, que siempre han creído en mí mas que yo misma y todas las mañanas bien temprano me recordaban que merecía la pepa vivir ese día como si fuera el último pese a las vicisitudes que te proporciona la vida. Las envidio muchísimo, ojalá con el paso de los años y el esfuerzo, pueda parecerme un poco más a ellas.

Gracias a Luis, mi marido, que pese a ser tan diferente a mí, me complementa como nadie. Me apoya, me engrandece, me quiere, me ayuda y me todo. Al final creo que la tesis es más mérito suyo que mío, porque vivir con alguien al lado que trabaja y se dedica a la investigación no es nada fácil. GRACIAS POR TODO. TE QUIERO.

Gracias a mi padre y a mi iaia, porque, aunque sea desde otro “plano”, siempre estáis ahí.

Como me dijo hace poco mi amigo Luis Arrufat: Cuando entiendes que todo está relacionado, la mente se expande y comprendes que ya nunca nada será igual.

Porque al final el suelo, es la base de todo...

A mi padre Antonio

A mi iaia Maruja





# Contenido

Resumen .....	11
Introducción .....	25
1.1. <i>Introducción general</i> .....	27
1.2. <i>El recurso suelo</i> .....	29
1.3. <i>La agricultura: antecedentes</i> .....	33
1.4. <i>Situación del Campo de Cartagena</i> .....	38
Objetivos.....	45
Publicaciones científicas .....	49
Rapid Response Indicators for Predicting Changes in Soil Properties Due to Solarization or Biosolarization on an Intensive Horticultural Crop in Semiarid Regions .....	51
Agro-Ecological Impact of Irrigation and Nutrient Management on Spinach ( <i>Spinacia oleracea</i> L.) Grown in Semi-Arid Conditions.....	53
Green Manuring and Irrigation Strategies Positively Influence the Soil Characteristics and Yield of Coriander ( <i>Coriandrum</i> sativum L.) Crop under Salinity Stress .....	55
Conclusiones.....	57
Bibliografía.....	63





# Resumen



El modelo de agricultura practicado desde mediados del Siglo XX ha provocado la degradación de diferentes recursos naturales y, entre ellos, el suelo puede ser uno de los más afectados, ya que sobre él se desarrolla dicha actividad. La agricultura es, por tanto, una de las actividades antrópicas que más afectan de forma negativa al medio ambiente, sobre todo, cuando el manejo del suelo es inadecuado, causando la degradación y la contaminación de este. Por eso, desde diversos organismos internacionales, como FAO, IUSS, Comisión Europea, etc., se están promoviendo modelos de agricultura menos agresivos con el medio ambiente, basados en el uso de técnicas agrícolas respetuosas con los ecosistemas agrarios. Todo ello se hace especialmente necesario en zonas como el sureste de España, concretamente en el Campo de Cartagena, donde llueve poco, el agua es escasa y, a veces, de mala calidad agronómica y donde los sistemas de explotación agrícola predominantes desde la llegada del trasvase Tajo-Segura han buscado, por lo general, la rentabilidad económica de las explotaciones y han olvidado las consecuencias medioambientales negativas.

A este respecto, el diseño experimental de esta tesis ha consistido en la programación de una rotación de cultivos hortícolas al aire libre a lo largo de tres años, donde se han alternado diferentes técnicas de agricultura sostenible, como ha sido el empleo de enmiendas orgánicas, barbecho, solarización, biosolarización, cubiertas vegetales, abonado en verde, optimización del riego, etc. Los resultados obtenidos en estos tratamientos se han comparado con los obtenidos en otros, que se han considerado como testigo, llevados a cabo en la misma finca, donde se han empleado las técnicas de cultivo propias de la comarca.

El objetivo general que se persigue con este planteamiento es establecer un modelo de gestión sostenible de los suelos agrícolas del Campo de Cartagena basado en el uso de técnicas de cultivo respetuosas con el medioambiente, así como estudiar la producción de los cultivos bajo estas condiciones y su repercusión ambiental en el medio edáfico y en los ecosistemas asociados. Para llevar a cabo el seguimiento y cuantificación de los resultados, se han seleccionado un conjunto de parámetros físicos, químicos y biológicos y se han monitorizado a lo largo de los tres años de estudio, seleccionando, cuando procede, los indicadores más sensibles a la gestión agronómica llevada a cabo.

Así, el proyecto se inició en abril de 2016, seleccionando una parcela de unas 0.5 ha de superficie, que formaba parte de una explotación agrícola de cerca de 50 ha, con el fin de poder extrapolar o transferir a la misma los resultados obtenidos en la parcela experimental. Una vez selecciona la finca, se procedió a la caracterización del suelo, para lo que se abrió una calicata y se muestreo el perfil edáfico (Figura 1), describiendo sus propiedades in situ y tomando las muestras de cada uno de los horizontes que posteriormente se analizaron en el laboratorio.



**Figura 1.** Panorámica de la calicata (izquierda) y detalle del perfil edáfico. Fuente: Antonio Sánchez Navarro.

Una vez conocidas las características del suelo se diseñó el primer experimento, que constaba de una fase inicial de acondicionamiento físico-químico del suelo y otra al finalizar esta, donde se llevaría a cabo el primer ciclo de cultivo de hortalizas seleccionando para ello lechuga romana (*Lactuca sativa* L.). El objetivo de la fase de preparación fue mejorar las propiedades físico-químicas e incrementar el contenido de materia orgánica del suelo, para lo que se estableció un diseño experimental con 4 tratamientos y 3 repeticiones: biosolarización con estiércol (BSM), biosolarización con brásicas (BB), solarización (S) y una prueba piloto (PT), que comenzó con la plantación de mostaza picante (*Brassica juncea* L.) en mayo de 2016 (Figura 2).



**Figura 2.** Detalle de la plantación de mostaza picante en una parte de la parcela experimental. Fuente: María José Delgado Iniesta.

Una vez este cultivo alcanzó su desarrollo vegetativo, se procedió a incorporarlo al suelo, previa trituración de este, y se establecieron el resto de los tratamientos de solarización, que se mantuvieron hasta finales de agosto de 2016 (Figura 3), instalando en la parcela los equipos de monitorización y seguimiento que fueron precisos.



**Figura 3.** Ensayo de solarización/biosolarización y equipamiento instrumental. Fuente: Antonio Sánchez Navarro.

Finalizada la primera fase, se procedió a la plantación de la primera especie hortícola seleccionada para esta tesis, lechuga romana (*Lactuca sativa* L.), que se mantuvo entre septiembre y diciembre de 2016, procediendo a lo largo de esta etapa al

seguimiento de su desarrollo vegetativo, así como al control del resto de variables edáficas, proliferación de malas hierbas, patologías, producción, etc. (Figura 4).



**Figura 4.** Detalle de patología (Izquierda) y del proceso de recolección y cuantificación. Fuente: Antonio Sánchez Navarro.

Los resultados más importantes de este primer experimento dieron lugar al artículo “Rapid Response Indicators for Predicting Changes in Soil Properties Due to Solarization or Biosolarization on an Intensive Horticultural Crop in Semiarid Regions”, donde los objetivos propuestos fueron: en primer lugar, determinar indicadores de respuesta rápida que predigan cambios en algunas propiedades físicas como la estructura, la densidad y la infiltración, y propiedades químicas como el pH, la CE, el TN, y la solución de iones, todo esto por la implementación de la solarización y la biosolarización, en segundo lugar, determinar cuál de estas técnicas atenúa la degradación y contaminación de los ecosistemas agrícolas y puede ayudar a repararlo. Los resultados muestran que no hubo una respuesta significativa en las propiedades físicas y biológicas del suelo, pero sí que hubo resultados significativos en algunas de las propiedades fisicoquímicas y químicas analizadas. Así, las propiedades fisicoquímicas como el pH<sub>w</sub> y la CE y las químicas, tales como el nitrógeno total y el contenido de algunos macro y micronutrientes, pudieron considerarse como indicadores de respuesta rápida. Se debe tener en cuenta también la ratio de C/N, especialmente en horizontes profundos, debido a la mineralización de la materia orgánica a causa del cultivo y de la adición de nitrógeno. El decrecimiento de la materia orgánica conlleva una limitación de la funcionalidad del suelo como reservorio de carbono que aumenta a su vez la conductividad eléctrica y limita en gran medida su potencial agrícola. Los mayores rendimientos y la mayor calidad comercial de lechuga se obtuvieron en los tratamientos



BB y BSM. Estos tratamientos produjeron un secuestro biológico de  $\text{NO}_3^-$  y, en el caso de BB, inmovilización de sales. De acuerdo con estos resultados, BSM y BB pueden ser recomendados para la agricultura sostenible e incluso como métodos válidos para la recuperación de suelos afectados por sales y  $\text{NO}_3^-$ .

La aportación más importante de este artículo es la puesta en evidencia de que la biosolarización, con estiércol o con brásicas, puede ser una técnica de desinfección muy recomendable para los suelos del sureste de España, donde la agricultura sostenible debía de ser la forma más extendida de cultivo, por sus demostrados beneficios, sobre todo medioambientales.

También se pone de manifiesto en este experimento el uso inapropiado que se ha ido realizando en el suelo de cultivo, sobre todo durante los últimos 40 años, ya que se ha observado un incremento de la salinidad con respecto a los suelos no cultivados de las inmediaciones y a los valores reportados en estudios previos realizados por otros autores en las décadas de los 80 y 90 del siglo pasado, donde los valores de la CE rara vez superan los  $2 \text{ dS m}^{-1}$ .

Finalizado este primer experimento, se acondicionó la parcela, muy afectada por la DANA que tuvo lugar a finales diciembre de 2016, se dejó en barbecho durante el invierno y la primavera de 2017 y a principios de verano se llevó a cabo un desfonde con vertedera hasta 80 cm de profundidad, con vistas a mejorar la infiltración del suelo (Figura 5). Se mantuvo en barbecho hasta finales de 2017, ya que había limitaciones en la disponibilidad de agua para riego, momento en el cual se procedió a implantar el segundo experimento.



**Figura 5.** Detalle del subsolado (izquierda) escalilla con la profundidad alcanzada.  
Fuente: Antonio Sánchez Navarro.

Este experimento se hizo en base a un diseño en bloques al azar donde se utilizaron 2 tratamientos de fertilización (con estiércol de oveja (SM) y con estiércol de oveja más pellets (P)) y 2 dosis de riego distintas (óptimo (O) y excedentario (E)), y donde el cultivo seleccionado fue la espinaca (*Spinacia oleracea* L.) (Figura 6), ya que tenía unas necesidades nutricionales complementarias con la lechuga, ensayada en el primer experimento, y la gestión o manejo de cultivo implicaba una recolección mecánica con retorno in situ de una parte importante de la biomasa considerada como restos de cosecha, proceso que suponía un incremento de la materia orgánica del suelo, que, como ya se ha comentado era uno de los objetivos principales de esta tesis.



**Figura 6.** Panorámica plantación de espinacas (izquierda) y equipamiento de control.  
Fuente: Aldara Girona Ruiz.

Este cultivo se mantuvo hasta finales de marzo de 2018, momento en el que se procedió a recolectar y cuantificar su producción en calidad y cantidad. Seguidamente,

sobre la propia parcela de ensayo, a mediados de abril, se procedió a implantar un segundo ciclo de espinacas, manteniendo los mismos tratamientos de riego y sin aportar fertilización adicional, ya que en el balance efectuado en el primer ciclo se detectaba un retorno de nutrientes al suelo que, a priori, se consideraba suficiente para garantizar la viabilidad de esta plantación. En este caso, la germinación fue muy irregular (Figura 7), por lo que se decidió abandonar el cultivo a finales de mayo de 2018 y no continuar con el seguimiento de este.



**Figura 7.** Panorámica del segundo ciclo de espinacas. Fuente: Aldara Girona Ruiz.

Los principales resultados obtenidos se recogieron en el segundo artículo titulado “Agro-Ecological Impact of Irrigation and Nutrient Management on Spinach (*Spinacia oleracea* L.) Grown in Semi-Arid Conditions”, evidenciaron que el uso de una cantidad de agua de riego y fertilizantes mayor de la estimada incrementa de manera muy notable la CE y la concentración de iones del suelo, que, a su vez, migran a horizontes profundos, y no conlleva un incremento en la producción de espinaca. Asimismo, la extracción de macro y micronutrientes por el cultivo de espinacas fue muy diferente en función de la dosis de fertilización, de manera que, en el caso de los macronutrientes, las extracciones aumentaron significativamente cuando se fertilizó en exceso (PO y PE), indistintamente de la dosis de riego, mientras que en el caso de los micronutrientes fueron en los tratamientos con niveles óptimos de riego (SMO y PO). Sin embargo, la máxima rentabilidad del cultivo se encontró cuando las dosis de fertilización y riego fueron

óptimas (SMO), de modo que los tratamientos SME, PO y PE representan un despilfarro económico y un riesgo medioambiental, ya sea por la potencial contaminación de los ecosistemas cercanos, incluidas las aguas subterráneas, o por la inducción de procesos de salinización o alcalinización en el suelo como consecuencia de la incorporación de sales en exceso. Debido a ello se concluyó que, para preservar los ecosistemas afectados, se requiere la limitación del uso de agua de mala calidad agronómica y ajustar las dosis de fertilización. Finalmente, Los balances entre aportes y extracciones de elementos nutritivos en el suelo evidenciaron un excedente de fertilización, motivado principalmente por el retorno parcial de restos vegetales al suelo, aspecto que debe tenerse en cuenta en la gestión de la parcela experimental y que potencia la función ecológica del suelo como sumidero de CO<sub>2</sub>.

Finalizado este experimento con el abandono del segundo ciclo de espinacas, nos encontramos con un suelo con niveles de nutriente muy altos y una salinidad moderada, de manera que en el diseño del tercer ensayo se tienen en cuenta estas condiciones de partida. Así, se planifica un experimento donde, al igual que el primero, se establece una etapa inicial para acondicionar el suelo, donde se contempla un periodo de barbecho durante el verano y una cubierta vegetal a base de avena-veza (Figura 8) entre el otoño de 2018 e invierno de 2019, que se utilizará como abonado en verde. Finalmente, durante la primavera de 2019 se implantó el cultivo de cilantro (*Coriander sativum* L.), Figura 9. El diseño experimental, por tanto, contempla una primera etapa para la cubierta vegetal, donde se establecen dos tratamientos en función de las condiciones de salinidad del suelo, uno para el suelo ligeramente salino (LS) y otro para el salino (S), mientras que para el cultivo de cilantro, a estas dos se le añade un tratamiento de riego, donde se emplean 3 dosis, una excedentaria (E), la óptima (O) y finalmente otra deficitaria (D), de forma que la combinación del riego con la salinidad del suelo permite diferenciar 6 tratamientos distintos, (LSD, LSO, LSE, SD, SO y SE), cada uno de ellos con 3 repeticiones al azar.



**Figura 8.** Cubierta avena-veza (izquierda) y estructura del suelo en el entorno rizosférico. Fuente: Antonio Sánchez Navarro.

Para el seguimiento del experimento, se han seleccionado un conjunto de indicadores similares a los ensayos anteriores, cuyos resultados forma parte del tercer artículo que se presenta en esta tesis por compendio de publicaciones, titulado “Green Manuring and Irrigation Strategies Positively Influence the Soil Characteristics and Yield of Coriander (*Coriandrum sativum* L.) Crop under Salinity Stress”.

Los resultados encontrados permiten afirmar que la gestión agronómica llevada a cabo proporcionó resultados estadísticamente diferentes en los tratamientos ensayados. Así, la cubierta vegetal de avena-avena, intercalada entre los cultivos hortícolas de espinacas y cilantro, produjo un aumento muy significativo de la materia orgánica del suelo y demostró ser una alternativa viable para reducir las concentraciones de  $\text{Na}^+$  y  $\text{NO}_3^-$  en suelos salinos. Ambos resultados son muy importantes a tener en cuenta, especialmente en zonas como en las que se realizó el estudio, donde el contenido en materia orgánica de los suelos es muy muy bajo y se han observado procesos ligados a la contaminación y alcalinización de suelos y acuíferos debido al uso de aguas de riego de baja calidad agronómica y al empleo de agroquímicos, a veces en

dosis excesivas, todo ello catalizado por un clima árido y en el actual escenario de cambio climático, en el que se espera que estas condiciones se acentúen.

Las prácticas agronómicas llevadas a cabo también fueron determinantes del comportamiento de algunos indicadores de respuesta rápida, como CE del extracto de saturación, así como la concentración de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ . Así, la concentración y disponibilidad de iones en el suelo y su estado de oxidación estuvieron fuertemente influenciados por el pH y el potencial redox, causando la precipitación de carbonatos y fosfatos en el suelo y la oxidación de sus formas nitrogenadas a  $\text{NO}_3^-$ . Esto explica la lixiviación de los iones más solubles ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ ) desde la superficie hacia los horizontes profundos, especialmente en los tratamientos de riego óptimo y excedentarios, mientras que no se produjo lixiviación en el riego deficitario.



**Figura 9.** Panorámica del cultivo de cilantro y detalle de lisímetros instalados.  
Fuente: Aldara Girona Ruiz.

Finalmente, se observó que el grado de salinidad del suelo es un factor muy importante para su gestión, ya que influye significativamente en la producción de biomasa, independientemente de que se trate de la cubierta vegetal o del cultivo de cilantro, que puede corregirse en este último caso utilizando mayores dosis de riego, pero que al mismo tiempo provoca efectos indeseables, como la contaminación por  $\text{NO}_3^-$  de las masas de agua subterránea que pueden ir a parar a la cercana laguna del Mar Menor y aumentar su salinización. Dicha salinidad, junto a la dosis de riego, también fue

un factor determinante en la extracción de macro y micronutrientes por la cubierta vegetal avena-avena y por el cultivo de cilantro. Así, en S, las extracciones de la mayoría de los nutrientes por la avena-avena fueron estadísticamente inferiores que en LS, mientras que la absorción de nutrientes por el cilantro no fue sensible a la salinidad del suelo y solo se vio afectada por la dosis de riego utilizada, obteniendo los valores más altos en las dosis óptima y excedentaria.





A horizontal orange brushstroke with a textured, painterly appearance, serving as a background for the title text.

# Introducción



### *1.1. Introducción general*

Las prácticas agrícolas y el modelo de gestión del suelo implantados en los países desarrollados desde la segunda mitad del siglo XX están provocando la degradación acelerada de este recurso natural y de los ecosistemas afectados. Por este motivo, organizaciones internacionales como la FAO, la Unión Europea y la Unión Internacional de Ciencias del Suelo (IUSS), entre otras, están promoviendo modelos agrícolas más respetuosos con el medio ambiente y desarrollando normativas para su aplicación efectiva. En este sentido, numerosos estudios han puesto de manifiesto que las actividades agrícolas intensivas, orientadas exclusivamente a la obtención de mayores rendimientos económicos, han conducido a la progresiva degradación del medio ambiente, con la consiguiente pérdida de capacidad productiva (Altieri, 2019; Archer et al., 2007; IBNO NAMR & Mrabet, 2004). Esta degradación se refleja en el suelo de múltiples formas, que incluyen episodios de degradación física como la erosión (García-Orenes et al., 2009; Martínez-Casasnovas & Sánchez-Bosch, 2000), disminuyendo la porosidad del suelo y dificultando el intercambio de gases de efecto invernadero (Bastida, 2008; Wienhold et al., 2004) , así como reduciendo la capacidad de retención de agua (Wang et al., 2014). Estos modelos de agricultura intensiva también originan procesos de degradación química, como es el caso de la salinización y contaminación del suelo, especialmente en regiones áridas semiáridas como la Región de Murcia (Etikala et al., 2021), así como a la aparición de deficiencias nutricionales (Rao et al., 2012) . Por ello, es muy recomendable el desarrollo e implementación de modelos agrícolas que incorporen los objetivos de rentabilidad económica de las explotaciones y otros relacionados con la preservación de los recursos naturales, especialmente del suelo, incorporando, por tanto, técnicas de agricultura sostenible orientadas hacia un modelo de economía circular (Galati et al., 2018), donde se aprovechen la mayor parte de los residuos generados en las explotaciones (Lal, 2008; Lichtfouse et al., 2009). En este sentido, el fomento de la economía circular es uno de los objetivos prioritarios para proteger nuestro planeta y paliar el efecto invernadero que ha ido aumentando paulatinamente en los últimos años (Sauvé et al., 2016).

La implementación de prácticas agrícolas sostenibles va acompañada de cambios en la mayoría de las propiedades del suelo, que pueden afectar a su fertilidad y alterar la disponibilidad de nutrientes para los cultivos, todo ello como consecuencia de cambios físicos y químicos en los ambientes rizosféricos (Fageria & Stone, 2006). En consecuencia, es necesario monitorizar las propiedades del suelo que son más sensibles a su gestión. Estas propiedades pueden ser: 1) indicadores químicos de calidad, como el carbono orgánico (CO), el nitrógeno total (NT), el fósforo Olsen (P), la conductividad eléctrica (CEext), el pH, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y las bases intercambiables, elementos asimilables, etc.; 2) indicadores físicos, tales como granulometría, porosidad, densidad aparente y real, infiltración o estabilidad de agregados; 3) indicadores biológicos, para los cuales es esencial conocer la biodiversidad de microorganismos presentes, la actividad metabólica de esos microorganismos y su respiración basal.

Por otro lado, la conservación de los suelos y del paisaje alcanza especial relevancia en la Región de Murcia, donde un alto porcentaje de la superficie agraria útil está integrada por suelos con escasa o nula aptitud agrícola (Ortiz et al., 1991-1994) y, por tanto, es recomendable acometer cambios de uso y/o de gestión para evitar la degradación acelerada que están experimentando. En este sentido, el Programa de Acción Nacional contra la Desertificación (PAND) identifica la erosión como uno de los factores más importantes de la degradación de los suelos en nuestro país. Según este estudio, la intensidad de erosión en nuestros suelos supera los límites tolerables, principalmente en algunas litologías especialmente sensibles. De hecho, atendiendo a datos del Inventario Nacional de Erosión de Suelos (2002-2018), el 33,58% de la superficie de la región se encuentra con tasas de erosión superior a  $10 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ , pero, en casos extremos, puede alcanzar  $100\text{-}200 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  o incluso más, provocando conjuntamente unas pérdidas de suelo a nivel regional de  $19.393.626 \text{ t}\cdot\text{año}^{-1}$ .

Conscientes de esta realidad y en cumplimiento de las directrices de la UE, desde la década de los 90 la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, a través de sus Programas de Desarrollo Rural (PDR), vienen acometiendo actuaciones dirigidas a atenuar estos procesos de degradación, bien mediante el cambio de uso del suelo

(programas de forestación y reforestación de suelos), o promoviendo las conocidas como “buenas práctica de cultivo” y, en general, las técnicas de agricultura sostenible

### *1.2. El recurso suelo*

El suelo es un recurso natural finito e indispensable, con un papel esencial en los ecosistemas, por ejemplo, fijando grandes cantidades de CO<sub>2</sub> atmosférico en forma de materia orgánica y contribuyendo así a limitar el cambio climático. Aunque pueda parecer lo contrario, el suelo es un recurso no renovable, pues su formación es extremadamente lenta, se estima que puede variar entre 0.001 mm/año a 1mm/año dependiendo del tipo de factores formadores de cada suelo. Además, la superficie de suelo fértil es limitada y está sometida a una presión cada vez mayor debido al cambio climático y al cambio global, a los usos inadecuados y a su contaminación o sellado irreversible por urbanización (SECS, 2021).

Entre las funciones del suelo (Figura 10), además del soporte físico, es un elemento primordial en el desarrollo de la actividad agraria. Sus características físicas, químicas y biológicas definen su capacidad productiva. La agricultura depende de forma esencial de las condiciones del suelo, tanto por su contenido en nutrientes y materia orgánica, como por otras propiedades físicas, químicas y biológicas, caso de la aireación, capacidad de retención de agua, estructura, pH, textura o microbiota (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2022). Todas ellas en su conjunto condicionan la mayor o menor aptitud de los suelos para la actividad agrícola y su capacidad de resiliencia.



**Figura 10.** Funciones del suelo. FAO

La FAO estima que el 46% de las tierras del mundo están degradadas. La degradación del suelo se define como un cambio en la salud del suelo resultando en una disminución de la capacidad del ecosistema para producir bienes o prestar servicios para sus beneficiarios. Los suelos degradados contienen un estado de salud que no pueden proporcionar los bienes y servicios normales del suelo en cuestión en su ecosistema (FAO, 2023). La erosión del suelo, que es un tipo de degradación física, se refiere a las pérdidas absolutas de suelo de la capa superficial y nutrientes del suelo. Este proceso puede ser natural o antrópico, siendo este último, consecuencia de las malas prácticas de manejo.

La erosión es una de las diez principales amenazas para el suelo, junto con la pérdida de carbono orgánico, el desequilibrio de nutrientes, la acidificación y la pérdida de biodiversidad, entre otras. La erosión del suelo afecta a su salud y productividad al eliminar la capa superficial, altamente fértil, y exponer el suelo restante (MAGRAMA, 2022). En Europa se está perdiendo suelo y se está degradando a consecuencia de las crecientes demandas, a menudo en conflicto, de prácticamente todos los sectores económicos, como la agricultura, la vivienda, la industria, el transporte y el turismo. Las presiones se deben a la concentración de poblaciones y actividades en espacios

limitados, así como a los cambios del clima y de los usos del suelo (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2002). La distribución geográfica de la degradación del suelo depende de varios factores. Los problemas se relacionan con la diversidad, distribución y vulnerabilidad específica de los suelos de Europa. Dependen también de la geología, la orografía y el clima. Un factor adicional es la distribución de las fuerzas motrices en el continente y dentro de cada región o zona climática. En Europa meridional, especialmente en la cuenca mediterránea, la erosión del suelo por la acción del agua y el viento, la salinización y la degradación de la fauna y la flora edáficas por culpa de los incendios son acusadas, mientras que, en Europa occidental, central y oriental, la contaminación del suelo afecta a grandes zonas y se debe a la urbanización y a la industrialización (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2002).

La Unión Europea, intentó aprobar un tratado regional (la Directiva Marco del Suelo) que pretendía reducir a erosión y la compactación del suelo, la conservación de la materia orgánica, la prevención de corrimiento de tierras y detener la contaminación con sustancias tóxicas (Comisión de las Comunidades Europeas, 2006). En 2014, una agresiva campaña de presión por parte de los principales sindicatos agrícolas, acabo con ella. Fue la primera propuesta legislativa de la historia de la EU en ser remitida.

En muchas áreas de la Tierra dedicadas a la agricultura intensiva, a la erosión del suelo se le unen otros procesos de degradación física, química y biológica resultantes de la aplicación excesiva de abonos inorgánicos (*Report of the United Nations Conference on Environment and Development*, 1992), el laboreo inadecuado (Iqbal et al., 2017; Sánchez-Navarro et al., 2021) y la utilización de agua para riego, ya sea por su mala calidad o por las dosis inapropiadas (De Fraiture & Wichelns, 2010; Giubergia et al., 2013). Todo ello ha originado episodios de contaminación por nitratos, erosión y la desertificación del suelo, eutrofización, etc. (Mahvi et al., 2005; Peña-Haro et al., 2010), procesos de degradación que pueden atenuarse o eliminarse llevando a cabo prácticas de gestión agrícola sostenible (Emadodin et al., 2012), que garanticen la viabilidad económica de las empresas agrícolas y la conservación de la calidad y salud de los recursos naturales, incluidos el suelo y el agua (Bhattacharyya et al., 2015).

La disminución de la calidad de los suelos en el mundo es creciente, siendo diversas las causas, como alteraciones de la estructura, compactación, reducción del

nivel de materia orgánica, pérdida de suelos por erosión, reemplazo paulatino de áreas pastoriles y forestales en áreas netamente agrícolas o el agotamiento de su fertilidad (Arshad & Martin, 2002; Huisa Altamirano, 2020). Al respecto, hay que tener en cuenta que la calidad del suelo refleja una combinación de propiedades físicas, químicas y biológicas. Algunas de estas propiedades son relativamente no cambiables y son propiedades inherentes que ayudan a definir un tipo particular de suelo. La textura del suelo es un ejemplo de ello. Otras propiedades, como el contenido de materia orgánica, fertilidad química, contenido en sales, etc., pueden ser significativamente modificadas por el manejo del suelo. Estas propiedades cambiables del suelo pueden indicar el estado de la calidad relativa de este (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2000; Huisa Altamirano, 2020) y, en ocasiones, son utilizadas como indicadores de respuesta rápida para determinar la degradación o pérdida de calidad del suelo (Sánchez-Navarro et al., 2022).

En este sentido, merece una mención especial la actual problemática agroambiental de la zona del Campo de Cartagena (Murcia, España), donde los trabajos realizados por diversos autores (Bastida et al., 2005; Sánchez-Navarro et al., 2020) demuestran las alteraciones en las propiedades de los suelos de esta comarca causadas por la gestión inadecuada de los recursos naturales y, en particular, del suelo y del agua para riego. El resultado queda patente en la degradación de la estructura, disminución de la porosidad y de la resistencia a la erosión (Martínez-Casasnovas & Sánchez-Bosch, 2000), aumento de la salinidad, así como la pérdida de su funcionalidad ecológica, como puede ser la capacidad para secuestrar gases de efecto invernadero (Bastida et al., 2008). También se ha observado etapas de degradación física y química del suelo y de las aguas continentales y marinas del entorno del Campo de Cartagena, con la consiguiente alarma social. Esta situación se ha agravado en los últimos años (Castejón-Porcel et al., 2018).

Los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) establecidos por la Asamblea General de la ONU (*Resolución A/RES/70/1 Transformar Nuestro Mundo: La Agenda 2030 Para El Desarrollo Sostenible*, 2015) reconocen que el mayor desafío del mundo actual es la erradicación de la pobreza, debido a lo cual la Agenda 2030 ha establecido 17 ODS y 169 metas que abarcan, entre otros campos, la preservación de la naturaleza y



el uso racional de sus recursos. En este escenario, la agricultura no puede permanecer al margen, sobre todo porque ha sido probablemente la actividad que más ha degradado y contaminado el suelo y los ecosistemas asociados en los últimos 100 años (Tilman et al., 2001).

### *1.3. La agricultura: antecedentes*

La agricultura es una actividad básica en la sociedad, pues es clave en términos de producción de alimentos, además de ser una fuente de puestos de trabajo. Por tanto, la agricultura es una actividad fundamental que debe desarrollarse de la manera más eficiente posible. Aparece aproximadamente hace 12000 años, durante el Neolítico, y supuso una revolución en la historia de la civilización, transformando el modo de vida de nómada a sedentario. Cultivar la tierra, como base de la producción propia de los alimentos, permitió a la humanidad introducir cambios tan trascendentales como el sedentarismo y la formación de poblaciones que han marcado por completo el desarrollo de nuestra historia. La historiadora Lauren Ristvet define la agricultura como la “domesticación’ de las plantas, provocando que cambie genéticamente de su ancestro salvaje de manera que la hacen más útil para los consumidores humanos”. Ella y cientos de otros estudiosos desde Hobbes hasta Marx han señalado la Revolución Neolítica, es decir, el paso de un mundo cazadores-recolectores a uno agrícola, como la raíz de lo que hoy llamamos civilización. Sin agricultura no tenemos imperios, lenguaje escrito, fábricas, universidades, ni ferrocarriles. A pesar de su importancia, queda mucho por saber sobre por qué y dónde comenzó la agricultura (Berger et al., 2016).

El origen de la agricultura en el Próximo Oriente es uno de los temas que más interés ha suscitado tradicionalmente entre investigadores y estudiosos de la Prehistoria. Se trata de uno de los acontecimientos más fascinantes de la larga historia de la especie humana que transformó radicalmente la forma de vida que los seres humanos habían mantenido durante milenios. Este fenómeno, marca la transición de una subsistencia basada en la explotación de recursos silvestres a otra en la que la agricultura irá paulatinamente ocupando un lugar predominante en la obtención de recursos. Entre otros muchos aspectos, también se han incrementado los trabajos centrados en la explotación de las plantas por parte de los grupos cazadores-recolectores demostrando

que, con anterioridad a la domesticación de las plantas y la aparición de la agricultura, existió un largo periodo durante el cual se produjo una importante intensificación en la explotación y control de las plantas (Peña-Chocarro & Arranz-Otaegui, 2019).

El cultivo del grano del Oriente Cercano se diseminó con rapidez, y hace alrededor de 8000 años los cultivos de esa zona ya habían llegado a Grecia, Egipto, los alrededores del Mar Caspio y Pakistán. Menos de 1000 años después la agricultura se explotaba con intensidad en Europa central y hace unos 5000 años las comunidades agropecuarias abarcaban las zonas comprendidas desde las costas de España hasta Inglaterra y Escandinavia (Hancock, 2021).

La difusión de la agricultura en la antigüedad tuvo lugar tanto a través de las masas terrestres como por la vía de las islas del Mediterráneo. Hace entre 10500 y 9000 años un grupo de colonos neolíticos que se habían afincado con firmeza en el continente se establecieron en Chipre. Es probable que los colonizadores emplearan barcas para traer con ellos la gama completa de plantas y animales continentales de mayor importancia económica, que incluía ovejas, cabras, reses y cerdos. Además, se han encontrado restos de plantas domesticadas de trigo de escaña, cebada, trigo rojo y lentejas, así como de pistacho, lino e higo (Hancock, 2021). Hasta hace unos 500 años casi todas las dispersiones se producían en el interior de los continentes, no entre ellos. La total homogenización de los cultivos mundiales no comenzó hasta que Colón y otros exploradores españoles y portugueses retornaron a Europa.

A partir de la revolución industrial y sobre todo de la Segunda Guerra Mundial, la mecanización del campo y el uso indiscriminado de agroquímicos (abonos y pesticidas), conocido como la Revolución Verde, originaron cambios sociales y agroambientales. Comenzó en Estados Unidos a mediados del siglo XX con el objetivo de una producción elevada, por lo que se incrementaron las zonas dedicadas a monocultivos, se redujo la biodiversidad y se generalizó el uso de gran cantidad de agroquímicos (Molina, 2021).

A nivel europeo, para fomentar unas buenas prácticas agrícolas, en 1962 se creó la PAC (Política Agraria Común), como herramienta de gestión sostenible de las explotaciones agrarias, dirigidas al sector agrario y al medio rural. Desde su creación, se incentiva con ayudas financieras para los agricultores en base a unas condiciones previas

que deben cumplir estos. La última reforma se está aplicando en la actualidad, se extenderá hasta 2027 y estará orientada a la consecución de unos objetivos prefijados, vinculados a los ODS del bloque económico, medioambiental, rural y social (Reglamento (UE) 2021/2115 del parlamento europeo y del consejo de 2 de diciembre de 2021, 2021). Además, la PAC define las condiciones que permiten que el sector agrario cumpla sus importantes funciones, proporcionando beneficios, ya no sólo para el sistema agroalimentario, sino también para los consumidores y de la sociedad en general:

- Suministro de alimentos acorde a las exigencias de los consumidores
- Conservación del medioambiente y lucha contra el cambio climático
- Fijación de población y generación de empleo en el medio rural
- Generación directa e indirecta de trabajo en el sistema agroalimentario

En cuanto a la vigencia y actualidad de la PAC en España, en lo que se refiere al Plan Estratégico 2023-2027 (MAPA, 2022), entre los diferentes objetivos se encuentra el bloque medioambiental, cuyos objetivos generales son la intensificación y cuidado del medio ambiente y la acción por el clima. En lo que se refiere a los objetivos específicos, se encuentran la acción contra el cambio climático, la protección del medio ambiente y la conservación del paisaje y la biodiversidad. El Plan tiene como objetivo el desarrollo sostenible de la agricultura, la alimentación y las zonas rurales para garantizar la seguridad alimentaria de la sociedad a través de un sector competitivo y medio rural vivo y en su redacción y difusión han participado la mayor parte de los actores implicados, entre ellos, comunidades autónomas, el sector agroalimentario, ambientalistas, medio rural, mujeres, mecanismos de participación pública y el Ministerio de Transición Ecológica, junto a la Comisión Europea.

En cuanto a los mecanismos referidos a la mejora o mantenimiento de la calidad del suelo o la mitigación de las problemáticas ambientales que surgen como consecuencia de una gestión deficiente del mismo, se incluyen objetivos como mejorar la estructura de los suelos, reducir la erosión y la desertificación, aumentar el contenido en carbono, reducir las emisiones, evitar la contaminación, etc. Dichos objetivos se instrumentalizan mediante la implementación de los eco regímenes (EERR), que son una

de las principales novedades de la PAC 2023-2027 y se materializan mediante la aplicación de prácticas agrícolas sostenibles, entre las que destacan:

- Pastoreo extensivo
- Siembra directa
- Cubierta vegetal espontánea o sembrada
- Cubierta inerte

También se contemplan objetivos para favorecer la biodiversidad asociada a espacios agrarios, los paisajes y la conservación y la calidad de los recursos naturales, agua y suelo, donde se recomienda realizar prácticas como:

- Islas de biodiversidad o siega sostenible
- Rotación de cultivos con especies mejorantes
- Establecimiento de espacios de biodiversidad o gestión de lámina del agua

En definitiva, el Plan Estratégico en el marco PAC 2023-2027 (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación et al., s. f.), en consonancia con la Agenda 2030, da un protagonismo relevante a las prácticas de agricultura sostenible y a la preservación de los recursos naturales, entre los que destacan el suelo y el agua (Reglamento (UE) 2021/2115 del Parlamento Europeo y del Consejo de 2 de diciembre de 2021), todo ello para favorecer la transición hacia los llamados “agroecosistemas resilientes” y promover la función del suelo como sumidero de carbono (González et al. 2018). En estos sistemas resilientes, el papel del suelo en el ciclo del carbono es muy importante, ya que almacena alrededor del 75% del CO<sub>2</sub> total capturado en medios terrestres (Lal, 2004). Este aspecto ha sido ampliamente estudiado en suelos de climas húmedos, pero no en los de clima mediterráneo, donde, según Huang et al. (2019), los suelos tienen un alto potencial para fijar carbono atmosférico mediante la aplicación de prácticas agrícolas adecuadas, que contribuyan positivamente a su función ecológica como sumideros de carbono y a minimizar la degradación. En este sentido, se ha demostrado que una gestión adecuada de los cultivos aumenta la acumulación de carbono orgánico en el suelo y la productividad agrícola (Jorge-Mardomingo et al., 2015; Requejo et al., 2014; Sánchez-Navarro et al., 2021), preservando un entorno ecológico sano (Yan et al., 2022). Por otro lado, están incentivadas económicamente en el Plan Estratégico de la PAC 2023-2027

(Reglamento (UE) 2021/2015 del Parlamento Europeo y del Consejo de 2 de diciembre de 2021), ya que afecta a la dinámica de los nutrientes en el suelo (Adams et al., 2020), a la química de los horizontes profundos (Gregory et al., 2016) y, en general, a la calidad del suelo. Asimismo, la calidad y cantidad de agua utilizada en el riego puede inducir cambios en algunas de sus propiedades; por ejemplo, cuando la salinidad en el suelo es alta, se desencadenan procesos de salinización que limitan e incluso impiden el uso agrícola de este recurso, como ha sido ampliamente descrito por varios autores (Di Gioia et al., 2018; El-Magd et al., 2008). Además, por tratarse de aguas carbonatadas, estos aportes hídricos para riego son los principales impulsores abióticos de las variaciones en la reserva de carbono (Ma et al., 2020; Xu et al., 2018).

En la misma línea, la IUSS en su Plan Estratégico 2021-2030 (IUSS, 2022) , pretende fomentar todas las ramas de las ciencias del suelo y sus aplicaciones y brindar apoyo a los científicos del suelo y a aquellos que usan o dependen de los suelos, en la realización de sus actividades para mejorar el conocimiento y la comprensión de los suelos y la promoción y adopción de mejores prácticas y políticas basadas en los conocimientos científicos actuales. La IUSS promueve el conocimiento del recurso suelo en su relación con los ecosistemas que lo sustentan. La misión de IUSS es:

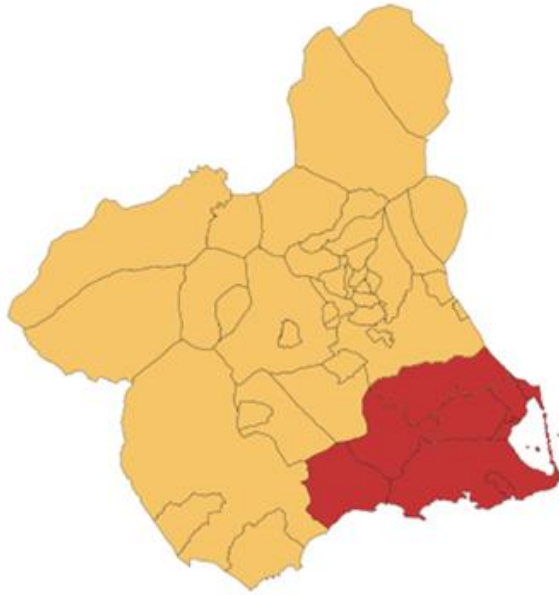
- Servir y reforzar la comunidad científica del suelo
- Promover la comprensión global y el compromiso con los suelos y su protección
- Involucrarse con partes interesadas y organizaciones globales
- Estimular iniciativas de ciencia del suelo
- Asesorar a los órganos rectores sobre políticas de suelos
- Comunicarse con otros científicos, disciplinas y aquellos que usan y dependen de los suelos
- Apoyar el suelo y la ciencia del suelo y la alfabetización en todos los niveles.

En este contexto, la situación agroecológica actual de las explotaciones agrícolas del Campo de Cartagena, y muy particularmente las de carácter intensivo, se caracteriza por la compleja interacción de cuestiones agrícolas, ambientales y de gestión de recursos hídricos, que requieren soluciones sostenibles para garantizar el bienestar integral de la comarca. Soluciones sencillas a estos problemas no existen, pero no por eso debemos

descartar otras formas gestión de los recursos naturales, y en particular del suelo, más respetuosas con el medio ambiente. Debido a ello, cada día es más habitual que la programación de cultivos, y en concreto, la fertilización, incluida la adición de enmiendas orgánicas, la gestión del agua para riego y los tratamientos fitosanitarios se realice teniendo en cuenta factores medioambientales, con el objetivo de aumentar la eficiencia integral de los mismos.

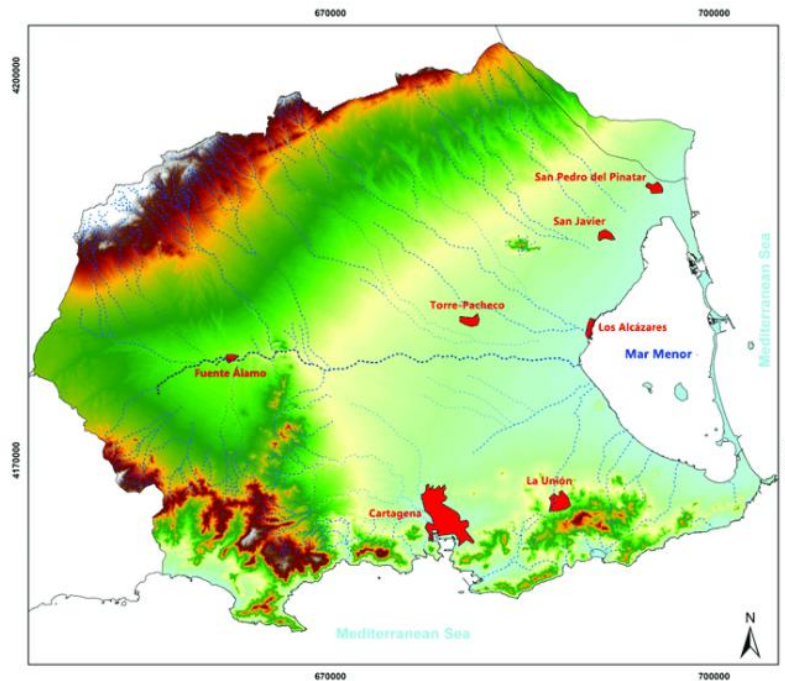
#### *1.4. Situación del Campo de Cartagena*

La llanura de Cartagena posee unos 1500 kilómetros cuadrados, desciende formando un amplio y largo glacis desde el sur de la sierra de Carrascoy hasta la de Cartagena. La monotonía del paisaje únicamente se ve alterada por los relieves tabulares y por el cauce de alguna rambla. Desde el punto de vista físico la comarca puede dividirse en dos áreas bien diferenciadas: una costera que es la terminación oriental de las Béticas, con modestas elevaciones y que en contacto con el mar da lugar a un litoral accidentado; la segunda unidad la constituye un plano suavemente inclinado que desciende desde la sierra de Carrascoy y Columbares hasta unirse, por la parte occidental, con la alineación anterior, mientras que por la parte oriental se adentra en el mar dando lugar a una costa baja en la que las corrientes marinas, apoyándose en algunos conos volcánicos, han construido una barrera arenosa que separa un antiguo golfo y lo transforma en una antigua albufera, el Mar Menor. Ésta última unidad es la que recibe el nombre de Campo de Cartagena (Figura 11). Se trata pues, de dos áreas bien diferenciadas: la primera con posibilidades mineras, pesqueras e industriales; la segunda con una economía agrícola de secano sobre una topografía suave y con unas condiciones climáticas excepcionales, que fueron motivo de que sus habitantes buscasen agua en su subsuelo para hacer cultivos de regadío. Los glacis son las geoformas de modelado dominante en el paisaje, junto a los badland y algunos relieves en cuesta (Prieto Prieto, 2009).



**Figura 11.** Situación geográfica del campo de Cartagena dentro de la Región de Murcia.

En el Campo de Cartagena no existen cursos permanentes de aguas superficiales, sin embargo, una de las características más peculiares del paisaje, son las ramblas o barrancos que recogen las aguas en los períodos de lluvias, que, aunque escasas suelen ser muy intensas y de carácter torrencial (Figura 12). Son consecuencia de la particular disposición del terreno y del régimen climático, típicamente mediterráneo. La escorrentía superficial se drena en las sierras a través de numerosas ramblas de recorridos generalmente cortos y sinuosos, incorporándose progresivamente en la llanura a un sistema más jerarquizado que termina vertiendo al Mar Menor. Algunas ramblas se extinguen en la planicie debido a la escasez de pendiente y a la permeabilidad de los terrenos circundantes, o bien se ramifican en un conjunto de escorrentía difusa (Menchón, 2007).



**Figura 12.** Situación de las principales ramblas del Campo de Cartagena. Ramón García-Marín (ResearchGate).

Es a principios del S. XX cuando en la Comunidad de Murcia se produce cierta modernización de la agricultura y un lento inicio del turismo en las riberas del Mar Menor. Estas dos actividades, agricultura y turismo, son la base del actual desarrollo comarcal y las que más profundamente han transformado el paisaje (Caballero et al., 2015). Más recientemente, y después de 40 años de explotación del trasvase del Tajo-Segura, existen evidencias de grandes cambios estructurales ocurridos en el sureste de España, concretamente en esta comarca. Estos cambios estructurales son debidos a la agricultura intensiva y muchos estudios lo verifican, como los presentados en artículos ya en los años 70 (Alias & Ortiz , 1975, 1977), antes del trasvase.

Después de la llegada del trasvase, la agricultura ha sido muy probablemente la actividad que más se ha desarrollado en la comarca en términos de Producto Interior Bruto (PIB), pero dicho desarrollo ha originado una degradación paulatina de los recursos naturales, en especial del suelo y del agua. En lo que afecta al suelo, se ha visto afectada su calidad, como consecuencia del deterioro de las propiedades físicas, químicas y biológicas, todo ello debido al uso inapropiado de algunas prácticas agrícolas (Buckley & Schmidt, 2001; Michelena, 2008; Morales et al., 2014), que han originado la



disminución del potencial productivo del suelo y, por ende, de su rendimiento agrícola (Lal, 2000), provocando con ello un alto costo ambiental (Pérez & Landeros, 2009).

Las aguas subterráneas han contribuido de un modo fundamental al sostenimiento de la actividad agraria de la zona (Morales et al., 2014), caracterizada por un mosaico de cultivos de regadío combinados con cultivos tradicionales de secano, básicamente cereales y algunas leguminosas. Pero la llegada del trasvase Tajo-Segura en la década de los 70 ha sido esencial en el cambio de una agricultura tradicional de secano a una agricultura intensiva de regadío (Caballero et al., 2015). En efecto, el trasvase de agua desde el Tajo, si bien se produjo con un ritmo muy irregular hasta el año 1995, a partir de esta fecha aumentó considerablemente, hasta alcanzar prácticamente la dotación legal asignada a su zona regable de 122 hm<sup>3</sup>/año (Menchón & Alonso, 2007). Este hecho ha permitido depender en menor medida de las captaciones subterráneas, muy sobreexplotadas hasta esa fecha, que, debido a la infiltración hacia los acuíferos subterráneos del exceso de agua utilizada para el riego, ha permitiendo el ascenso hacia la superficie del nivel piezométrico y ha originado paralelamente la pérdida de calidad de las aguas subterráneas, especialmente debido al incremento del contenido en NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, afectando a los acuíferos del Cuaternario y el Plioceno de la comarca (Más Monsonís, 2019), así como la contaminación de los ecosistemas adyacentes y en particular del Mar Menor. La presencia de nitrógeno en los acuíferos forma parte del ciclo natural del mismo. Sin embargo, en la actualidad se considera que la mayor proporción de nitrógeno presente en los acuíferos procede de origen agrario, debido principalmente a las técnicas del riego y abonado excesivo, afectando directamente la calidad de las aguas subterráneas.

Según Más (2019), respecto a los principales cultivos realizados en el Campo de Cartagena, destacan por extensión aquellos de verduras y hortalizas, con una extensión aproximada de 20115 hectáreas el año 2016. Les siguen los cultivos de cítricos y frutales con 8677 hectáreas de extensión, los realizados sobre acolchados y los cultivados en invernadero con 3637 y 1605 hectáreas respectivamente. Entre los cultivos de hortalizas, la lechuga ocupa la primera posición con 3979 hectáreas cultivadas, seguida de cerca por el cultivo de patata. Otras hortalizas y verduras cultivadas frecuentemente en el Campo de Cartagena son el melón y la sandía, la alcachofa, la coliflor, el brócoli y el pimiento.

Estos cultivos representan el 88% de extensión de las 20115 hectáreas cultivadas de hortalizas el año 2016.

La justificación de la tesis viene determinada entre otros, por la necesidad del estudio de estrategias sostenibles con el medioambiente que sustituyan a las técnicas de cultivo intensivas, ya que dicha agricultura intensiva es la causa de cambios en las propiedades generales del suelo que, normalmente, aceleran su degradación, por lo que se necesitan cambios en el manejo, acorde con el tipo de suelo y el uso que se hace de este. Una agricultura sostenible es especialmente necesaria en el sureste de la Península Ibérica, dado que es una región semiárida, y concretamente en el Campo de Cartagena (Figura 13), en el que durante más de cuatro décadas se ha causado una rápida degradación de los recursos, especialmente del agua y el suelo. Las prácticas de agricultura sostenible contribuyen favorablemente en la conservación del recurso suelo, los ecosistemas asociados y en la calidad de la producción agrícola obtenida en los mismos, por lo que en nuestro diseño experimental perseguimos unos resultados que demuestren la necesidad de llevar a cabo una transición gradual hacia una agricultura sostenible y respetuosa con el medio ambiente, en el que los ecosistemas asociados y el suelo no sólo salgan beneficiados por separado si no que exista una sinergia entre ellos

En el caso de la degradación del suelo, el descenso en la porosidad y el incremento de la salinidad hacen de este estudio un recurso necesario para la mejora de sus propiedades físicas y químicas, haciendo especial hincapié en la comparación de técnicas como la solarización y la biosolarización y en la búsqueda de marcadores de respuesta rápida, como la conductividad eléctrica, la composición iónica y el pH para contabilizar esa degradación de una forma efectiva, sin olvidarnos de la rotación de cultivos.



**Figura 13.** Situación del área de estudio y parcela donde se han llevado a cabo los distintos experimentos. Fuente: Aldara Girona Ruiz (2022).

Así mismo, la comparativa del suelo no se realiza con un solo tipo de cultivo, sino que se realizan siembras con diferentes especies (Figuras 14 y 15) para tener datos en distintas condiciones, pero con el mismo tipo de suelo y clima. Teniendo en cuenta también la diferencia entre cultivos en diferentes periodos cortos y un periodo largo de veinte años para tener referencias suficientes.



**Figura 14.** Plantación de lechugas (*Lactuca sativa*) en la parcela de estudio. Fuente: Antonio Sánchez Navarro.



**Figura 15.** Plantación de espinacas (*Spinacia oleracea*) en el área de estudio con sondas y pluviómetro. Fuente: María José Delgado Iniesta.

La hipótesis de partida de este trabajo considera que la agricultura en general, y en particular la agricultura intensiva, provoca cambios en las propiedades del suelo que pueden conducir a una aceleración de la degradación de este recurso, y que estos cambios serán más o menos relevantes según el tipo de suelo (diversidad de suelos) y al uso y manejo de este.

Las prácticas de agricultura sostenible contribuyen favorablemente en la conservación del recurso suelo, los ecosistemas asociados y en la calidad de la producción agrícola obtenida en los mismos, por lo que en nuestro diseño experimental perseguimos unos resultados que demuestren la necesidad de llevar a cabo una transición gradual hacia una agricultura sostenible y respetuosa con el medio ambiente, en el que los ecosistemas asociados y el suelo no sólo salgan beneficiados por separado sino que exista una sinergia entre ellos.

The word "Objetivos" is centered on the page, overlaid on a horizontal, textured orange brushstroke that spans across the middle of the page. The word is written in a bold, black, sans-serif font.

# Objetivos

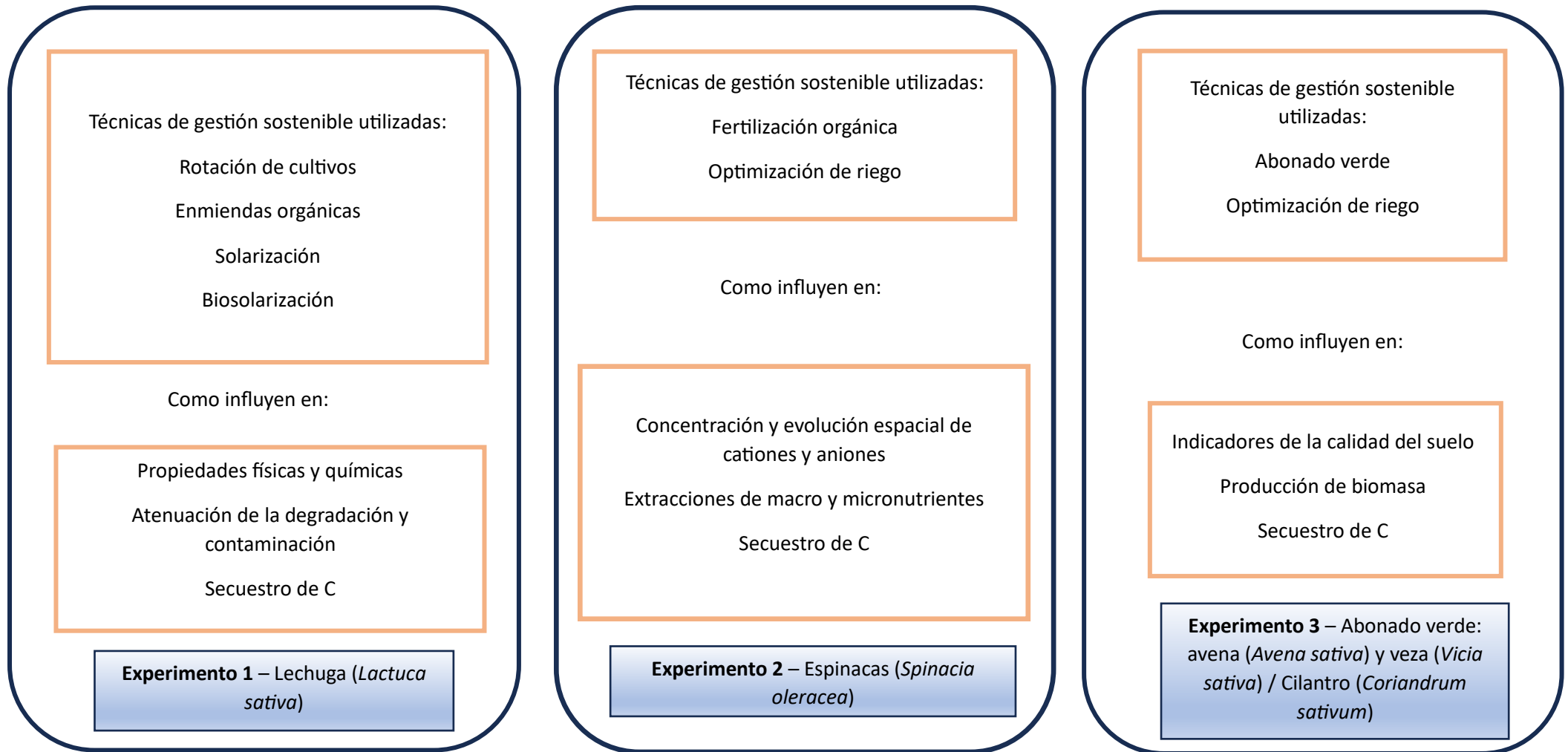


Así pues, el objetivo general de la presente tesis es establecer un modelo de gestión sostenible de los suelos agrícolas del Campo de Cartagena basado en el uso de técnicas de cultivo respetuosas con el medioambiente, así como estudiar su producción y repercusión ambiental mediante la selección de los indicadores adecuados. Este objetivo principal puede subdividirse en los siguientes (Figura 16):

- Establecer un modelo de gestión sostenible en una explotación agrícola dedicada a hortalizas al aire libre que incluya, la rotación de cultivos, el uso de enmiendas orgánicas como base para la fertilización, así como el empleo de técnicas de solarización y biosolarización, cubiertas vegetales y optimización de las dosis de riego.
- Determinar la influencia de dichas prácticas de agricultura sostenible sobre las propiedades del suelo, su función ecológica como sumidero de carbono y en la degradación del suelo y los ecosistemas asociados.
- Determinar la incidencia de las cubiertas vegetales y abonado verde en las propiedades del suelo, en la producción de biomasa y en la calidad de los cultivos.
- Evaluar la influencia de la dosis de riego y el tipo de abono en el desarrollo, producción y calidad de los cultivos, así como en la dinámica de algunos constituyentes y propiedades del suelo, en especial, aquellos que puedan utilizarse como indicadores de respuesta rápida para el control de la degradación, como pueden ser la CE,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ , etc.
- Evaluar las extracciones de nutrientes y necesidades hídricas de los cultivos con vistas a ajustar los programas de fertilización y evitar la lixiviación a horizontes de profundidad.

# Ensayo de agricultura sostenible en hortalizas al aire libre: influencia en las propiedades del suelo, la producción y el medio ambiente

Establecer un modelo de gestión sostenible de los suelos agrícolas del Campo de Cartagena basado en el uso de técnicas de cultivo respetuosas con el medioambiente, así como estudiar su rendimiento y la repercusión ambiental mediante la selección de los indicadores adecuados.



Publicaciones científicas

Figura 16. Esquema-Resumen de los objetivos. Aldara Girona Ruiz



**Publicaciones científicas**



## Rapid Response Indicators for Predicting Changes in Soil Properties Due to Solarization or Biosolarization on an Intensive Horticultural Crop in Semiarid Regions

**Antonio Sánchez-Navarro, Raimundo Jiménez-Ballesta, Aldara Girona-Ruiz, Iris Alarcón-Vera and María José Delgado-Iniesta.**

Department of Agricultural Chemistry, Geology and Pedology, Faculty of Chemistry, Campus de Espinardo, University of Murcia, 30100 Murcia, Spain; antsanav@um.es (A.S.-N.); aldara.girona@um.es (A.G.-R.); Iris.Alarcon@um.es (I.A.-V.)

Department of Geology and Geochemistry, Faculty of Sciences, Autonoma University of Madrid, 28049 Madrid, Spain; raimundo.jimenez@uam.es

<https://doi.org/10.3390/land11010064>

## Abstract

Agriculture practices developed since the middle of the last century have led to the degradation of different resources and made it necessary to promote agricultural models that are less aggressive towards nature. Sustainable agricultural growth requires a more efficient use of land. An experimental model was designed with four treatments in the Campo de Cartagena area (SE Spain): biosolarization with manure (BSM), biosolarization with brassicas (BB), solarization (S), and a pilot test (PT). The general objective was to determine by means of rapid response indicators the changes occurring in soil properties as a consequence of the implementation of these solarization or biosolarization practices and their influence on the quality and yield of a lettuce crop. The results show that there was no significant response in the physical and biological properties of the soil. Physicochemical properties such as pH<sub>w</sub>, and electrical conductivity (EC<sub>e</sub>), as well as chemicals such as total nitrogen (TN) and the content of some macro and micronutrients, can be considered as rapid response indicators. The highest yields (Y<sub>c</sub>) and highest commercial quality (M<sub>c</sub>) of lettuce were obtained in the BB and BSM treatments (Y<sub>c</sub> > 23,000 kg ha<sup>-1</sup>; M<sub>c</sub> > 413 g). These treatments resulted in biological NO<sub>3</sub><sup>-</sup> sequestration and, in the case of BB, salt immobilization (EC<sub>e</sub>: 6 dS m<sup>-1</sup>).

According to these results, BSM and BB can be recommended for sustainable agriculture and even as valid methods for the recovery of soils affected by salts and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Our results should increase the feasibility of these techniques in semiarid areas.

## Agro-Ecological Impact of Irrigation and Nutrient Management on Spinach (*Spinacia oleracea* L.) Grown in Semi-Arid Conditions

**María José Delgado-Iniesta, Aldara Girona-Ruíz and Antonio Sánchez-Navarr**

Soil Science and Technology Research Group, Department of Agricultural Chemistry, Geology and Pedology, Faculty of Chemistry, University of Murcia, CEIR Campus Mare Nostrum (CMN), Campus de Espinardo, 30100 Murcia, Spain

<https://doi.org/10.3390/land12020293>

## Abstract

The environment is affected by most anthropogenic activities; among them, agriculture is one activity with more negative effects, especially when management is inadequate, causing soil degradation or contamination. This paper presents the results of an agronomic field trial on a spinach (*Spinacia oleracea* L.) crop. The objective of which was to monitor soil and crop properties under two doses of irrigation and organic fertilization. The results showed that the use of excessive doses of irrigation and fertilization increased the electrical conductivity (EC<sub>ext</sub>) from 5.5 to 8.5 dS m<sup>-1</sup> and the concentration of ions in the soil solution which, for the most soluble ions (NO<sup>3-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>), leached towards the deep horizons, reaching 2194.8 mg L<sup>-1</sup> in the case of NO<sup>3-</sup>. However, their use did not increase spinach production and is thus a waste of resources that increases the risk of soil salinization. Nutrient inputs to the soil were much higher than extractions (between 12% for N and 99% for Fe), partly because of agronomic management and especially because of the return of crop residues, which increased the organic carbon stock by about 2500 kg ha<sup>-1</sup> (4–6%), enhancing its function as a CO<sub>2</sub> sink. These surpluses form part of complex organic structures or are immobilized as carbonates or alkaline phosphates. Preservation of the agrosystem studied requires limiting the use of lowquality irrigation water and adjusting fertilization.

## Green Manuring and Irrigation Strategies Positively Influence the Soil Characteristics and Yield of Coriander (*Coriandrum sativum* L.) Crop under Salinity Stress

**Antonio Sánchez-Navarro, Aldara Girona-Ruíz and María José Delgado-Iniesta**

Research Group Soil Science and Technology, Department of Agricultural Chemistry, Geology and Pedology, Faculty of Chemistry, University of Murcia, CEIR Campus Mare Nostrum (CMN), Campus de Espinardo, 30100 Murcia, Spain; antsanav@um.es (A.S.-N.); aldara.girona@um.es (A.G.-R.)

<https://doi.org/10.3390/land13030265>

## Abstract

This study shows the influence of soil salinity and irrigation dose on biomass production and its impact on some edaphic indicators and functions. For this purpose, an experiment was carried out in two representative soils from Murcia (SE Spain), one slightly saline (LS) and the other saline (S), where an oat–vetch green manure was intercalated between a spinach cycle and a coriander cycle; the latter being subjected to three different irrigation doses (deficient, optimum and surplus). Rapid response indicators (EC<sub>ext</sub>, cations and anions in the soil solution, etc.) were monitored, as well as the material balances, in particular C and salts. Green manure and crop residues increased soil OC by 12.5% and reduced Na<sup>+</sup> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> concentrations. Total biomass production was also affected by salinity, both in oat–vetch, 35.9 and 31.9 t m ha<sup>-1</sup> in LS and S, respectively, and in the coriander crop, where the irrigation dose was decisive, obtaining around 29 t m ha<sup>-1</sup> with the optimum and surplus doses and significantly lower amounts with the deficit dose: 20.4 t m ha<sup>-1</sup> in LSD and 14.0 in SD. Therefore, it is necessary to adjust the irrigation doses, since deficit irrigation significantly reduces production and the surplus does not lead to an increase with respect to the optimum, while also causing ions to leach to depth horizons, as is the case for NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> and Na<sup>+</sup>, with the consequent risk of contaminating the water table.



# Conclusiones



El modelo de gestión agrícola planificado para las tres anualidades durante las que se ha hecho la experiencia (2016-2019) ha demostrado ser una opción ambiental y económicamente viable. Se ha podido observar como las prácticas de agricultura sostenible han tenido una influencia positiva sobre algunas propiedades del suelo, sus funciones y han atenuado la degradación de este. Entre estas, la solarización y la biosolarización han tenido una influencia importante en el medio edáfico, elevando la temperatura y la humedad del suelo. Cuando se añade materia orgánica, ya sea estiércol de origen animal o restos vegetales de biomasa, se mejoran la infiltración, la porosidad, la formación del complejo arcillo-húmico y la fertilidad, atenuando así la degradación física y la contaminación del suelo y mejorando su calidad y fertilidad. Debido a ello, estas prácticas, además de haberse consolidado como técnicas efectivas de desinfección física del suelo, pueden considerarse adecuadas para incrementar la fertilidad agrícola, mejorar su estructura, así como su funcionalidad ecológica, especialmente su papel como sumidero de CO<sub>2</sub>.

La calidad del agua para riego, la dosis y el caudal de utilización, son factores muy a tener en cuenta en la gestión de los cultivos hortícolas en el Campo de Cartagena, ya que afectan a la calidad el suelo y a la producción de biomasa. De esta manera, se ha demostrado que el uso de agua de mala calidad agronómica es la principal causa de la salinización del suelo e incluso de la incipiente alcalinización. El uso de agua de mala calidad aumentó la salinidad del suelo con la consecuente disminución de la calidad de la cosecha. Los parámetros de CE y de pH del resultaron ser buenos indicadores de respuesta rápida para evaluar el estado del suelo y pueden servir para predecir una mejora o un empeoramiento rápido de la calidad del suelo de cultivo.

Los valores que se ven afectados por el agua de riego no solo tienen que ver con el pH y la CE, sino también con los de iones como los nitratos y fosfatos. En el caso de los nitratos, existe una importante lixiviación de estos a horizontes profundos, pudiendo afectar a acuíferos o lixivando hacia zonas como la laguna del Mar Menor en este caso, contaminando el agua de esta y produciendo la falta de oxígeno y la consecuente pérdida de fauna y flora, en donde las consecuencias no solo son ecológicas sino también económicas, viéndose mermado el turismo en la zona.

Todas estas prácticas sostenibles se hacen relevantes en un medio como el sureste español donde el clima es cálido y la falta de agua evidente y donde el uso de fertilizantes inorgánicos y prácticas inadecuadas, entre otros, hacen del suelo un bien susceptible de ser contaminado o dañado afectando a su porosidad y a su resistencia a la erosión, traduciéndose en producciones de peor o mala calidad y contaminando áreas cercanas o incluso acuíferos subterráneos y afectando finalmente al ecosistema dependiente, como es el caso del Mar Menor en Cartagena. El rol del suelo en el ciclo del carbono es también imprescindible, capturando el 75% del CO<sub>2</sub> terrestre, por lo que no se puede permitir su degradación.

En cuanto a la necesidad de la reducción nitratos en los cultivos para evitar la lixiviación a horizontes inferiores, se ha visto que el uso de cubiertas vegetales como la avena-veza proveen al suelo de materia orgánica y son una alternativa viable para la consecución de dichos objetivos. El proceso de salinización y alcalinización que se ha observado en muchos cultivos debido a las malas prácticas y al uso de agua de mala calidad, sumado al uso de agroquímicos y al clima árido que actúa como catalizador, se ve minimizado con un riego óptimo y de mejor calidad que eviten la lixiviación de nutrientes y la precipitación de carbonatos y fosfatos y la oxidación del nitrógeno a formas de nitritos.

En especies cultivadas como el cilantro, se ha observado que el riego deficitario afecta al rendimiento de este, sin embargo, si el riego es óptimo o excedentario, el rendimiento mejora. En este caso, ya que los valores de producción son parecidos entre el riego óptimo y el excedentario, debemos ajustar la dosis de riego a valores óptimos con el fin de evitar la lixiviación de iones a horizontes profundos, con los consiguientes riesgos de contaminación del nivel freático.

La rotación de cultivos que se ha llevado a cabo, a base de lechuga, espinacas y cilantro, así como el empleo de cubiertas vegetales durante la etapa estival ha supuesto un incremento muy significativo en la materia orgánica del suelo y ha resultado ser una alternativa para reducir la concentración de Na<sup>+</sup> y el NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en los suelos salinos de estudio en el Campo de Cartagena. Este es un hecho importante, sobre todo para suelos donde la materia orgánica es escasa y los suelos y los acuíferos acaban sufriendo procesos de contaminación y alcalinización debido al uso de agua de mala calidad para el riego y

debido también al uso de agroquímicos, a veces excesivo. En estos casos, todo se ve catalizado por el clima árido existente. En cuanto a las cubiertas vegetales, ha quedado demostrado que son necesarias para mejorar las propiedades de los suelos y de los cultivos, pero en el caso de la aveza y la veza se debe tener en cuenta que son especies muy sensibles a la salinidad del suelo por lo que habría que intentar, en estos suelos, plantar otras especies que puedan suplir las características que la avena y la veza aportan.



The word "Bibliografía" is centered on the page. It is set against a background of several horizontal, overlapping brushstrokes in a vibrant orange color. The word itself is written in a bold, black, sans-serif font.

# Bibliografía





- Adams, A. M., Gillespie, A. W., Dhillon, G. S., Kar, G., Minielly, C., Koala, S., Ouattara, B., Kimaro, A. A., Bationo, A., & Schoenau, J. J. (2020). Long-term effects of integrated soil fertility management practices on soil chemical properties in the Sahel. *Geoderma*, *366*, 114207.
- Agencia Europea de Medio Ambiente, P., Oficina Regional para Europa International Environment House. (2002). *Con los pies en la Tierra: La degradación del suelo y el desarrollo sostenible en Europa*. [Divulgativo]. Agencia Europea de Medio Ambiente. PNUMA, Oficina Regional para Europa.
- Alias, L. J., & Ortiz Silla, R. (1975). [Physiographical and ecological characteristics pedogenetically interesting for Campo de Cartagena (Murcia)[Spain]]. *Anales del Instituto Botanico AJ Cavanilles (Spain)*.
- Alias, L. J., & Ortiz-Silla, R. (1977). Aridisols of the Campo de Cartagena (Murcia). I. Camborthids: General and mineralogical characteristics. *Anales de edafología y agrobiología*.
- Altieri, M. A. (2019). *Agroecology: The Science Of Sustainable Agriculture, Second Edition* (2.<sup>a</sup> ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429495465>
- Archer, D., Jaradat, A., Johnson, J., Weyers, S., Gesch, R., Forcella, F., & Kludze, H. (2007). Crop Productivity and Economics during the Transition to Alternative Cropping Systems. *Agronomy journal*, *99*.  
<https://doi.org/10.2134/agronj2006.0364>
- Arshad, M. A., & Martin, S. (2002). Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *88*(2), 153-160.  
[https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00252-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00252-3)

- Bastida, F., Kandeler, E., Moreno, J. L., Ros, M., García, C., & Hernández, T. (2008). Application of fresh and composted organic wastes modifies structure, size and activity of soil microbial community under semiarid climate. *Applied Soil Ecology*, 40(2), 318-329.
- Bastida, J. A. H., Fernández, M. T., Villalba, F. G., & García, F. (2005). Influencia del uso y manejo del suelo en su calidad ambiental: Relación con el contenido en sales y nutrientes en suelos de zonas semiáridas. *Control de la degradación de suelos*, 107-111. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1395664>
- Bastida López, F. (2008). *Procesos de degradación y recuperación de suelos en zonas semiáridas: Establecimiento de un índice de degradación biológica de suelos (IDBS)* [Http://purl.org/dc/dcmitype/Text, Universidad Politécnica de Cartagena]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=50060>
- Berger, E., Israel, G., Miller, C., Parkinson, B., Reeves, A., & Williams, N. (2016). *World History: Cultures, States, and Societies to 1500*. <https://oer.galileo.usg.edu/history-textbooks/2/>
- Bhattacharyya, R., Ghosh, B. N., Mishra, P. K., Mandal, B., Rao, C. S., Sarkar, D., Das, K., Anil, K. S., Lalitha, M., & Hati, K. M. (2015). Soil degradation in India: Challenges and potential solutions. *Sustainability*, 7(4), 3528-3570.
- Buckley, D. H., & Schmidt, T. M. (2001). The structure of microbial communities in soil and the lasting impact of cultivation. *Microbial Ecology*, 42(1), 11-21. <https://doi.org/10.1007/s002480000108>
- Caballero Pedraza, A., Romero Díaz, A., & Espinosa Soto, I. (2015). Cambios paisajísticos y efectos medioambientales debidos a la agricultura intensiva en la Comarca de

- Campo de Cartagena-Mar Menor (Murcia). *Estudios Geográficos*, 76(279), 473-498. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201517>
- Castejón-Porcel, G., Espín-Sánchez, D., Ruiz-Álvarez, V., García-Marín, R., & Moreno-Muñoz, D. (2018). Runoff water as a resource in the Campo de Cartagena (Region of Murcia): Current possibilities for use and benefits. *Water*, 10(4), 456.
- Comisión de las Comunidades Europeas, 2006.  
<http://eur.lex.europa.eu/legalcontent/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:520006PC0232&from=en>.
- De Fraiture, C., & Wichelns, D. (2010). Satisfying future water demands for agriculture. *Agricultural Water Management*, 97(4), 502-511.  
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.08.008>
- Di Gioia, F., Roskopf, E. N., Leonardi, C., & Giuffrida, F. (2018). Effects of application timing of saline irrigation water on broccoli production and quality. *Agricultural Water Management*, 203, 97-104.
- El-Magd, A., Zaki, M. M. F., & Abou-Hussein, S. D. (2008). Effect of organic manure and different levels of saline irrigation water on growth, green yield and chemical content of sweet fennel. *Australian Journal of basic and applied sciences*, 2(1), 90-98.
- Emadodin, I., Narita, D., & Bork, H. R. (2012). Soil degradation and agricultural sustainability: An overview from Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 14(5), 611-625. <https://doi.org/10.1007/s10668-012-9351-y>
- Etikala, B., Narsimha, A., Madhav, S., Gowd, S., & Kumar, P. L. K. (2021). *Salinity Problems in Groundwater and Management Strategies in Arid and Semi-arid Regions* (pp. 42-56). <https://doi.org/10.1002/9781119709732.ch3>

- Fageria, N., & Stone, L. (2006). Physical, Chemical, and Biological Changes in the Rhizosphere and Nutrient Availability. *Journal of Plant Nutrition - J PLANT NUTR*, 29, 1327-1356. <https://doi.org/10.1080/01904160600767682>
- FAO, 2023. (2023). *Portal de Suelos de la FAO*. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-degradation-restoration/es/>
- Galati, A., Schifani, G., Crescimanno, M., Vrontis, D., & Migliore, G. (2018). Innovation strategies geared toward the circular economy: A case study of the organic olive-oil industry. *RIVISTA DI STUDI SULLA SOSTENIBILITA'*, 2018/1. <https://doi.org/10.3280/RISS2018-001011>
- García-Orenes, F., Cerdà, A., Mataix-Solera, J., Guerrero, C., Bodí, M. B., Arcenegui, V., Zornoza, R., & Sempere, J. G. (2009). Effects of agricultural management on surface soil properties and soil–water losses in eastern Spain. *Soil and Tillage Research*, 106(1), 117-123. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.06.002>
- Giubergia, J. P., Martellotto, E., & Lavado, R. S. (2013). Complementary irrigation and direct drilling have little effect on soil organic carbon content in semiarid Argentina. *Soil and Tillage Research*, 134, 147-152.
- González, E.J.; Veroz, O; Gil, J; Ordoñez, R. (2018). *Iniciativa Cuatro Por Mil: El Carbono Orgánico Del Suelo Como Herramienta de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático En España*. Minist. Agric. Pesca Aliment. Medio Ambiente. [https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/4por1000\\_tcm30-438109.pdf](https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/4por1000_tcm30-438109.pdf)
- Gregory, A. S., Dungait, J. A. J., Watts, C. W., Bol, R., Dixon, E. R., White, R. P., & Whitmore, A. P. (2016). Long-term management changes topsoil and subsoil organic carbon and nitrogen dynamics in a temperate agricultural system.

- European Journal of Soil Science*, 67(4), 421-430.  
<https://doi.org/10.1111/ejss.12359>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2000). *Land Use, Land-Use Change and Forestry* (p. 375) [Informe especial del Grupo de trabajo III del IPCC]. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.  
<https://www.ipcc.ch/report/land-use-land-use-change-and-forestry/>
- Hancock, J. (2021). *Los orígenes de la agricultura en el mundo [Origins of World Agriculture]*. <https://www.worldhistory.org/trans/es/2-1886/los-origenes-de-la-agricultura-en-el-mundo/>
- Huang, X., Jia, Z., Guo, J., Li, T., Sun, D., Meng, H., Yu, G., He, X., Ran, W., & Zhang, S. (2019). Ten-year long-term organic fertilization enhances carbon sequestration and calcium-mediated stabilization of aggregate-associated organic carbon in a reclaimed Cambisol. *Geoderma*, 355, 113880.
- Huisa Altamirano, D. (2020). *La calidad del suelo en campos de agricultura intensiva de café (Coffea arabica) VAR. CATIMOR en el anexo Alto Pitocuna del distrito de Río Negro. Satipo. 2018.*  
<https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/8447>
- IBNO NAMR, K., & Mrabet, R. (2004). Influence of agricultural management on chemical quality of a clay soil of semi-arid Morocco. *Journal of African Earth Sciences - J AFR EARTH SCI*, 39, 485-489.  
<https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2004.07.016>
- International Union of Soil Sciences. (2022). *IUSS Strategic Plan 2021 to 2030.*
- Iqbal, M., Khan, A. G., Ul-Hassan, A., & Islam, K. R. (2017). Tillage and Nitrogen Fertilization Impact on Irrigated Corn Yields, and Soil Chemical and Physical

- Properties Under Semiarid Climate. *Journal of Sustainable Watershed Science and Management*, 1(3), 90-98. <https://doi.org/10.5147/jswsm.v1i3.140>
- Jorge Eliécer Molina Zapata. (2021). *La revolución verde como revolución tecnocientífica artificialización de las prácticas agrícolas y sus implicaciones*. 21(42), 175-204. <https://doi.org/10.18270/rcfc.v21i42.3477>
- Jorge-Mardomingo, I., Jiménez-Hernández, M. E., Moreno, L., de la Losa, A., de la Cruz, M. T., & Casermeiro, M. Á. (2015). Application of high doses of organic amendments in a Mediterranean agricultural soil: An approach for assessing the risk of groundwater contamination. *Catena*, 131, 74-83.
- Lal, R. (2000). PHYSICAL MANAGEMENT OF SOILS OF THE TROPICS: PRIORITIES FOR THE 21ST CENTURY: *Soil Science*, 165(3), 191-207. <https://doi.org/10.1097/00010694-200003000-00002>
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123(1-2), 1-22.
- Lal, R. (2008). Soils and sustainable agriculture. A review. <http://dx.doi.org/10.1051/agro:2007025>, 28. <https://doi.org/10.1051/agro:2007025>
- Lichtfouse, E., Mireille, N., Debaeke, P., Souchère, V., Alberola, C., & Ménassieu, J. (2009). Agronomy for Sustainable Agriculture: A Review. <http://dx.doi.org/10.1051/agro:2008054>, 29. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_1)
- Ma, W., Li, G., Wu, J., Xu, G., & Wu, J. (2020). Response of soil labile organic carbon fractions and carbon-cycle enzyme activities to vegetation degradation in a wet meadow on the Qinghai–Tibet Plateau. *Geoderma*, 377, 114565.

- Mahvi, A. H., Nouri, J., Babaei, A. A., & Nabizadeh, R. (2005). Agricultural activities impact on groundwater nitrate pollution. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 2(1), 41-47. <https://doi.org/10.1007/BF03325856>
- Martínez-Casasnovas, J. A., & Sánchez-Bosch, I. (2000). Impact assessment of changes in land use/conservation practices on soil erosion in the Penedès–Anoia vineyard region (NE Spain). *Soil and Tillage Research*, 57(1-2), 101-106.
- Más Monsonís, M. (2019). *Definición dinámica de los usos del suelo a escala mensual mediante imágenes de satélite. Primeros pasos para la caracterización y modelización de la transferencia de nitratos al flujo subsuperficial en suelos con agricultura intensiva en el Campo de Cartagena.*  
<https://repositorio.upct.es/handle/10317/8157>
- Menchón, M. M. (2007). Las ramblas del Campo de Cartagena. Problemática ambiental de la Laguna del Mar Menor. *Revista Murciana de Antropología*, 14, 63-76.
- Menchón, M. M., & Alonso, M. S. (2007). El agua en el Campo de Cartagena. *Revista Murciana de Antropología*, 14, 47-61.
- Michelena, R., Morrás, H., y C. Irurtia. (2008). *Degradación física por agricultura continua de suelos franco-limosos de la provincia de Córdoba.*
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (2022). *INFORME ANUAL DE INDICADORES. Agricultura, Pesca y Alimentación.* [Divulgativo]. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.  
<https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/servicios/analisis-yprospectiva/default.aspx>
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Subdirección General de Planificación de Políticas Agrarias., & Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación

- (Gobierno de España). (s. f.). *Plan Estratégico de la PAC de España (2023-2027). Resumen del Plan aprobado por la Comisión Europea*. Centro de Publicaciones del MAPA.
- Morales, A. P., Meseguer, E. G., & Espín, J. M. G. (2014). Las aguas residuales regeneradas como recurso para los regadíos de la Demarcación Hidrográfica del Segura (España). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*.  
[https://www.bage-geografia.es/ojs/index.php/bage/article/download/1691/1608](https://www.bage.age-geografia.es/ojs/index.php/bage/article/download/1691/1608)
- Peña-Chocarro, L., & Arranz-Otaegui, A. (2019). *La explotación de las plantas y los inicios de la agricultura en el Próximo Oriente: 20 años de investigación arqueobotánica*. <https://digital.csic.es/handle/10261/222304>
- Peña-Haro, S., Llopis-Albert, C., Pulido-Velazquez, M., & Pulido-Velazquez, D. (2010). Fertilizer standards for controlling groundwater nitrate pollution from agriculture: El Salobral-Los Llanos case study, Spain. *Journal of Hydrology*, 392(3-4), 174-187.
- Pérez Vázquez, A., & Landeros Sánchez, C. (2009). *Agricultura y deterioro ambiental*.
- Prieto Prieto, J. A. (2009). Agricultura y ganadería en el Campo de Cartagena como modelo de los cambios recientes que ha experimentado el sector primario en la Región de Murcia. *Tercera edición de premios a la elaboración de materiales curriculares sobre la identidad de la Región de Murcia: bachillerato. 2009*.  
<https://redined.educacion.gob.es/xmlui/handle/11162/87044>
- Rao, R., K, K., Ch, S., Wani, S., Sahrawat, K., & Pardhasaradhi, G. (2012). Alleviation of Multinutrient Deficiency for Productivity Enhancement of Rain-Fed Soybean and Finger Millet in the Semi-arid Region of India. *Communications in Soil*



*Science and Plant Analysis*, 43, 1427-1435.

<https://doi.org/10.1080/00103624.2012.670344>

REGLAMENTO (UE) 2021/2115 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 2 de diciembre de 2021, Pub. L. No. L 435/1, 186 (2021).

*Report of the United Nations Conference on Environment and Development: Hearing on A/CONF.151/26 en United Nations* (1992).

Requejo, M. I., Cartagena, M. C., Villena, R., Arce, A., Ribas, F., Cabello, M. J., & Castellanos, M. T. (2014). Wine-distillery waste compost addition to a drip-irrigated horticultural crop of central Spain: Risk assessment. *Biosystems engineering*, 128, 11-20.

*Resolución A/RES/70/1 Transformar Nuestro Mundo: La Agenda 2030 Para El Desarrollo Sostenible: Hearing on A/RES/70/1 en Naciones Unidas* (2015).  
[https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1\\_es.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_es.pdf)

Sánchez-Navarro, A., Girona Ruiz, A., & Delgado Iniesta, M. J. (2020). *Influence of intensive horticultural cultivation on soil salinity in Campo de Cartagena (Murcia)*. <https://digitum.um.es/digitum/handle/10201/105121>

Sánchez-Navarro, A., Jiménez-Ballesta, R., Girona-Ruiz, A., Alarcón-Vera, I., & Delgado-Iniesta, M. J. (2022). Rapid Response Indicators for Predicting Changes in Soil Properties Due to Solarization or Biosolarization on an Intensive Horticultural Crop in Semiarid Regions. *Land*, 11(1), 64.

Sánchez-Navarro, A., Sánchez-Martínez, J., Barba-Corbalán, E. M., Valverde-Pérez, M., Girona-Ruiz, A., & Delgado-Iniesta, M. J. (2021). Long-Term Effects of the Use of Organic Amendments and Crop Rotation on Soil Properties in Southeast Spain. *Agronomy*, 11(11), 2363.

- Sauvé, S., Bernard, S., & Sloan, P. (2016). Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research. *Environmental Development*, *17*, 48-56.  
<https://doi.org/10.1016/j.envdev.2015.09.002>
- Tilman, D., Fargione, J., Wolff, B., D'Antonio, C., Dobson, A., Howarth, R., Schindler, D., Schlesinger, W. H., Simberloff, D., & Swackhamer, D. (2001). Forecasting Agriculturally Driven Global Environmental Change. *Science*, *292*(5515), 281-284. <https://doi.org/10.1126/science.1057544>
- Wang, X., Lü, S., Gao, C., Xu, X., Wei, Y., Bai, X., Feng, C., Gao, N., Liu, M., & Wu, L. (2014). Biomass-based multifunctional fertilizer system featuring controlled-release nutrient, water-retention and amelioration of soil. *RSC Advances*, *4*(35), 18382-18390. <https://doi.org/10.1039/C4RA00207E>
- Wienhold, B. J., Andrews, S. S., & Karlen, D. L. (2004). Soil Quality: A Review of the Science and Experiences in the USA. *Environmental Geochemistry and Health*, *26*(2), 89-95. <https://doi.org/10.1023/B:EGAH.0000039571.59640.3c>
- Xu, X., Zhang, M., Li, J., Liu, Z., Zhao, Z., Zhang, Y., Zhou, S., & Wang, Z. (2018). Improving water use efficiency and grain yield of winter wheat by optimizing irrigations in the North China Plain. *Field Crops Research*, *221*, 219-227.
- Yan, Z., Zhang, W., Wang, Q., Liu, E., Sun, D., Liu, B., Liu, X., & Mei, X. (2022). Changes in soil organic carbon stocks from reducing irrigation can be offset by applying organic fertilizer in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, *266*, 107539.