



Universidad de Jaén
Centro de Estudios de Postgrado

Trabajo Fin de Máster

**ESTUDIO Y MODELIZACIÓN DE
LA EVOLUCIÓN DEL CARBONO
ORGÁNICO DEL SUELO EN EL
MUNICIPIO DE ESTEPA
(SEVILLA), EN FUNCIÓN DE LOS
DISTINTOS ESCENARIOS DE
CAMBIO CLIMÁTICO.**

Alumna: Navarro Espinosa, Sofía

Tutores: Julio Antonio Calero González
Roberto García Ruiz

Dpto.: Geología

Febrero, 2023



Universidad de Jaén
Centro de Estudios de Postgrado

**Máster Universitario en Análisis, Conservación y Restauración de
Componentes Físicos y Bióticos de los Hábitats**

Trabajo Fin de Máster

**ESTUDIO Y MODELIZACIÓN DE LA
EVOLUCIÓN DEL CARBONO ORGÁNICO DEL
SUELO EN EL MUNICIPIO DE ESTEPA
(SEVILLA), EN FUNCIÓN DE LOS DISTINTOS
ESCENARIOS DE
CAMBIO CLIMÁTICO**

**Fdo.: Sofía Navarro
Espinosa**

**Fdo.: Julio Calero
González (tutor)**

**Fdo.: Roberto García Ruiz
(tutor)**

Jaén, Febrero, 2023

ÍNDICE

RESUMEN	5
ABSTRACT	6
1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. Antecedentes	7
1.1.1. Agricultura y Cambio Climático	7
1.1.2. Carbono orgánico del suelo	8
1.1.3. Estrategias Europeas de mitigación del Cambio Climático	11
1.1.4. Soluciones Climáticas Basadas en la Naturaleza (SCbN) en agricultura	13
1.1.5. Soluciones Climáticas basadas en la Naturaleza en el olivar andaluz	15
1.2. Justificación del trabajo	17
1.3. Hipótesis	18
2. OBJETIVOS.....	18
3. MATERIAL Y MÉTODOS.....	19
3.1. Zona de estudio.....	19
3.2. Material empleado	19
3.3. Metodología.....	20
3.3.1. Reclasificación coberturas del suelo	20
3.3.2. Descripción del modelo RothC	21
3.3.3. Estructura del modelo RothC.....	22
3.3.4. Entradas necesarias para el modelo	23
3.3.4.1. Datos de clima y cambio climático	23
3.3.4.2. Porcentaje de arcilla	24
3.3.4.3. Entrada de residuos vegetales y FYM mensuales.....	24
3.3.4.4. Descomposición del material vegetal entrante: DPM/RPM ratio	25
3.3.5. Creación de los archivos weather y land management.....	26
3.3.6. Modelo “Knowing total carbon”	27
3.3.7. Escenarios	28
3.3.9. Cálculo del límite de saturación y déficit de saturación de carbono.....	29
3.3.10. Elaboración de mapas	31
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
4.1. Carbono orgánico del suelo en 2050, ante un escenario sin y con cambio climático	32
4.2. Cambio de manejo para 2050 sin y con cambio climático	35
4.3. Límite y déficit de saturación de carbono.....	37

5. CONCLUSIONES	39
6. REFERENCIAS	41
ANEXO.....	47
ASIGNATURAS CURSADAS EN EL MÁSTER	56
CURRICULUM VITAE	58

RESUMEN

La modelización de la dinámica del carbono orgánico del suelo (SOC) y la adopción de prácticas de manejo que potencien la fijación de SOC son de gran importancia para la mitigación del cambio climático. En el presente estudio se estimó el contenido de SOC para el año 2050, de los principales usos del suelo (olivar convencional y sostenible, herbáceos y monte) empleando el modelo RothC, en el municipio de Estepa (Sevilla), con y sin cambio climático y bajo prácticas de manejo actuales o implementando combinaciones sostenibles de éstas. Si no se implementan cambios en el manejo, los olivares estudiados perderán entorno al 50 % del carbono orgánico en 30 años, con y sin cambio climático. La cubierta verde, junto con la aplicación de alpeorujo compostado, redujo significativamente la pérdida de carbono orgánico. Los altos valores de déficit de carbono orgánico en el suelo sugieren que hay un elevado potencial de acumulación de SOC, y por tanto de contribuir a la mitigación del cambio climático, especialmente si se emplean prácticas de manejo técnica y económicamente viables que impliquen un aumento en las entradas de carbono al suelo.

Palabras clave: Olivar convencional / Cambio climático / Secuestro de carbono / Carbono orgánico del suelo / RothC

ABSTRACT

Soil organic carbon (SOC) modeling and the adoption of management practices that enhance C fixation are of great importance in climate change mitigation. Therefore, in the present study the soil organic carbon content for the year 2050 was estimated for four units of interest (conventional olive grove, sustainable olive grove, herbaceous and forest) using the RothC model, in the municipality of Estepa (Seville). Six scenarios were established in which the effect of climate change was taken into account and the application of this model allowed obtaining approximate values of SOC in the different land uses. Conventional olive grove cultivation showed lower values due to the management practices carried out, which favor the loss of organic carbon from the soil to the atmosphere. Likewise, the carbon saturation deficit of the four units was estimated to evaluate the carbon fixation capacity of each of them, with all of them, with the exception of the mountain unit, having a high carbon sequestration capacity.

Keywords: Conventional olive grove / Climate change / Carbon sequestration / Soil organic carbon / RothC

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

1.1.1. Agricultura y Cambio Climático

El cambio climático se acentúa con el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), debido en su mayoría a actividades antrópicas como la industria, quema de combustibles fósiles y la agricultura. La agricultura es responsable aproximadamente del 24% de las emisiones de GEI en el mundo (IPCC, 2019). Hay que tener en cuenta que, en la agricultura tradicional se llevan a cabo prácticas de manejo que conllevan una pérdida del carbono del suelo como la quema de rastrojos, utilización de abonos orgánicos e inorgánicos, etc., a lo que hay que sumar las emisiones procedentes del uso de maquinaria agrícola, respiración de vegetales, descomposición de materia orgánica del suelo (Maqueda, *et al.* 2005) y la pérdida de carbono orgánico debido a la roturación de nuevas tierras para uso agrícola (Lal, 2004). Todo ello condiciona que la intensificación que ha sufrido la agricultura mundial en las últimas décadas, junto con las prácticas de manejo en el suelo que conlleva, haya contribuido al aumento de las emisiones de CO_2 a la atmósfera (García *et al.*, 2008), actuando el suelo como una fuente y no como un sumidero de carbono.

No obstante, la implementación de prácticas de manejo en la agricultura más respetuosas con el medio ambiente puede contribuir a disminuir la pérdida de carbono orgánico del suelo (SOC) y, con ello, reducir las emisiones de CO_2 a la atmósfera (Torrús *et al.*, 2019). En este sentido, numerosos científicos y expertos en Agronomía y Ciencias del Suelo, lanzaron en 2017 la iniciativa “4 por 1000” (Minasny *et al.*, 2017). Partiendo de la premisa de que si el contenido de carbono orgánico, referido al primer metro de suelo, se incrementase anualmente en un 0,4% (un 4‰) se conseguirían fijar unas 10 Gt de C (40 Gt de CO_2), lo que corresponde, a grandes rasgos, con todas las emisiones debidas a los combustibles fósiles que la humanidad produce durante un año (Friendligstein *et al.*, 2020).

A pesar de sus evidentes puntos débiles, por ejemplo, que todos los suelos no pueden incrementar en la misma cuantía su contenido en carbono orgánico (especialmente los que ya están cerca de su límite de saturación) (Lal, 2016), la iniciativa “4 por mil” ha conseguido poner de relieve el enorme potencial del suelo como sumidero de carbono, y que puede ser un factor decisivo a la hora de alcanzar de forma efectiva una política de emisiones netas cero (zero net emissions) (IPCC, 2019). Desde el punto de vista de la comunidad científica, el SOC en sistemas agrícolas puede actuar como uno de los principales proxy para testear la evolución de estrategias de cambio climático (Lal, 2008; Dignac *et al.*, 2017).

1.1.2. Carbono orgánico del suelo

El carbono orgánico del suelo (SOC) consiste en una parte significativa del ciclo global del C, dando cuenta de más de 4000 Gt –si incluimos el permafrost-, lo que supone alrededor del 10% de todo el C planetario (FAO, 2017; Friendligstein *et al.*, 2020). Teniendo en cuenta que estos cálculos se hacen para los 2 primeros metros de la superficie continental, se concluye que el suelo es el medio con la densidad de carbono orgánico más elevada de todo el sistema terrestre. Cualquier proceso, natural o artificial que altere el equilibrio del suelo influirá decisivamente en el ciclo global del C, tanto para bien como para mal.

El SOC tiene una importante relación con la materia orgánica del suelo, ya que tanto la materia viva como la materia muerta se encuentran formadas por carbono orgánico. Éste, procedente del CO₂ de la atmósfera, forma parte de las plantas que, a su vez, forman parte de la fauna. De igual modo, la materia orgánica muerta es incorporada de nuevo al suelo y supone la entrada del carbono orgánico debido a los procesos de transformación, por microorganismos, que da lugar a una mezcla de residuos de carácter vegetal en diferentes fases de descomposición (Von Lützow *et al.* 2006; Dignac *et al.*, 2017).

El SOC ésta presente en diferentes fracciones y dada la complejidad de identificar la cantidad de compuestos que contienen carbono orgánico, Six *et al.* (2002) clasificaron el carbono orgánico del suelo en dos categorías: protegido y no protegido.

- *Carbono orgánico del suelo no protegido.* Es el carbono que está relacionado con los restos vegetales más recientes y que se encuentran en las capas más superficiales del suelo o a poca profundidad. Su tiempo de residencia medio en el suelo es escaso, desde días a meses, y pronto se descompone liberando CO₂ y sales minerales.
- *Carbono orgánico del suelo protegido.* En este caso, se pueden encontrar tres fracciones de carbono: física, química y bioquímicamente protegido. Su tiempo medio de residencia en el suelo se cuenta en miles de años por lo que, desde el punto de vista antrópico, es carbono estable.

Físicamente, el carbono orgánico se halla protegido en el interior de los agregados del suelo. Por lo tanto, los microorganismos no pueden acceder al interior y el carbono queda aislado de los procesos de descomposición. Químicamente, se enlaza el carbono orgánico con las partículas finas del suelo como las fracciones de limo y/o arcilla (excepto la arena), dando lugar a complejos orgánico-minerales resistentes a la descomposición por parte de las bacterias y hongos (Calero *et al.*, 2017), de manera que, a mayor contenido de arcilla y/o limo presente el suelo más protegido estará el carbono orgánico. Bioquímicamente, el carbono queda protegido debido a la composición química tan compleja que presentan los materiales orgánicos y que los hace difíciles de descomponer. Es de destacar que, a nivel molecular,

muchos de estos mecanismos se entrelazan unos con otros, de manera que no es fácil explicar en qué medida contribuirán a la estabilización o protección efectiva del carbono en el suelo (Calero *et al.*, 2023).

A mayor cantidad de carbono orgánico haya en el suelo menos CO₂ habrá en la atmósfera. Por lo que, potenciar el secuestro de carbono es una de las principales tareas para reducir el CO₂ y mejorar la calidad de los suelos fijando así carbono orgánico. En este sentido, es evidente que la fracción de carbono orgánico protegido, sea por uno u otro mecanismo (físico, químico o bioquímico) se relaciona con la cantidad máxima de carbono que un suelo puede retener o secuestrar. En base a las fracciones protegidas y no protegidas, y teniendo en cuenta la estrecha relación entre la fase mineral y orgánica del suelo, Six *et al.* (2002) establecen un límite máximo de estabilización de carbono orgánico en el suelo, que se relaciona con la cantidad de elementos finos del mismo. Este valor, denominado límite de saturación, adquiere relevancia desde el punto de vista práctico, ya que marca un valor superior superado el cual la adición de materia orgánica será incluso contraproducente, ya que esta, al no poder ser estabilizada, terminará descomponiéndose y emitiendo CO₂. En cualquier caso, los suelos agrícolas se hayan por término medio muy alejados del límite de saturación (es decir, presentan déficits de saturación importantes, a veces superiores al 50%), siendo probablemente los suelos que cuentan con una mayor capacidad para incrementar los sumideros de carbono de toda la edafosfera (Lal, 2013).

Independientemente de colaborar en la retención de CO₂ atmosférico, el carbono orgánico tiene una gran importancia debido a su influencia en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Favorece la formación de agregados, mejorando la aireación y el movimiento del agua debido a un aumento de la porosidad del suelo. Facilita la disponibilidad de nutrientes para el desarrollo de las plantas y, en suma, el SOC supone una importante fuente de energía y C para los microorganismos del suelo (Martínez, *et al.* 2008). Atendiendo a esto, la presencia de carbono orgánico aporta fertilidad al suelo. Por lo que, se puede entender que, si el SOC disminuye, repercute en la fertilidad del mismo y lo que acarrearía problemas en la disponibilidad de agua del suelo, erosión, y potenciaría el uso de fertilizantes para obtener una producción más adecuada. Como ocurre en la mayor parte de los cultivos agrícolas.

Por todo lo comentado, es importante tener claro cuando, en el suelo, la reserva o stock en la que se almacena el carbono orgánico actúa como un sumidero o una fuente de C. Cuando en dicha reserva se produce una acumulación de carbono orgánico y el balance de CO₂ es negativo, se trata de un sumidero (Vicente, 2017). Por el contrario, si en la reserva disminuye el SOC y el balance de CO₂ es positivo, actúa como una fuente liberando C a la atmósfera.

La cantidad de carbono orgánico que se acumule en el suelo dependerá de las entradas y salidas. El almacenamiento del SOC se puede controlar mediante el aporte de residuos orgánicos, de tipo vegetal (FAO y GTIS, 2015). Cuanto mayor sean las entradas de carbono orgánico para un valor fijo de salidas, aumentará el almacenamiento del carbono en el suelo (sumidero). De igual modo, cuanto menor sean las salidas para unas entradas fijas, también aumentará progresivamente el contenido de carbono orgánico en el suelo.

En bosques mediterráneos y/o pastizales, el carbono orgánico no tiende a cambiar en gran medida, aunque puede aumentar progresivamente y llegar a un estado estacionario. Se debe a que las plantas y árboles que forman dichos ecosistemas toman el CO₂ atmosférico, transformándolo en carbono orgánico y almacenándolo en todas partes (hojas, tronco, raíces, etc.). Éste C pasa al suelo una vez mueren esas plantas y es tomado por microorganismos presentes en él, los cuales emplean una parte de ese carbono para desarrollarse, otra lo emiten a la atmósfera de nuevo y otro pasa a formar parte de sus desechos, y así de manera sucesiva en la red trófica. Por lo que, finalmente, la mayor parte de ese carbono orgánico que se encontraba distribuido por toda la planta se termina almacenando en el suelo.

Por otra parte, en el caso del cultivo del olivar la acumulación de carbono en el suelo se ve influenciada por el manejo del mismo. Se pueden manejar las entradas y salidas de carbono orgánico del suelo, para que éstas últimas disminuyan notablemente, y se pueda aumentar el secuestro de carbono en los suelos agrícolas.

Tabla 1.1.2.1. Entradas y salidas de carbono orgánico del suelo consideradas en el olivar

Entradas de C.O. al suelo	- CO₂ tomado por el propio olivo, mediante el proceso de la fotosíntesis - Aportes de alperujo compostado - Aporte de materia orgánica (ej. estiércol)
Salidas de C.O. del suelo	- Descomposición - Pérdidas de suelo, y por ende de carbono orgánico, por procesos de erosión y escorrentía superficial

Las pérdidas de suelo y, por consecuente, de carbono orgánico por los procesos de erosión suelen ser desencadenados por prácticas de laboreo, afectando de manera negativa al almacenamiento y reserva del carbono orgánico en el suelo, puesto que se potencian las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Lal (2019) concluye, en una revisión exhaustiva sobre la influencia de la erosión en la emisión de CO₂, que este proceso puede ser decisivo en la pérdida de SOC, aunque reconoce que existen aún muchas lagunas en este campo de estudio.

1.1.3. Estrategias Europeas de mitigación del Cambio Climático

El primer objetivo político de la Comisión Europea en los próximos años, alineado estrechamente con los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) y la Agenda 2030 de la ONU, es el Clima y Medioambiente (Bassot, 2022). Mediante éste, se pretenden promocionar avances disruptivos en el sector ambiental, capaces de dar un impulso a la innovación, el empleo y la competitividad del continente en tecnologías sostenibles y situar a Europa a la vanguardia mundial en la lucha contra el cambio climático y protección de la naturaleza.

El Pacto Verde Europeo, aprobado por la Comisión Europea en diciembre de 2019 (COM(EU) 2019 Final) es el documento de base que sostiene este objetivo. Asumiendo en su integridad los desafíos de la cumbre del clima de París, la meta principal del Pacto Verde es la consecución de la neutralidad climática en 2050, a través de un crecimiento que sea rentable, justo y sostenible. Se trata de un desafío mayúsculo y transversal, que deberá guiar el resto de la acción ejecutiva europea, incluida la Estrategia de Ciencia e Innovación y la Política Agraria Común.

Entre las estrategias más importantes impulsadas por el Pacto Verde Europeo encontramos la Estrategia UE del campo a la mesa (Farm to Fork Strategy) (COM(2020), 381 final), y en cuyo seno se encuadra la iniciativa de Agricultura baja en Carbono o Carbon Farming. El enfoque de la Estrategia es extender a toda la cadena agroalimentaria (desde el manejo del suelo a la gestión de residuos alimentarios) el concepto de huella de carbono, mediante la que se pretende generar un marco adecuado bajo programas europeos como LIFE y Horizonte Europa, que conduzca a la estandarización, monitorización, publicación y verificación de metodologías encaminadas a normalizar las prácticas de manejo que mejoren la huella de carbono de los sistemas agrícolas.

El *Carbon Farming* (la agricultura del carbono) se basa en la gestión de depósitos de carbono, así como los flujos de C y flujos de los GEI en los cultivos agrícolas, con el objetivo de paliar el cambio climático. Dentro de la dicha gestión se considera una buena gestión del suelo, el ganado, así como las reservas de carbono y los flujos de CO₂, CH₄ y N₂O, ya que el IPCC los incluye en la agricultura del carbono (COWI, 2021).

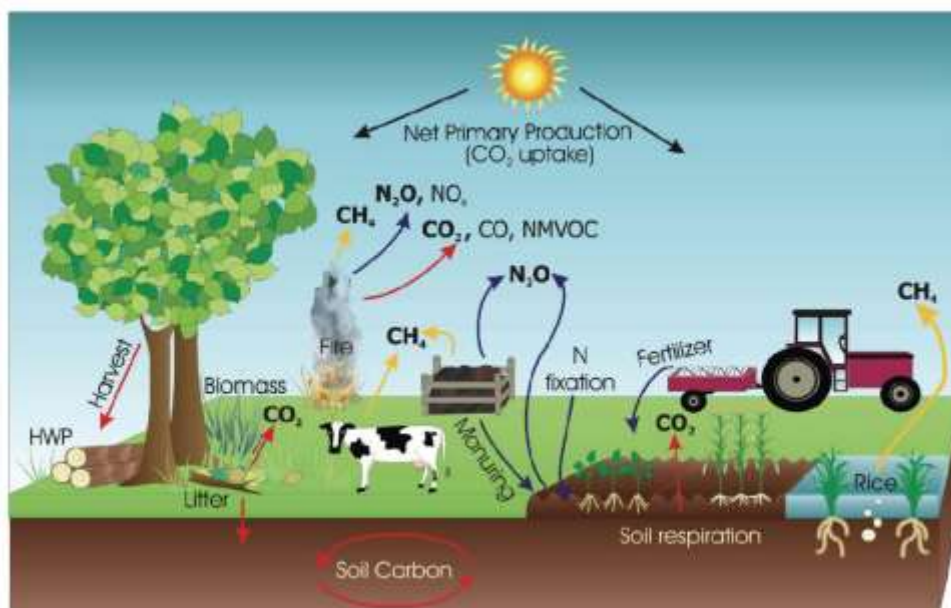


Figura 1.1.2.1. Principales fuentes de emisión/absorción de gases de efecto invernadero y procesos en las tierras agrícolas gestionadas. Fuente: COWI, 2021 (IPCC, 2006).

El potencial de almacenamiento de carbono orgánico en los suelos agrícolas es significativo, pero dada la gestión de la mayoría de dichos suelos actualmente no se está potenciando como debería. La diversidad de técnicas de manejo de un mismo cultivo y de las actividades de procesamiento resulta en una gran diversidad y variabilidad en el balance final de GEI. Es por ello que, no solo la UE, si no numerosas instituciones internacionales están implementando estrategias para promocionar e incentivar que las cadenas alimentarias de productos En ambos se incluyen como prioridad la fijación de CO₂ en el suelo, a través de prácticas como la obligatoriedad de dejar un mínimo del 40% de superficie cubierta o el aporte preferente de abonos orgánicos sobre químicos, en lo que ya se conoce como iniciativa Carbon Farming (MAPA 2022, página 21).

Otra de las estrategias más importantes derivadas del Pacto Verde Europeo, estrechamente relacionada con el Carbon Farming, es la Estrategia Europea Protección del Suelo para 2030 (COM, 2021, 699, Final). El objetivo principal de la estrategia es “asegurar que en 2050 todos los suelos de la UE alcancen el umbral mínimo de calidad del suelo (p.3)”. Para ello, la Estrategia ha puesto en marcha una hoja de ruta en la que, adoptando el enfoque de la misión “Soil health and Food” y su documento base: “Caring for Soils is caring for life” (European Commission, 2020), establece como objetivo “que el 75% de los suelos hayan recuperado un nivel de calidad suficiente en 2030 como para asegurar la provisión de servicios ecosistémicos esenciales tales como cultivos, soporte de biodiversidad, almacenamiento y regulación del flujo de agua, y mitigación del cambio climático”. La repercusión de la Estrategia para la protección del suelo en la política de Ciencia y Tecnología de la UE, implementada en el

programa marco Horizonte Europa, es más que obvia. De hecho, la misión Soil health and Food se encuadra en el segundo pilar del programa marco (el mejor dotado económicamente), concretamente en el clúster 6, muchas de cuyas áreas de investigación se dirigen al tema de la sostenibilidad ambiental de los sistemas agrícolas. A nivel estatal, la vigente Estrategia Española de Ciencia y Tecnología (EECTI 2021 - 2027) marca unas agrupaciones temáticas íntegramente alineadas con Horizonte Europa, entre ellas “Alimentación, Bioeconomía, Recursos Naturales y Medio Ambiente” (clúster 6), una cuyas líneas estratégicas (“Cadena agroalimentaria inteligente y sostenible”) refiere explícitamente la sostenibilidad del suelo como uno de sus objetivos específicos (Anexo II, p. 130), en consonancia con todo lo comentado arriba.

Más allá de las estrategias temáticas, un ámbito de importancia capital en los equilibrios presupuestarios europeos es política agraria común (PAC) (COM, 2018, 392 final). Esta supone, en lo que concierne a la agricultura, el marco normativo más evidente donde se implementan de forma efectiva las directrices de las estrategias temáticas. Así, la PAC, en su nuevo periodo 2023 – 2027, recoge de forma explícita que uno de los principales objetivos es la acción climática y el cuidado del medio ambiente, siendo el suelo uno de los elementos clave del agrosistema sobre el que se pretende actuar (MAPA, 2022). En concreto, tanto los Requisitos Legales de Gestión (RLG) como las Buenas Condiciones Agrarias y Medioambientales (BCAM) de la condicionalidad reforzada (RD 1049/2022), obligatorias para todos los agricultores, como los eco-regímenes (P) (RD 1051/2022), de acogimiento voluntario, incluyen medidas tales como el estricto control en la aplicación de agroquímicos (i.e. RLG 8, BCAM 10), cobertura mínima del suelo (i.e. BCAM 4 y 6, P6 y 7), protección frente a la erosión (i.e. BCAM 5) y, en definitiva, medidas de agricultura baja en carbono y la agroecología destinadas a “mejorar la estructura de los suelos, reduciendo los riesgos de erosión y desertificación, aumentando su contenido de carbono, e incrementando la biodiversidad y calidad del suelo” (p. 21). La fijación de carbono en el suelo constituye, a día de hoy, pues, un tema de calado transversal que tendrá importantes repercusiones económicas y legislativas a todos los niveles.

1.1.4. Soluciones Climáticas Basadas en la Naturaleza (SCbN) en agricultura

Gran parte de lo que se ha comentado anteriormente parece confluir en adopción del concepto de Solución Basada en la Naturaleza (SbN) como término paraguas capaz de afrontar el desafío asumido en el Pacto Verde Europeo y las diversas Estrategias que de él se derivan (Faivre *et al.*, 2017; Machac *et al.*, 2021; Hadjichambis *et al.*, 2022). La Comisión Europea define las SbN como “soluciones inspiradas y apoyadas por la naturaleza, que proveen beneficios ambientales, sociales y económicos, presentan una relación costo-beneficio

favorable, ayudan en la consecución de la resiliencia de paisajes, ciudades y ambientes marinos a través actuaciones localmente adaptadas y eficientes” (EU, 2020). De forma más general, Fernandes and Guiomar (2017) definen SbN como “el conjunto de soluciones tecnológicas encaminadas a la resolución de problemas prácticos de la sociedad y que están basadas en los procesos y sistemas naturales”. Poniendo el foco específicamente en el sector agrícola, Simelton et al. (2021) redefinen las SbN como “el uso de procesos o elementos naturales que mejoran los servicios ecosistémicos en las tierras afectados por prácticas agrícolas”. En el caso de SbN aplicadas específicamente a la mitigación del cambio climático, se puede hablar de Soluciones Climáticas Basadas en la Naturaleza (SCbN) (Griscom *et al.*, 2017; Girardin *et al.* 2021; Adil *et al.*, 2022). Se trata de un concepto que están recabando en la actualidad mucha relevancia por su interés de cara a conseguir el objetivo de emisiones netas cero (Anderegg *et al.*, 2022), aunque no hay que olvidar que, por su propia definición, las SbN actúan de forma sinérgica potenciando todos los servicios ecosistémicos, desde la mitigación del cambio climático a la protección de la biodiversidad, por lo que la distinción entre NbS y NCbS es más un recurso conceptual que una realidad práctica.

Diversos autores han propuesto listados de SCbN en terrenos agrícolas, que pueden ser extrapoladas sin dificultad al cultivo del olivar:

- Cubiertas vivas (Machac *et al.*, 2021): de vegetación espontánea o cultivos de cobertura, incluyendo catch crops, constituyen una de las principales prácticas encaminadas a la fijación de C en el suelo, además de reforzar de forma muy conveniente otros servicios ecosistémicos.
- Mulches (Damaneh *et al.*, 2022): se trata de una NBS muy eficaz en la provisión y regulación del ciclo del agua en el suelo.
- Enmiendas orgánicas (Mrunalini *et al.*, 2022; Sumberg, 2022): en forma de fertilizantes orgánicos y/o adición de residuos del cultivo al suelo, en sustitución de fertilizantes minerales de síntesis. Esta SBN se relaciona con una regulación más eficiente de los ciclos de nutrientes y la producción de biomasa, como SE básicos en agroecosistemas.
- Uso de ganado (Mrunalini *et al.*, 2022): el empleo controlado de ganado como elemento capaz de aprovechar la producción primaria excedente o no aprovechada del agrosistema, reporta importantes beneficios de cara a SE importantes como fijación de carbono y reciclaje de nutrientes.

Si bien es cierto que, hasta el momento, y de forma poco justificable, los diversos documentos de trabajo producidos por la UE que inciden en la aplicación de SbCN se refieren a ámbitos más próximos al urbanismo y las infraestructuras (EEA, 2021), su extensión natural al sector

agroambiental parece más que inminente (Simelton et al.; 2021). Así lo indica la destacada relevancia que las SCbN, como concepto operativo e incluso estratégico en restauración ambiental, está recabando en otros organismos internacionales de la talla de la Unión Internacional de la Conservación de la Naturaleza (Cohen-Shacham et al., 2016), la FAO (Sunneveld et al., 2018), la Administración Federal Americana (WHCEQ, 2022) o la Asamblea Ambiental de las Naciones Unidas (UNEP/EA, 2022).

La Unión Europea plantea diversas SCbN para la captura de carbono en forma de CO₂, con el fin de fijarlo en los suelos agrícolas. Pese a que este potencial de captura y eliminación de carbono de la atmósfera depende de diversos factores como la topografía, las prácticas de manejo aplicadas antes, el tipo de suelo y sobretodo las condiciones bioclimáticas, según el informe de Ciclos de carbono sostenibles de la UE de 2021 (Bruselas), algunas prácticas de gestión SCbN de los suelos agrícolas de mejorar y fijación de carbono son:

- Cultivos intermedios, de cobertura, laboreo de conservación y protección de los suelos para reducir la erosión, mejorando el carbono orgánico en suelos cultivables degradados.
- Conservación de tierras de cultivo en barbechos.
- Agro-silvicultura y agricultura mixta que mezcle sistemas agrícolas con vegetación leñosa.
- Reforestación encaminada a la mejora de la gestión de los bosques

Sin embargo, en el caso de España, en 2020 la agricultura fue el único sector que experimentó un incremento de las emisiones de GEI debido a la gestión de los suelos agrícolas, en comparación con otros sectores (transporte, industria, etc.) (MITECO, 2022), por lo que estamos aún muy lejos de conseguir los objetivos previstos.

1.1.5. Soluciones Climáticas basadas en la Naturaleza en el olivar andaluz

En Andalucía, el cultivo de olivar ocupa unas 1.6 millones de hectáreas, motor de la vida socio-económica y cultural y responsable del paisaje de numerosos pueblos. Sin embargo, el manejo que predomina en el cultivo de olivar es de tipo convencional que se caracteriza por prácticas de laboreo del suelo, escasa o nula cubierta vegetal, empleo de abono y fertilizantes que en conjunto potencian la pérdida de carbono orgánico a la atmósfera.

No obstante, a escala regional, cualquier cambio de manejo que implique convertir el suelo de olivar de fuente a sumidero de CO₂, acarreará importantes repercusiones ambientales, como se ha comentado con anterioridad. Por ello, algunas de las principales prácticas que pueden implicar una acumulación de carbono orgánico en el suelo son la implantación de

cubierta vegetal, aportación de restos de poda triturados y aplicación de enmiendas orgánicas como el alperujo compostado:

Cubierta vegetal

En un reciente trabajo (Torrús-Castillo, In press), en el que se han considerado 46 olivares representativos de toda la comunidad autonómica andaluza, se concluye que la cubierta vegetal espontánea supone el principal mecanismo de entrada de carbono anual en los suelos de los olivares andaluces, dando cuenta de hasta el 25% de las entradas (en torno a 1.100 kg C / ha). Este mismo trabajo, sin embargo, llama la atención respecto a la significativa variabilidad del tipo de cubierta que el agricultor permite en su olivar, que va desde una mínima franja en torno al centro de las calles, hasta una cobertura completa (incluyendo la proyección bajo copa o “ruedo” del olivo), variando las coberturas totales del 100% a menos del 20%, y la aportación de biomasa seca al suelo desde más de 3.000 hasta menos de 500 kg / ha. Esta variabilidad aconseja ser prudente en cuanto a la consideración del efecto de la cubierta como SCbN, si no se tiene una completa descripción agronómica de la misma.

Aportación de restos de poda

Esta aportación consiste en triturar los restos de poda del olivar en lugar de la quema de los mismos, generando un aporte de materia orgánica y carbono anual. Además, la aplicación de estos restos supone una protección del suelo frente a la erosión (Torrús–Castillo, 2019) y ayuda a mejorar la estructura de los suelos con respecto sus características físico-químicas, en comparación con aquellos cultivos de olivar que mantienen el suelo descubierto (Ordoñez, et al. 2001).

Según Torrús-Castillo et al., (In press), la incorporación de restos de poda en olivares andaluces no llega a aportar tanto carbono al suelo como la cubierta vegetal (valores medios de unos 650 kg C /ha, en torno al 15% del total). A pesar de ello, podría ser un factor decisivo para obtener balances positivos de C, dado el alto nivel de pérdidas de C asociado a la descomposición de la cubierta vegetal.

Enmiendas orgánicas

Las enmiendas orgánicas son productos derivados de residuos tanto de origen vegetal como de origen animal, las cuales contribuyen a aumentar la materia orgánica del suelo y mejorar las propiedades físico-químicas y biológicas de éste (Delgado–Londoño, 2017). El estiércol y el alperujo compostado con las más habituales aportadas en los suelos agrícolas como el del olivar, especialmente este último. Varios estudios han comprobado que la aplicación de alperujo compostado incrementa la materia orgánica en el suelo. Según (Fernández, et al.

2015) tras aplicar durante diez años alperujo compostado (incluso mezclado con estiércol de oveja) se incrementó el contenido final de materia orgánica en un 43% respecto a los valores iniciales. García-Ruiz *et al.* (2012) realizaron un estudio en el que, después de 16 años de aplicar una cantidad anual de entre 4 y 6 t / ha de alperujo compostado en un olivar, el SOC se incrementó en más de 2.500 kg, concluyendo que el uso de este producto podría ser la fuente más eficaz y rápida para almacenar carbono en suelos de olivar. Sin embargo, a pesar de este enorme potencial del alperujo compostado, del que se producen anualmente más de 3 millones y medio de toneladas, la carencia de plantas compostadoras (y otros factores), hace que menos del 1% del alperujo producido en las almazaras sea compostado y empleado con fines agronómicos.

1.2. Justificación del trabajo

Este Trabajo de Fin de Máster se ha desarrollado en el marco del proyecto de investigación “Novel approaches to promote the SUSTainability of OLIVE cultivation in the Mediterranean” (SUSTAINOLIVE), proyecto financiado por el programa PRIMA (H2020), en el que participan investigadores y profesionales de más de 20 instituciones, cooperativas agrarias y empresas oleícolas de 6 países de la cuenca mediterránea (España, Portugal, Italia, Túnez y Marruecos), y bajo el cual la autora ha disfrutado de una beca ICARO por un periodo acumulado de nueve meses, durante los cursos 2021 – 2022 y 2022 – 2023, realizando tareas de muestreo de cubierta en campo, análisis de la cubierta en laboratorio, y la realización de las modelizaciones de Roth Carbon.

El objetivo principal de SUSTAINOLIVE es el desarrollo de SbN en el ámbito del olivar, abordando en sus diversos paquetes de trabajo desde la producción agrícola hasta los procesos industriales de elaboración de aceite y la valoración de subproductos. Una de las tareas fundamentales del proyecto es el estudio de las prácticas de manejo que llevan a un incremento del carbono orgánico total del suelo, lo que podría traducirse como el efecto de la aplicación de Soluciones Climáticas basadas en la Naturaleza en olivares, tarea respecto a la cual este TFM se alinea completamente.

Es importante resaltar, asimismo, que este trabajo se enmarca en el “Convenio de colaboración entre el Consejo Regulador de la Denominación de Origen de Estepa (CRDO Estepa) y la Universidad de Jaén, para el análisis y seguimiento de la cantidad de carbono en los árboles, fertilidad del suelo y huella de carbono en olivares de la DOP Estepa”, siendo además la DOP Estepa uno de los socios españoles de SUSTAINOLIVE. En el marco de este convenio, se ha emprendido la tarea pionera de cuantificar la cantidad total de carbono que, mediante un manejo adecuado del olivar, puede llegar a fijarse en los suelos del municipio de

Estepa. Las implicaciones de este estudio pueden ser importantes, no sólo para el avance del conocimiento científico y técnico, si no desde el punto de vista económico, dado el precio que alcanza la tonelada de CO₂ en el mercado libre de derechos de emisión (89,04 €, febrero 2023). Independientemente del marco normativo y legal en el que estamos implicados de lleno, y en un escenario de pérdida de renta y progresiva reducción de los pagos directos de la PAC, cualquier alternativa viable que permita complementar la retribución de los agricultores merece ser valorada y optimizada, y a esto se dirige el planteamiento de la hipótesis y los objetivos de este trabajo.

1.3. Hipótesis

En este trabajo partimos de la hipótesis de que la aplicación de SCbN tales como cubierta vegetal, restos de poda triturados y enmienda orgánica, incrementará el contenido de carbono orgánico total de los suelos del olivar andaluz, en relación a olivares convencionales en que tales prácticas no se implementan, tanto en escenarios sin cambio climático como escenarios con cambio climático.

2. OBJETIVOS

Dada la hipótesis de partida, el objetivo principal de este trabajo será la aplicación del programa RothCarbon para modelizar la evolución del SOC y la capacidad de secuestro de carbono del suelo a elevada resolución espacial, tomando como referencia 2050 (año de cumplimiento del compromiso de neutralidad climática adoptado por el Pacto Verde Europeo). Para ello, se fijan los siguientes objetivos operativos:

- 1) Definición del marco actual de manejo agrícola del municipio de Estepa.
- 2) Recopilación de información geográfica, climática (incluyendo proyecciones de cambio climático para 2050) y edafológica a partir de las cuales plantear los distintos escenarios para la modelización con Roth Carbon.
- 3) Planteamiento de escenarios bajo los que realizar proyecciones en 2050, no sólo en relación al SOC total, sino también al límite y déficit de saturación de los suelos de Estepa.
- 4) Realización de los modelos y simulaciones para la obtención de mapas de alta resolución espacial.
- 5) Recopilación de resultados y elaboración de la memoria.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. Zona de estudio

El área de estudio circunscribe un área de 130 km², que corresponden al municipio de Estepa, exceptuando un área situada al norte (40 km²) desconectada del cuerpo principal. Cabe destacar que la el área de estudio se ha reducido a la zona marcada en la Figura 3.1.1., en amarillo, puesto que el material empleado con respecto a las coberturas del suelo (aparatado 3.2.) abarcaba tan solo dicha zona, y la posibilidad de clasificar el resto del municipio se salía de la línea de investigación del presente trabajo.

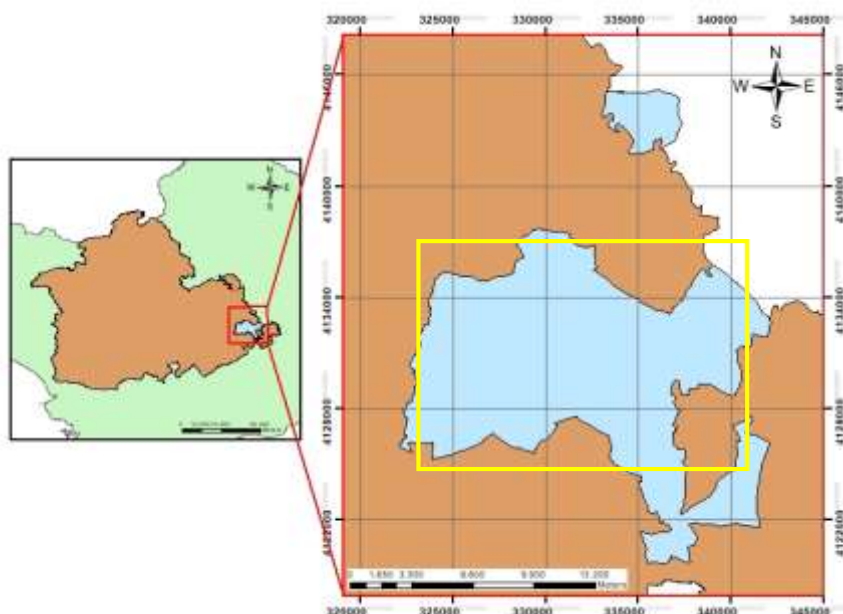


Figura 3.1.1. Localización de la zona de estudio en el municipio de Estepa (Sevilla), focalizando la zona real de trabajo. Fuente: Elaboración propia

3.2. Material empleado

- Softwares: RothC y ArcMap
- Datos experimentales y bibliográficos de aportes de carbono orgánico en forma de residuos vegetales y FYM (estiércol o alperujo)
- Capas ráster de clima correspondiente a precipitación, temperatura y evapotranspiración del periodo de 1972-2000
(<http://descargasrediam.cica.es/repo/s/RUR>)
- Capas ráster de cambio climático de media decenal de precipitación, temperatura y evapotranspiración de los periodos 2011-2040 y 2041-2070 de 75m de resolución (REDIAM)
- Mapas europeos de contenido de arcilla (%), limo (%), densidad aparente (g/cm³) y contenido de carbono orgánico (tC ha⁻¹) (ESDB v2.0, 2004).

- Capas ráster de las coberturas del suelo de Estepa, en la que se realizó a partir de datos de satélite (Sentinel, Pleiades) una clasificación de las unidades de paisaje a elevada resolución espacial (10 m tamaño de pixel) (Rodríguez, 2022)

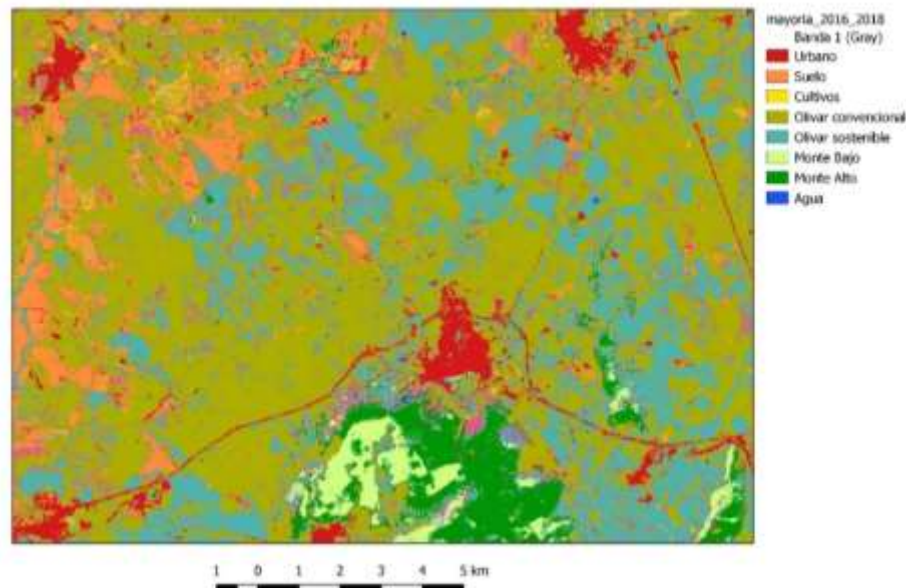


Figura 3.2.1. Mapa de coberturas del suelo en el municipio de Estepa (Sevilla). Fuente: Rodríguez, 2022

3.3. Metodología

3.3.1. Reclasificación coberturas del suelo

Se llevó a cabo un proceso de reclasificación de las coberturas previo a la recopilación de ciertos datos de entrada para el modelo. Recortando el ráster de coberturas de Rodríguez (2022) en función del municipio de Estepa y empleando el software ArcMap se procedió a una reclasificación (*Spatial Analyst Tools > Reclass > Reclassify*) de estos usos del suelo en un número más reducido. Los usos “urbano” y “agua” se eliminaron dado que no presentan interés desde el punto de vista de la retención de carbono. Eliminando el valor 0 para evitar posibles problemas con los datos, y agrupando las coberturas de monte alto y monte bajo en “monte”, y cultivos (la clasificación de Rodríguez entiende “cultivos” como “cultivos herbáceos”) y suelo desnudo o barbecho en “herbáceos”, dado que el área de monte bajo y cultivos es más pequeña.

Posteriormente, dado que los usos del suelo de interés en el presente trabajo son cuatro: olivar sostenible, olivar convencional, herbáceos y monte; se pasó la nueva capa ráster reclasificada a una vectorial (vectorización) (*Conversion Tools > From Raster > Raster to polygon*). Tras lo cual, mediante la herramienta dissolve (*Data management Tools > Generalization > Dissolve*) se agregaron entidades en función de los atributos o clases

especificadas. Es decir, se agruparon en un polígono los diferentes polígonos de un mismo atributo (Figura 3.3.1.1.), quedando como se muestra en la Figura 3.3.1.2.

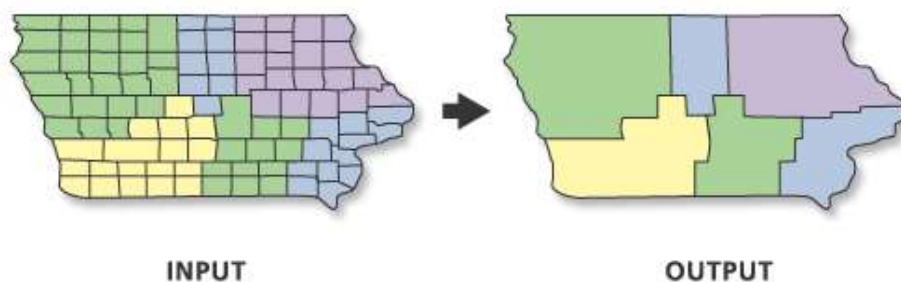


Figura 3.3.1.1. Agregación de entidades en función de atributos por la herramienta Dissolve. Fuente: ArcGIS Web

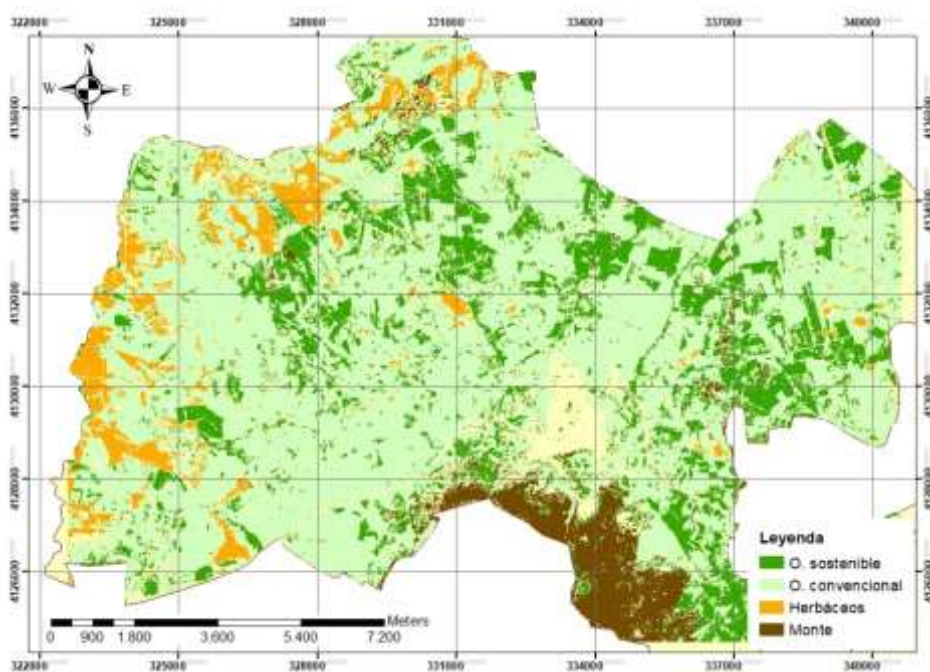


Figura 3.3.1.2. Reclasificación de las coberturas del suelo en olivar convencional, olivar sostenible, herbáceos y monte como las cuatro unidades de paisaje de interés. Fuente: Elaboración propia a partir de la reclasificación de Rodríguez, 2022.

3.3.2. Descripción del modelo RothC

RothCarbon es un modelo que permite predecir la cantidad de carbono orgánico almacenado en el suelo (Coleman y Jenkinson, 1996). Considerando parámetros como la temperatura, el contenido de humedad del suelo, la cubierta vegetal y el tipo de suelo en la renovación del carbono orgánico.

Se desarrolló y parametrizó originalmente para modelar la rotación de C orgánico en suelos cultivables de los experimentos de campo a largo plazo de Rothamsted. Más tarde, se amplió para modelar la rotación en pastizales y bosques y para operar en diferentes suelos y bajo

diferentes climas. Utiliza un periodo de tiempo mensual para calcular el carbono orgánico total (t ha^{-1}), el carbono de la biomasa microbiana (t ha^{-1}) y $\Delta 14\text{C}$ (a partir del cual se puede calcular la edad de radiocarbono equivalente del suelo) en una escala de tiempo de años a siglos.

Las entradas necesarias para el modelo son:

- Valores de precipitación, temperatura y evapotranspiración mensuales
- Contenido de arcilla del suelo (en porcentaje)
- Estimación de la descomposición del material vegetal entrante: DPM/RPM ratio
- Cobertura del suelo (suelo desnudo o cubierto)
- Entrada de residuos vegetales mensuales (tC ha^{-1})
- Aporte mensual de estiércol (si hay) (tC ha^{-1})
- Profundidad de la capa de suelo a muestrear (cm)

3.3.3. Estructura del modelo RothC

El carbono orgánico del suelo se fracciona en una pequeña parte de materia orgánica inerte (IOM) y en cuatro porciones activas que son: la materia vegetal descomponible (DPM), la materia vegetal resistente a la descomposición (RPM), la biomasa microbiana (BIO) y la materia orgánica humificada (HUM).

El carbono vegetal que entra se divide entre DPM y RPM en la relación DPM/RPM. Ambas porciones se descomponen dando lugar a CO_2 , que se pierde a la atmósfera, y se transforma parte de DPM y RPM en BIO y HUM. Éstas, a su vez, se descomponen para formar de nuevo CO_2 , BIO y HUM, lo que se puede observar en la Figura 3.3.3.1.

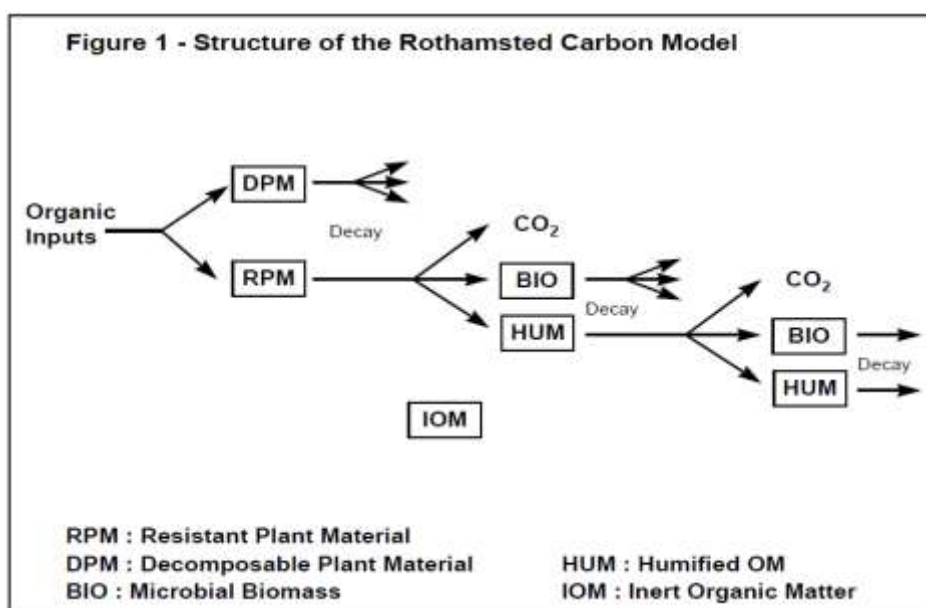


Figura 3.3.3.1. Estructura del modelo RothCarbon. Fuente: Coleman y Jenkinson, 1996.

3.3.4. Entradas necesarias para el modelo

3.3.4.1. Datos de clima y cambio climático

En este caso, se consideraron valores medios mensuales de precipitación, temperatura y evapotranspiración. La obtención de dichos valores se llevó a cabo empleando las capas ráster de clima del periodo 1971-2000 (REDIAM) y la reclasificación vectorizada del apartado 3.3.1., mediante la herramienta de “Estadística zonal” del software QGIS se recabaron las medias de los parámetros ETP, P y T°.

De igual modo, se obtuvieron valores de cambio climático empleando capas ráster de la media decenal de los periodos 2011-2040 y 2041-2070 de 75m de resolución. Cada mes contaba con tres capas ráster, correspondiendo la primera capa a valores medios del día 1 al 10 del mes, la segunda del día 11 al 20 y la tercera del día 21 al 28, 29, 30 o 31 (REDIAM).

Al constar de tres capas por mes, se sumaron para obtener una sola capa en el caso de la evapotranspiración y la precipitación, mientras que en el caso de la temperatura se sumaron y dividieron entre tres, para obtener el valor medio del mes correspondiente. Lo cual se realizó para los dos periodos. Seguidamente, se procedió a sacar una media ponderada de los meses teniendo en cuenta que el periodo de tiempo que se considera en este trabajo es desde 2020 a 2050.

Los datos presentes en estas capas ráster se obtuvieron mediante la combinación de diferentes modelos de circulación general de la atmósfera (CGCM2 (canadiense) y ECHAM4 (alemán)) y diferentes escenarios de emisiones, A2 y B2. La información se ofrece a escala decenal (3 capas por mes) correspondiendo cada capa de información a la media de los valores obtenidos mediante los diferentes modelos (REDIAM).

Según el cuarto informe especial del IPCC sobre escenarios de emisiones (IPCC, 2007), en el que se basan los datos del REDIAM empleados, el escenario A2 es heterogéneo, caracterizándose por un crecimiento continuo de la población mundial y un desarrollo económico orientado a las regiones. Mientras que el escenario B2, la población aumenta de manera más lenta que el escenario A2, predominando una protección por el medio ambiente.

Si bien, estos escenarios de cambio climático, A2 y B2, pese a ser escenarios antiguos tienen su equivalente en los escenarios RCP, que se utilizaron en la quinta evaluación más reciente del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). Para el escenario B2, su equivalente en los escenarios RCP sería el RCP6.0 en el que las emisiones se estabilizan, mientras que el escenario A2 se encuentra por debajo del escenario RCP8.5, pero podría

interpretarse como su equivalente, es decir, un escenario en el que las emisiones siguen en aumento y la temperatura incrementa (Figura 3.3.4.1.1.).

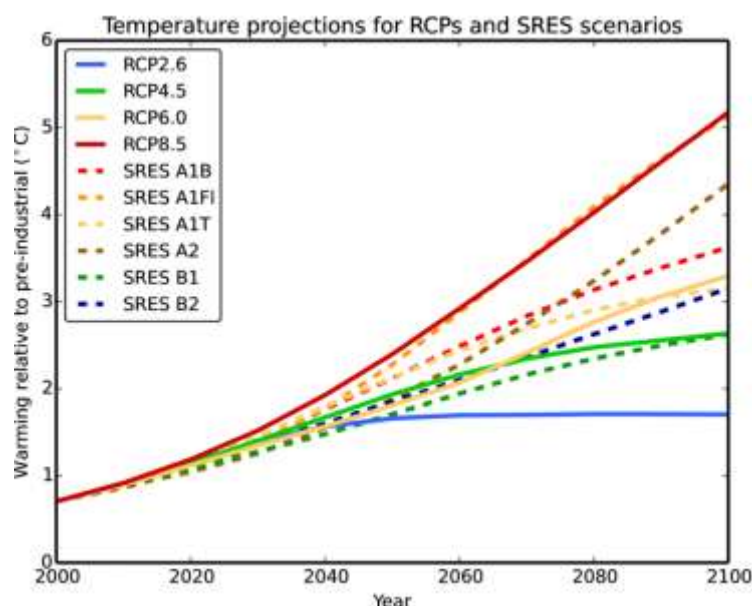


Figura 3.3.4.1.1. Proyecciones de la temperatura media mundial para los escenarios RCP2.6 (azul), RCP4.5 (verde), RCP6.0 (amarillo) y RCP8.5 (rojo) y los escenarios SRES más antiguos (líneas de color discontinuas). Fuente: UKCP18 Guidance: Representative Concentration Pathways 2018.

3.3.4.2. Porcentaje de arcilla

Se han considerado valores medio de arcilla para las diferentes unidades de suelo a partir del mapa europeo de contenido de arcilla (ESDB v2.0, 2004). El cual se proyectó (*Data Management Tools > Projections and Transformations > Raster > Project Raster*) al sistema de coordenadas de referencia (ETRS_1989_UTM_Zona_30N), se recortó el función del área de estudio y mediante una estadística de la zona (estadísticas zonales con QGIS) se obtuvieron valores medios del porcentaje de arcilla: 34% olivar sostenible, 33% olivar convencional, 30% monte y 35% herbáceos.

3.3.4.3. Entrada de residuos vegetales y FYM mensuales

La aportación de carbono orgánico de los residuos vegetales (cubierta vegetal, poda triturada y enmienda orgánica) ha sido diferente para los cuatro usos del suelo. En el caso del olivar convencional y olivar sostenible se han empleado valores experimentales obtenidos de seis parcelas de cada tipo, doce en total, del municipio de Estepa (datos del proyecto SUSTAINOLIVE, inéditos). En olivar sostenible se consideraron los aportes de hoja de olivo que se cae durante todo el año (tC ha^{-1}), restos de poda (tC ha^{-1}) aplicados en el mes de febrero y la cubierta vegetal (tC ha^{-1}) en el mes de abril. Mientras que en olivar convencional se consideraron los mismos aportes a excepción de la cubierta vegetal en el mes de abril, tan solo la hoja de olivo y los restos de poda (Tabla 3.3.4.3.1.).

Tabla 3.3.4.3.1. Aportes de residuos vegetales en tC ha⁻¹ (hojas de olivo, restos de poda y cubierta vegetal) para las unidades de RothC de olivar sostenible y olivar convencional.

Meses	Hojas de olivo (tC ha ⁻¹)	Restos de poda (tC ha ⁻¹)	Cubierta vegetal (tC ha ⁻¹)	
Ene	0,089	0	0	
Feb	0,089	0,493	0	OS/OC
Mar	0,089	0	0	
Abr	0,085	0	0,552	OS
May	0,085	0	0	
Jun	0,085	0	0	
Jul	0,024	0	0	
Agos	0,024	0	0	
Sep	0,024	0	0	
Oct	0,038	0	0	
Nov	0,038	0	0	
Dec	0,038	0	0	
Total	0,7062			

Por último, en cuanto a herbáceos y monte al no constar de resultados de los aportes que recibe en realidad obtenidos mediante un estudio experimental como en caso del olivar, se realizó una búsqueda bibliográfica de estudios que se hubiesen llevado a cabo en la misma tipología de bosque y cultivo o en zonas de clima mediterráneo. Por lo tanto, se consideró un aporte de 3,68 y 3,74 tC ha⁻¹, respectivamente (Francaviglia, *et al.* 2012). En el caso de herbáceos, se dividió entre los meses de mayo, junio y julio, aportando unos 1,227 tC ha⁻¹ cada mes. Mientras que para monte se dividió entre los doce meses, aportando unas 0,312 tC ha⁻¹.

3.3.4.4. Descomposición del material vegetal entrante: DPM/RPM ratio

El modelo RothC divide el stock de carbono orgánico del suelo en 5 grupos, como se ha comentado con anterioridad, siendo materia orgánica inerte (IOM), material vegetal fácilmente descomponible (DPM), material vegetal resistente (RPM), biomasa microbiana (BIO) y materia orgánica humificada (HUM). La distribución del carbono en estas fracciones depende del valor de SOC y del contenido de arcilla del suelo.

Las fracciones de RPM, BIO, HUM e IOM se determinan empleando las fórmulas siguientes. Mientras que la fracción de DPM se calcula como la diferencia entre el SOC inicial y la suma de los resultados de las ecuaciones correspondientes a IOM y BIO (Morais, 2019).

$$IOM = 0.049 \cdot SOC^{1.139},$$

$$RPM = (0.1847 \cdot SOC + 0.1555) \times (Clay + 1.2750)^{-0.1158}$$

$$HUM = (0.7148 \cdot SOC + 0.5069) \times (Clay + 0.3421)^{0.0184}$$

$$BIO = (0.0140 \cdot SOC + 0.0075) \times (Clay + 8.8473)^{0.0567}$$

El modelo emplea, para la mayoría de los cultivos agrícolas y pastizales mejorados, una relación DPM/RPM de 1,44 y para pastizales y matorrales no mejorados una relación de 0,67. Por ello, dichos valores se han tenido en cuenta para los usos del suelo de herbáceos y monte, respectivamente. Ya que la zona de monte de Estepa (dentro del límite del municipio) está compuesta de algunas zonas de bosque pero en su mayoría de matorrales y pastizales.

En cuanto al olivar convencional y olivar sostenible, el ratio DPM/RPM de cada tipo se ha obtenido a partir de una media ponderada de la cantidad de los diferentes residuos vegetales aportados en cada caso, empleando los DPM/RPM de cada tipo de residuo (restos de cubierta, poda picada y enmienda orgánica) obtenidos en un experimento de laboratorio (datos SUSTAINOLIVE, inéditos). El valor final de DPM/RPM obtenidos fueron 0,1189 y 0,1188 para olivar sostenible y olivar convencional, respectivamente.

3.3.5. Creación de los archivos weather y land management

Para rodar el modelo RothC, se necesita crear ambos archivos para cada uno de los usos del suelo (olivar sostenible, convencional, herbáceos y monte). Introduciendo en el archivo weather los datos de entrada correspondientes al clima o cambio climático (temperatura, precipitación y evapotranspiración), el porcentaje de arcilla y la profundidad del suelo, la cual se consideró 20 cm. Mientras que para el archivo de land management se consideraron los aportes de residuos vegetales, aportes de carbono en forma de estiércol y la cubierta del suelo (con o sin cubierta) (Figura 3.3.5.1.).

Si bien, los datos que se introdujeron en los archivos correspondientes de las diferentes unidades de RothC se recogen en el Anexo del presente trabajo.

The screenshot shows the RothC model interface with two data entry windows. The left window is titled 'Create new weather data file' and the right window is titled 'Create new land management file'. Both windows have a 'Save as...' field and a 'Cancel' button.

Left Window: Create new weather data file

Description	Temperature (°C) [range]	Rainfall (mm) [range]	Evaporation (mm) [range]
January	10.9	17.0	6.3
February	11.3	9.0	7.2
March	14.6	10.5	13.5
April	17.6	8.0	21.3
May	20.5	6.5	32.3
June	24.1	5.4	45.3
July	27.7	3.3	61.5
August	28.4	2.7	68.8
September	25.5	2.6	42.9
October	20.1	7.1	24.8
November	14.9	13.8	11.7
December	11.9	17.6	7.4
Clay % [range]	34	Depth (cm) [range]	20

Right Window: Create new land management file

Description	Plant Residue (t C/ha) [range]	FYM (t C/ha) [range]	Soil cover
January	0	0	Fallow
February	0.543	0	Covered
March	0.543	0	Covered
April	0.100	0	Covered
May	0.100	0	Covered
June	0.100	0	Covered
July	0	0	Fallow
August	0	0	Fallow
September	0	0	Fallow
October	0	11.225	Fallow
November	0	0	Fallow
December	0	0	Fallow

Figura 3.3.5.1. Interfaces para weather y land management del olivar sostenible en el que se introducen los datos de entrada.

3.3.6. Modelo “Knowing total carbon”

Este modelo se basa en calcular el carbono entrante en forma de residuos vegetales (t C ha^{-1}) conociendo el carbono total del suelo. Se emplea para conocer los aportes de carbono que se deben aplicar para que el carbono orgánico del suelo no cambie.

Las entradas (1, 2 y 3) y salidas (4, 5 y 6) de modelo *Knowing total carbon* pueden verse en la Figura 3.3.6.1.

- Archivos de weather y land management creados para los diferentes usos del suelo.
- Contenido total de carbono obtenido del mapa europeo para las diferentes unidades consideradas en el modelo
- Valor de la relación DPM/RPM considerado para las cuatro unidades de interés, además del año en el que se tomó la muestra de suelo. En este caso se ha partido del año 2020.
- Se muestran el carbono total modelado (t C ha^{-1}), el carbono de biomasa (t C ha^{-1}) y el radiocarbono.
- Se calculan las entradas de residuos vegetales mensuales necesarias para que el carbono orgánico del suelo no cambie.
- El IOM (materia orgánica inerte) se determina a partir de la ecuación de Fallon et al. (1998): $0.049 \cdot \text{TOC}^{**1.139}$

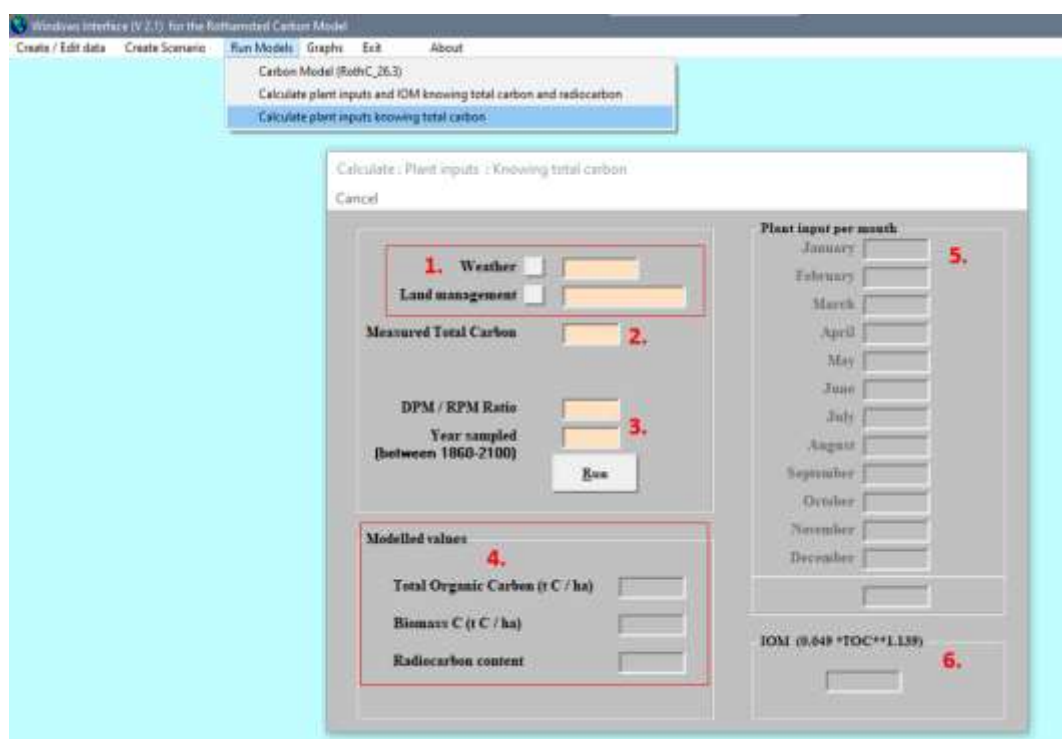


Figura 3.3.6.1. Interface del modelo que determina el carbono entrante en forma de residuos vegetales (t C/ha) conociendo el carbono total del suelo.

Para el caso de cada uno de los usos del suelo se obtuvieron aportes diferentes de carbono en forma de residuos vegetales, por lo que se crearon nuevos archivos land management con dichos aportes para su uso posterior (Anexo).

3.3.7. Escenarios

Se han planteado cuatro escenarios en los que se analiza el contenido de carbono orgánico del suelo para el año 2050. De manera que son:

- Escenario 1: Carbono orgánico del suelo en 2050.
- Escenario 2: Carbono orgánico del suelo en 2050 considerando los escenarios de cambio climático.
- Escenario 3: Carbono orgánico del suelo contando con un cambio de manejo para 2050. En este escenario se plantea un cambio en el olivar convencional a un manejo más sostenible, en el que se tienen en cuenta un aporte de alperujo compostado además de los restos de poda y la cubierta vegetal. También se consideran los datos climáticos iniciales.
- Escenario 4: Carbono orgánico del suelo con un cambio de manejo (los mismos aportes que el escenario 3) para 2050 y con los escenarios de cambio climático.

Asimismo, RothC permite realizar un modelo en equilibrio o a corto plazo (*short term*), y en el caso de este trabajo se han realizado ambos para cada uno de los usos del suelo. El modelo de interés es el que se rueda a corto plazo, dado que permite fijar el escenario buscado de SOC en el año 2050 (el periodo de 30 años, desde la actualidad -2020- a 2050, es a “corto plazo” comparado con el modelo de equilibrio que considera un periodo de 10.000 años para garantizar el estado estable de SOC, bajo unas mismas condiciones biofísicas).

Las entradas necesarias para el escenario de RothC son los archivos de Weather y Land management, el valor de la relación DPM/RPM, el valor de IOM y especificar si el escenario es en equilibrio o a corto plazo. Si bien, si el modelo se ejecutará a corto plazo, también deberá especificar el año de inicio, la cantidad de años en que se ejecutará el modelo, la cantidad de años en los que desea obtener una producción mensual y los valores iniciales de carbono y radiocarbon del suelo.

Primero se rodó el modelo en equilibrio considerando los aportes de carbono en forma de residuos vegetales obtenidos en el modelo *Knowing total carbon* para que el valor del carbono orgánico del suelo no varíe en el tiempo, consiguiendo como resultados el carbono del suelo para las diferentes fracciones activas (DPM, RPM, BIO y HUM), al final del año y que el carbono orgánico del suelo se mantenga en un valor constante. Posteriormente, se rodó escenario a corto plazo empleando el archivo de land management con los aportes de

residuos vegetales del muestreo, indicando el año 2020 como año de inicio y 31 años en los que ejecutar el modelo, además de los valores de carbono de las fracciones activas obtenidos al rodar el escenario en equilibrio. Finalmente, al rodar el modelo a corto plazo se determinó el carbono orgánico del suelo a lo largo de los años establecidos y se obtuvo una estimación de la cantidad de carbono para el año 2050.

3.3.9. Cálculo del límite de saturación y déficit de saturación de carbono

La saturación de carbono en el suelo se refiere a que éste alcanza su límite o capacidad máxima para almacenar carbono orgánico (Six *et al.* 2002). Dado que el carbono se almacena físicamente en las fracciones finas de limo y arcilla quedando protegido de los procesos de descomposición, se ha determinado el límite de saturación de carbono orgánico para los cuatro usos del suelo empleando los valores (en porcentaje) de arcilla obtenidos con anterioridad y los de limo, obtenidos mediante el mismo procedimiento

Se empleó la fórmula (1) para calcular el límite de saturación, en la cual 'x' corresponde a la suma de los porcentajes de limo y arcilla, 'a' slope y 'b' intercept. Los valores de saturación obtenidos en g C/kg de suelo en tanto por 1 se pasaron a porcentaje. De la Tabla 3.3.9.1., se consideró la clase de tamaño de los agregados de 0-20 μm , empleando los valores de *cultivated* para el olivar convencional y sostenible, *grassland* para herbáceos y *forest* para monte.

$$\text{Límite de saturación (protective capacity)} y = ax + b \quad (1)$$

Tabla 3.3.9.1. Ecuaciones de regresión que relacionan la proporción de limo más arcilla con el C asociado de limo y arcilla. Fuente: Six *et al.* 2002

Table 1. Regression equations relating silt plus clay proportion to silt and clay associated C

Size class ^a	Ecosystem	Intercept	Slope	r ²
0–20 μm	Cultivated	4.38±0.68 ^b	0.26±0.01	0.41
	Grassland	2.21±1.94	0.42±0.08	0.44
	Forest	–2.51±0.55	0.63±0.01	0.55
0–50 μm	Cultivated	7.18±3.04	0.2±0.04	0.54
	Grassland	16.33±4.69	0.32±0.07	0.35
	Forest	16.24±6.01	0.24±0.08	0.35
Size class	Clay type	Intercept	Slope	r ²
0–20 μm	1:1	1.22±0.37	0.30±0.01	0.74
	2:1	3.86±0.49	0.41±0.01	0.39
0–50 μm	1:1	5.5±5.93	0.26±0.13	0.38
	2:1	14.76±2.37	0.21±0.03	0.07

^aTwo size classes for silt and clay were reported in the literature.

^bValue±95% confidence interval.

Tabla 3.3.9.2. Cálculo del límite de saturación de carbono del suelo en porcentaje y en tanto por 1, para los diferentes usos del suelo.

	Arcilla (%)	Limo (%)	Suma de %	a	b	Límite saturación (%)	Límite saturación (tanto por 1)
Herbáceos	35	42	77	0,42	2,21	34,55	3,455
Monte	33	42	75	0,63	-2,51	44,74	4,474
O. sostenible	34	41	75	0,26	4,38	23,88	2,388
O. convencional	33	43	76	0,26	4,38	24,14	2,414

Posteriormente, se calculó el peso total de suelo por ha para cada uno de los usos del suelo, mediante el producto de la densidad aparente y el volumen del suelo. El % del límite de saturación (*protective capacity*), anteriormente calculado (Tabla 3.3.9.2.), se dividió entre 100 y se multiplicó por el peso t suelo/ha, obteniendo dicho límite en tC/ha. Asimismo, empleando la siguiente fórmula se determinó el déficit de saturación de carbono en porcentaje, el cual representa el carbono orgánico que falta para que el suelo llegue a estar saturado de carbono. Cuanto más próximo a 1 (100%) más déficit tiene el suelo, mientras que más próximo a 0 más saturado en carbono se encuentra el suelo.

El carbono orgánico en las fracciones físico-químicas protegidas se consideró el valor de HUM (humus) e IOM (materia orgánica inerte) de los diferentes usos del suelo, que se obtuvieron en el escenario de equilibrio (Tabla 3.3.9.3.). Se calculó un factor por el que se multiplicó el valor actual de carbono en el suelo, obteniendo el valor de carbono en las fracciones protegidas. Finalmente, con la fórmula (2) se lograron los valores de déficit de carbono protegido que se exponen en el siguiente apartado de resultados.

Tabla 3.3.9.3. Determinación del carbono orgánico en las fracciones físico-químicas protegidas del suelo.

En equilibrio	UNIDADES			
	OS	OC	MONT	HERB
HUM	25,5687	24,1498	45,6361	24,4073
IOM	2,9949	2,8203	5,6102	2,5113
Fracciones fis-quim. Protegidas	28,5636	26,9701	51,2463	26,9186
Total	36,9927	35,0923	64,1973	31,7013
Total/HUM	0,69118231	0,68817946	0,71087258	0,7699148
Total/IOM	0,08095922	0,08036806	0,08738997	0,07921757
Factor	0,772	0,769	0,798	0,849

$$\text{Déficit de Saturación} = 1 - \left(\frac{\text{C. O. en las fracciones físico - químicas protegidas}}{\text{protective capacity}} \right) \quad (2)$$

3.3.10. Elaboración de mapas

Con el fin de exponer resultados un poco más gráficos, se ha llevado a cabo mediante el uso del software ArcMap. Tanto para los mapas correspondientes al contenido de carbono orgánico del suelo en 2050 con y sin cambio climático como para los mapas de contenido de carbono considerando un cambio de manejo (con y sin cambio climático), se calculó un factor para cada uno de los usos del suelo, siendo la relación entre el promedio del carbono orgánico de 2050, que se obtiene en la simulación en RothC, y el valor de 2020 obtenido del mapa europeo en tC ha⁻¹ (Figura 3.3.10.1.).

$$F_x = \frac{TOC_{2050}}{TOC_{2020}}$$

Tabla 3.3.10.1. Valores del factor correspondiente a los diferentes usos del suelo para 2050 con y sin cambio climático y considerando el cambio de manejo, para la elaboración de los mapas gráficos.

UNIDADES ROTH C	Sin cambio de manejo		Cambio de manejo	
	Factor 2050	Factor 2050 CC	Factor 2050	Factor 2050 CC
Olivar sostenible	0,928	0,933	1,038	1,046
Olivar convencional	0,475	0,420	-	-
Herbáceos	1,088	1,081	1,088	1,081
Monte	0,980	1,007	0,980	1,007

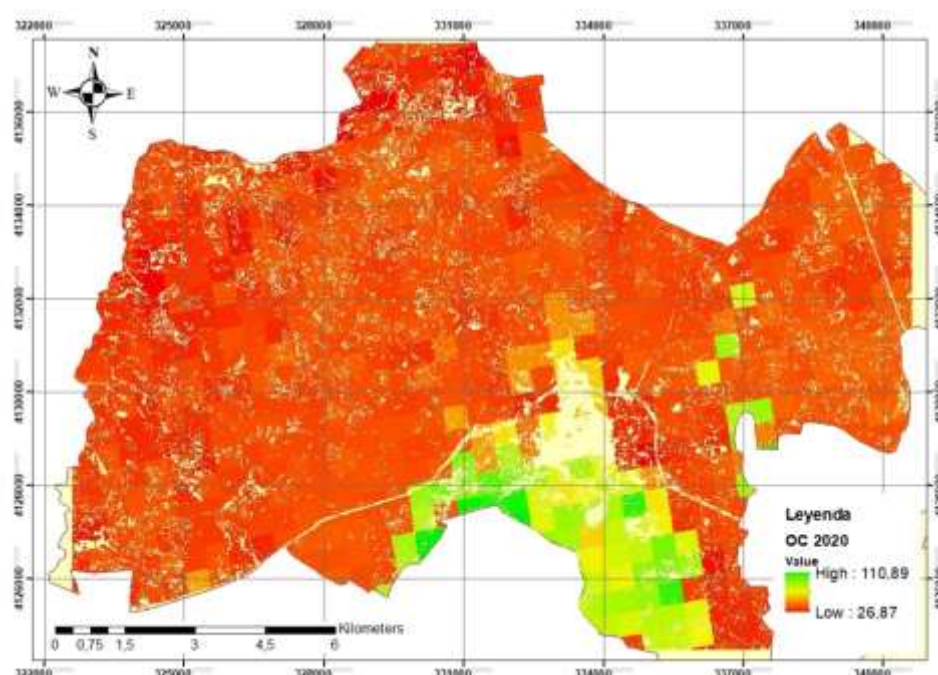


Figura 3.3.10.1. Mapa de contenido de carbono orgánico en el suelo en 2020 del que se han sacado los valores de SOC de referencia. Fuente: Elaboración propia a partir del mapa europeo de contenido de carbono orgánico.

Posteriormente, para obtener resultados más gráficos se empleó la calculadora ráster (*Spatial Analyst Tools > Map Algebra > Raster Calculator*) de ArcGIS para multiplicar el factor de cada

a uno de los usos del suelo con su correspondiente capa ráster del contenido de carbono orgánico. Obteniendo una nueva capa ráster cuyo valor de carbono orgánico es el obtenido en la simulación de RothC. Tras esto se procedió a unificar las cuatro nuevas capas en un solo mapa mediante un mosaico (*Data Management Tools > Raster > Raster Dataset > Mosaic to New Raster*). Finalmente, se obtiene el mapa predictivo del contenido de carbono orgánico unificado.

En cuanto a los mapas de límite de saturación y déficit de saturación de carbono se realizaron empleando únicamente la calculadora ráster del software. Se sumaron las capas de limo y arcilla correspondiente a cada uno de los usos del suelo. Posteriormente, se empleó la fórmula (1) del límite de saturación (Six *et al.* 2002) en la calculadora ráster, sustituyendo la x por la nueva capa (suma de limo y arcilla) y los valores de a y b que se recogen en la Tabla 3.3.9.2. Obteniendo cuatro capas ráster de límite de saturación para cada uso del suelo. Ésta se dividió entre 100 y se multiplicó por 2500 (peso t suelo/ha), pasando las cuatro capas de límite de saturación a tC ha⁻¹.

Finalmente, se empleó la fórmula (2) en la calculadora ráster, siendo el valor de carbono orgánico de las fracciones físico-químicas protegidas el correspondiente a cada uso del suelo y *protective capacity*, la capa del límite de saturación en tC ha⁻¹. Multiplicándose por 100 para expresarlo en porcentaje.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Carbono orgánico del suelo en 2050, ante un escenario sin y con cambio climático

La tabla 4.1.1 muestra los cambios en el contenido promedio en carbono orgánico del suelo para las distintas unidades de uso de territorio sin y con un escenario de cambio climático, y las Figuras 4.1.1 y 4.1.2 muestran la distribución espacial de la cantidad de carbono orgánico en los suelos en el espacio controlado por la DOP Estepa, sin y con las predicciones de cambios en las temperaturas y precipitaciones promedios mensuales derivadas del cambio climático más probable, respectivamente.

Tabla 4.1.1. Carbono orgánico en el suelo (tC ha⁻¹) correspondiente a cada uno de los usos del suelo (herbáceos, monte, olivar sostenible y olivar convencional) para los años 2020 (referencia) y 2050, y 2050 considerando el cambio climático.

UNIDADES ROTH C	2020	2050	2050 cambio climático
Olivar sostenible	37,1	34,4	34,6
Olivar convencional	35,1	16,7	14,7
Herbáceos	31,7	34,5	34,3
Monte	64,2	62,9	64,6

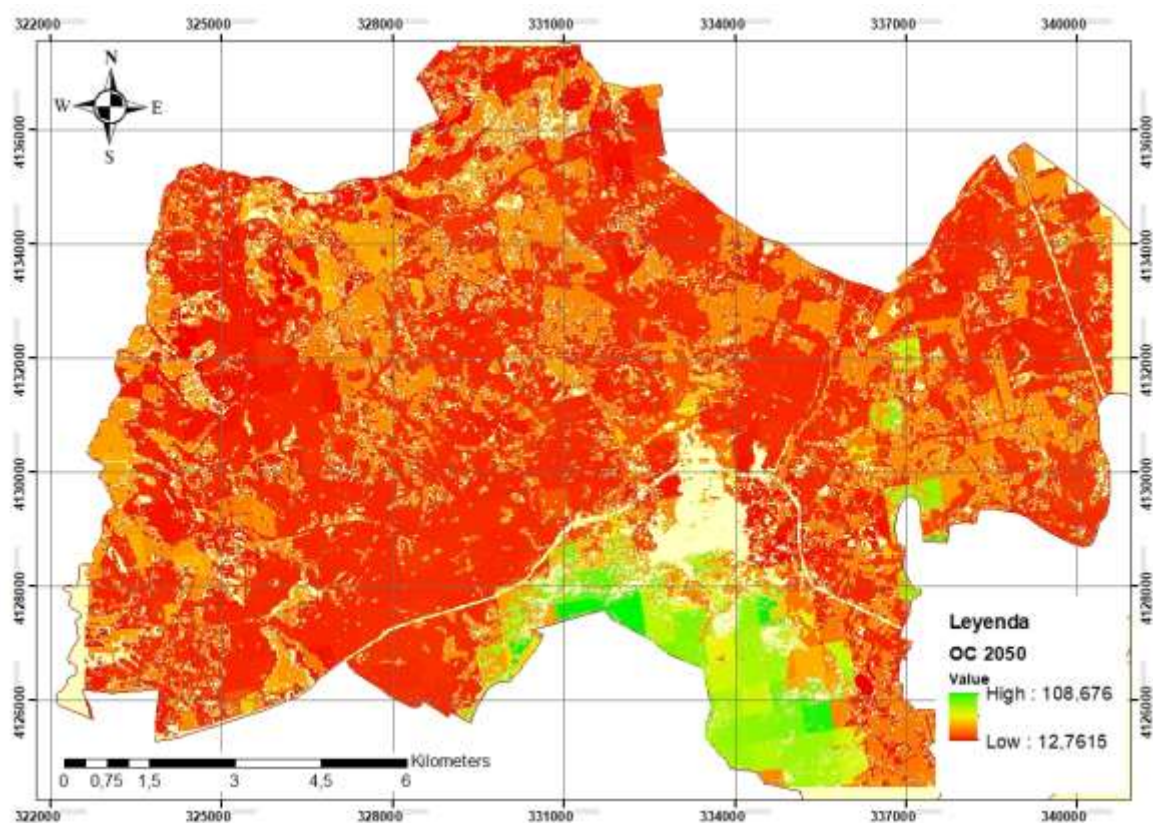


Figura 4.1.1. Distribución espacial de la cantidad prevista de carbono orgánico en el suelo para 2050 sin cambio climático, en el municipio de Estepa (Sevilla)

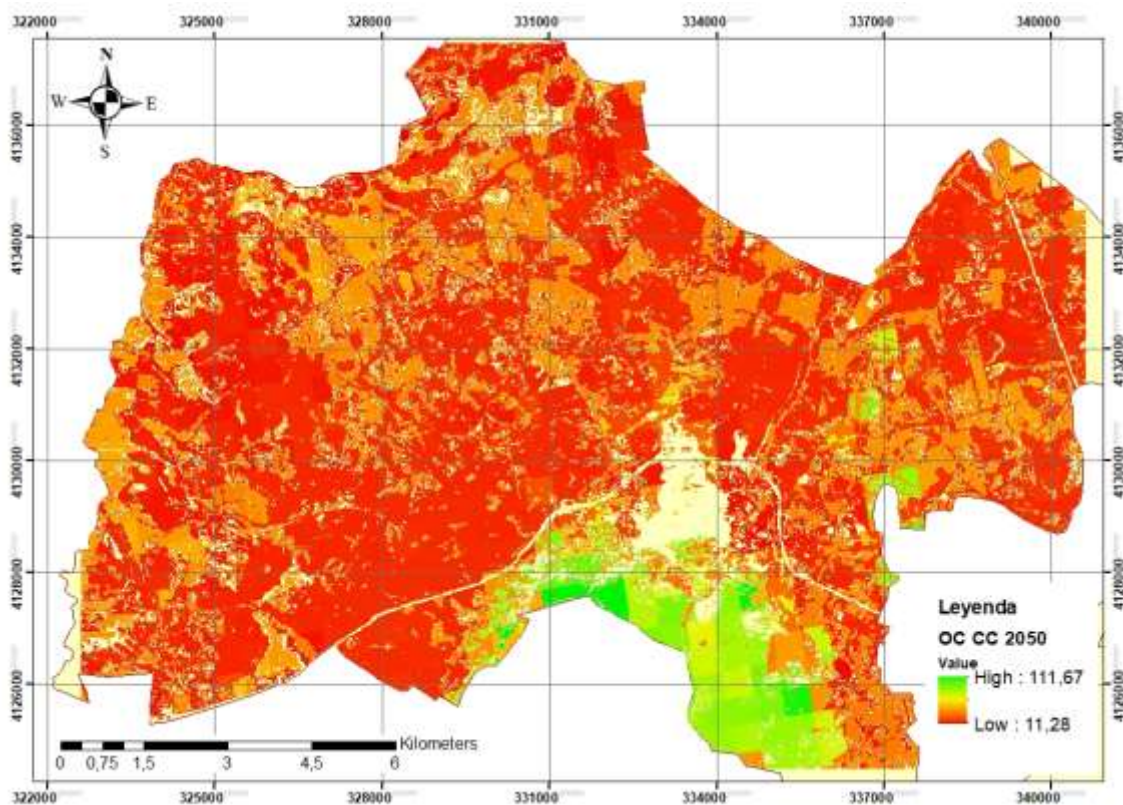


Figura 4.1.2. Distribución espacial de la cantidad prevista de carbono orgánico en el suelo para 2050 con cambio climático, en el municipio de Estepa (Sevilla)

Como era de esperar, la cantidad de carbono orgánico en los ecosistemas forestales (monte en este estudio) naturales o seminaturales fue de casi el doble que en los otros usos del suelo (tabla 4.1.1), debido, principalmente, a que estos ecosistemas no están sometidos a prácticas agrícolas que potencian la pérdida de carbono (por ejemplo, erosión) y sobre los que continuamente entran carbono en el suelo con la hojarasca. Los suelos de los olivares con un manejo sostenible (principalmente implementación de la cubierta vegetal) muestran, en promedio, una cantidad de carbono orgánico en el suelo de 2 toneladas más. Sin duda, la entrada de carbono orgánico al suelo tras el triturado de los restos de cubierta vegetal, junto con las menores tasas de pérdida de suelo, y por tanto carbono orgánico, por erosión, contribuyen a incrementar el almacén de carbono orgánico en el suelo. En los usos del suelo de monte y de cereales (herbáceas) la cantidad de carbono orgánico en el suelo apenas cambia (caso del monte) o se incrementa ligeramente (caso de los cereales) para el 2050. Sin embargo, para el caso del olivar convencional la cantidad de carbono orgánico prevista para el 2050 desciende hasta el 53% de la estimada para el 2021. Este resultado pone de manifiesto que el olivar de manejo convencional de la DOP Estepa es una fuente neta de CO₂ hacia la atmósfera y, por tanto, no está bien alineados con la estrategia de descarbonización del sector agrícolas de la UE.

Antes el escenario más probable de cambio climático, la cantidad de carbono orgánico en el suelo de los cultivos de cereales y del monte se mantienen similar al esperado sin cambio climático, mientras que para el caso de los olivares, la reducción del carbono orgánico en el suelo se exagera. Por tanto, el incremento en la temperatura promedio mensual y la ligera reducción de la precipitación promedio anual provocarán un aumento en la emisión de CO₂ por respiración del suelo.

Atendiendo a estos resultados, puede apreciarse de forma más gráfica la pérdida de carbono orgánico en el suelo comparando el mapa de carbono orgánico en 2020 (Figura 3.3.10.1.) con los mapas de carbono orgánico en 2050 sin y con cambio climático (Figuras 4.1.1. y 4.1.2., respectivamente), en los que se puede ver como las zonas que toman tonalidades más anaranjadas en 2050 corresponden a zonas de herbáceos (parte oeste-noroeste del mapa). También, cómo la mayor parte de la superficie del mapa, que pertenece a cultivo de olivar convencional, pasa a tonalidades más rojas debido a la pérdida de carbono orgánico. Incluso en la parte sur del mapa, cerca del hueco del núcleo urbano de Estepa se pasa a tener algunas tonalidades naranjas por la presencia de cultivos de olivar convencional en esa zona. En cuanto al olivar sostenible, puede parecer en ambos mapas que gana carbono orgánico al presentar tonalidades en naranja, sin embargo, se debe al reajuste de la escala de color del

mapa. Presentando tonos similares a herbáceos al contar con valores parecidos de SOC en 2050 sin y con escenarios de cambio climático.

Ante esto, en el conjunto de la DOP de Estepa se pierde 0,17 millones de toneladas de carbono orgánico del suelo para 2050 con respecto a 2020 (que contaba con 0,49 millones de toneladas de carbono orgánico), y teniendo en cuenta el efecto de los escenarios de cambio climático pierde 0,19 millones de toneladas de SOC.

4.2. Cambio de manejo para 2050 sin y con cambio climático

El cambio en el manejo incluye que todo el olivar de la DOP permite la presencia de la cubierta vegetal y que todo el alperujo que se produce durante la extracción del aceite de oliva se composta y se reparte en las hectáreas de terreno dedicado al olivar.

Como se recoge en la Tabla 4.2.1., los valores pertenecientes a cereales y monte son los mismos que en el caso anterior, ya que los cambios de manejo sólo atañen al cultivo del olivo. En un escenario de cambio de manejo que implica un aumento en las entradas de carbono orgánico en el suelo derivado de los restos de poda en febrero, y de cubierta vegetal en abril, y la aplicación de alperujo compostado en octubre, en 2050 hubo un incremento promedio de la cantidad de carbono orgánico de unas 1,3 tC ha⁻¹ en comparación con 2020. Incluso contando con los efectos del cambio climático, ya que ante este escenario la cantidad de carbono orgánico prevista sería de 37,1 tC ha⁻¹. Comparando estos resultados con los comentados en el apartado anterior, el aporte de alperujo compostado reduce la pérdida de carbono orgánico del suelo en aproximadamente una tonelada de carbono orgánico.

En este caso, la DOP Estepa contaría con 0,51 millones de toneladas de carbono orgánico en el suelo en todo su conjunto para 2050, incluso considerando el efecto de los escenarios de cambio climático.

Tabla 4.2.1. Carbono orgánico en el suelo (tC ha⁻¹) correspondiente a cada una de los usos del suelo considerando un cambio de manejo de convencional a sostenible en el olivar, para los años 2020 (referencia) y 2050, y 2050 teniendo en cuenta el cambio climático

UNIDADES ROTH C	2020	Cambio de manejo en olivar	
		2050	2050 CC
Olivar	35,5	36,8	37,1
Herbáceos	31,7	34,5	34,3
Monte	64,2	62,9	64,6

Comparando las Figuras 4.2.1., y 4.2.2., con el mapa de contenido de carbono orgánico de 2020 (Figura 3.3.10.1.) no se aprecian diferencias en gran parte porque el contenido de carbono orgánico en el suelo ha aumentado.

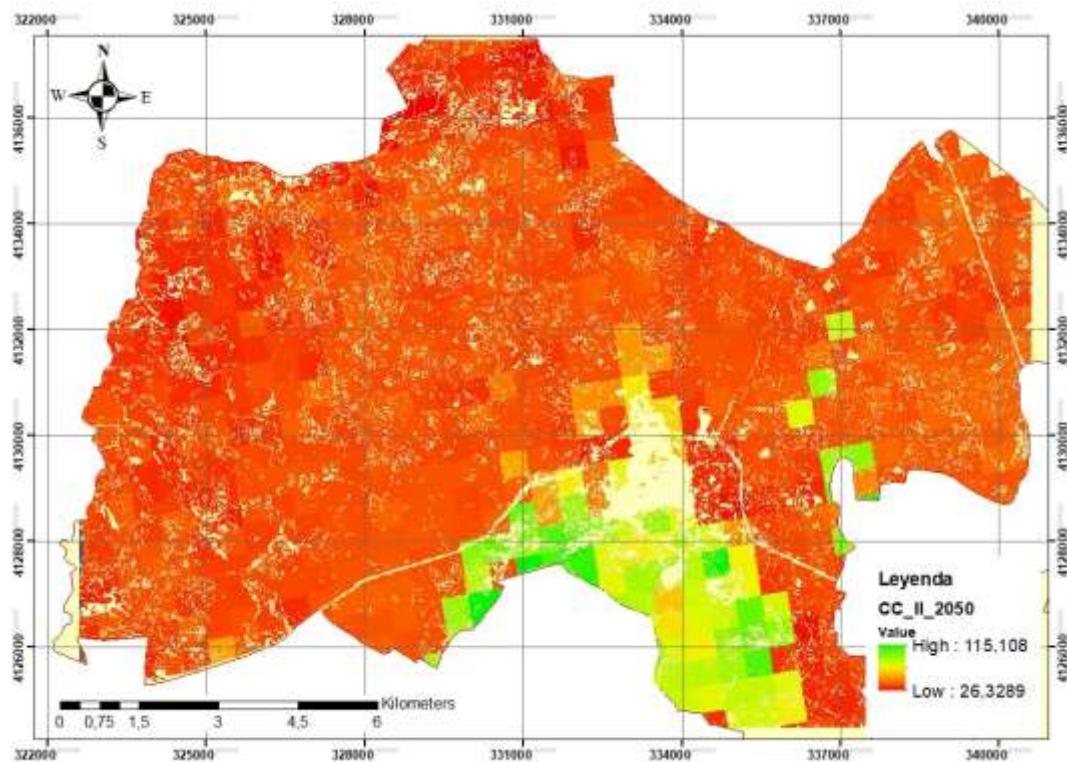


Figura 4.2.1. Mapa predictivo del contenido de carbono orgánico en el suelo para 2050 sin cambio climático y considerando un cambio de manejo convencional a uno más sostenible, en el municipio de Estepa (Sevilla). Contando con el suelo cubierto durante todo el año.

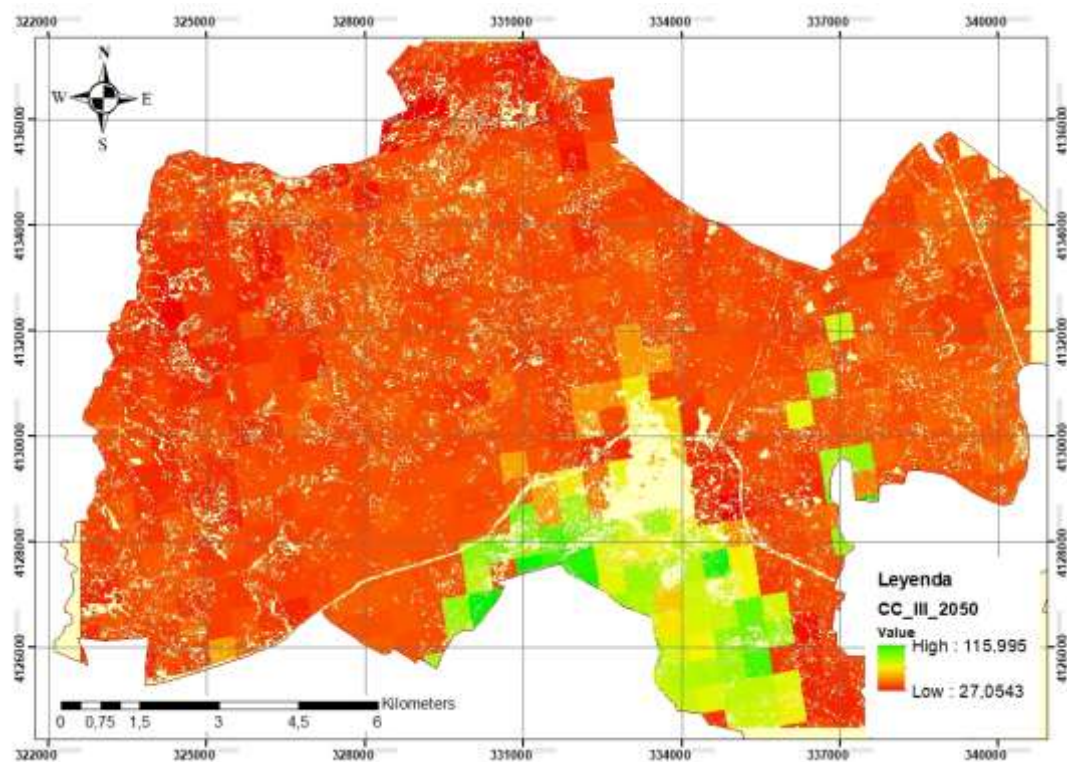


Figura 4.2.1. Mapa predictivo del contenido de carbono orgánico en el suelo para 2050 con cambio climático y considerando un cambio de manejo convencional a uno más sostenible, en el municipio de Estepa (Sevilla). Contando con el suelo cubierto durante todo el año.

4.3. Límite y déficit de saturación de carbono

La tabla 4.3.1., y las figuras 4.3.1, 2 y 3 presentan los valores y la distribución espacial de los límites y el déficit de saturación del carbono orgánico. Cuanto más próximo a 1 (100 %) sea el déficit de saturación menos saturado en carbono orgánico está el suelo, y, por lo tanto, más carbono orgánico puede almacenar, mientras que cuanto más próximo esté de 0, el suelo está más saturado, y por lo tanto, menos carbono orgánico puede almacenar. Observando los valores de la Tabla 4.3.1., los suelos de los cultivos de cereales son los que presentan mayor déficit de saturación de carbono con un 63% y un 69% de déficit de las fracciones protegidas (HUM y IOM), y coincide con las tonalidades más altas (azules) en las Figuras 4.3.2., y 4.3.3.

Tabla 4.3.1. Límite de saturación y déficit de saturación (%) para los diferentes usos del suelo. Déficit de saturación C protegido (*)

	% Límite saturación	BD (g/cm ³)	Volumen suelo (cm ³)	peso t suelo/ ha	Límite saturación tC/ha	Valor C actual	Valor C actual protegido	Déficit Saturación (%)	
HE.	3,45	1,24	20E8	2480	85,48	31,7	26,9	63	69*
MN.	4,32	1,16	20E8	2320	100,14	64,2	51,2	36	49*
OS.	2,41	1,25	20E8	2500	60,35	37,1	28,6	39	53*
OC.	2,40	1,27	20E8	2540	61,05	35,1	27,0	43	56*

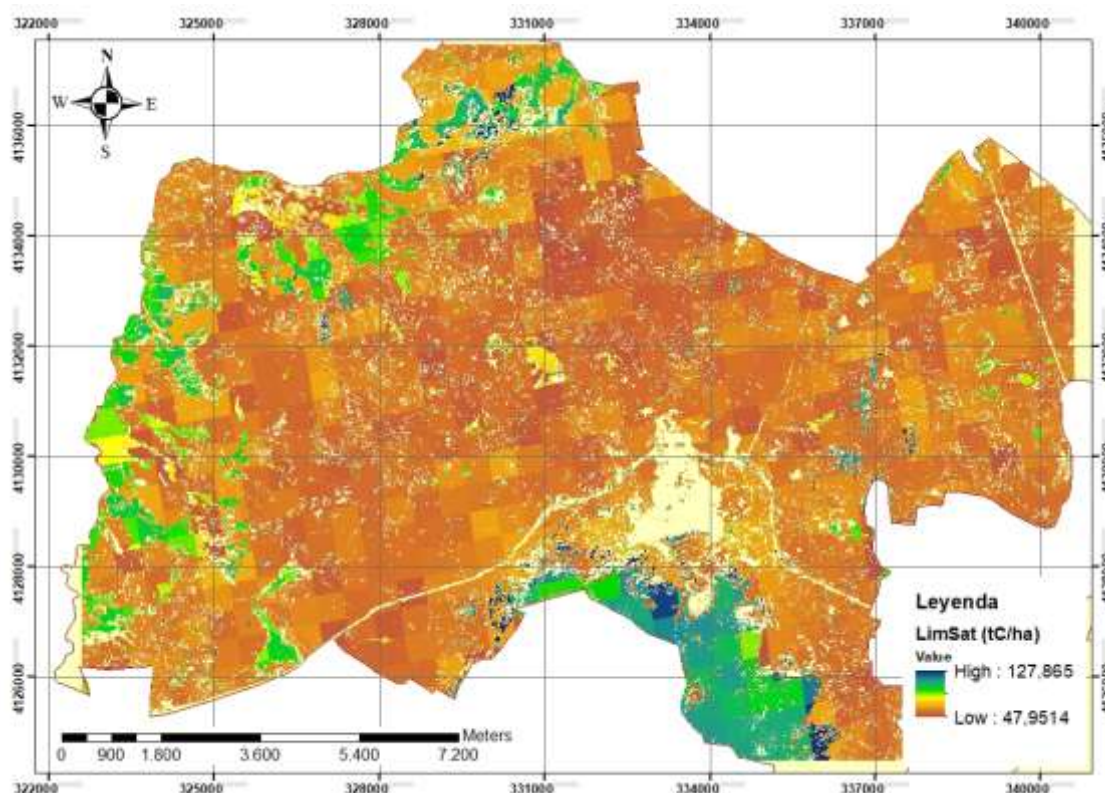


Figura 4.3.1. Mapa del límite de saturación de carbono en tC/ha, en el municipio de Estepa (Sevilla)

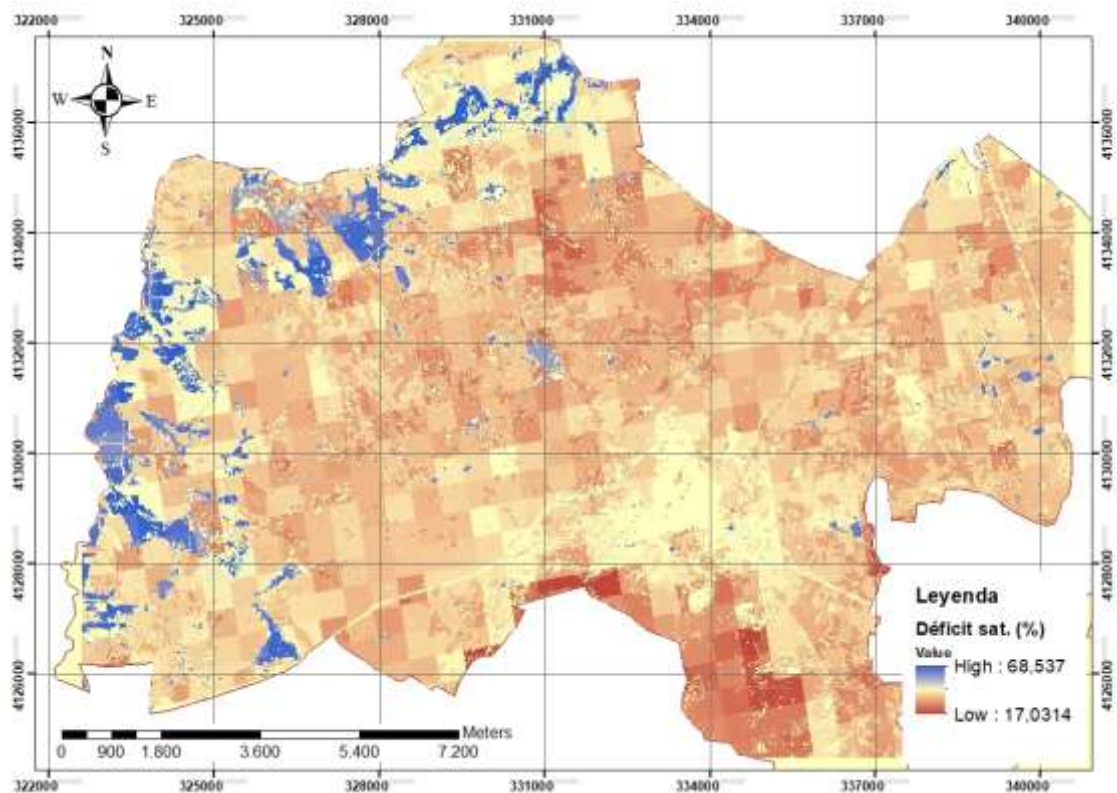


Figura 4.3.2. Mapa del déficit de saturación de carbono general en porcentaje, en Estepa (Sevilla)

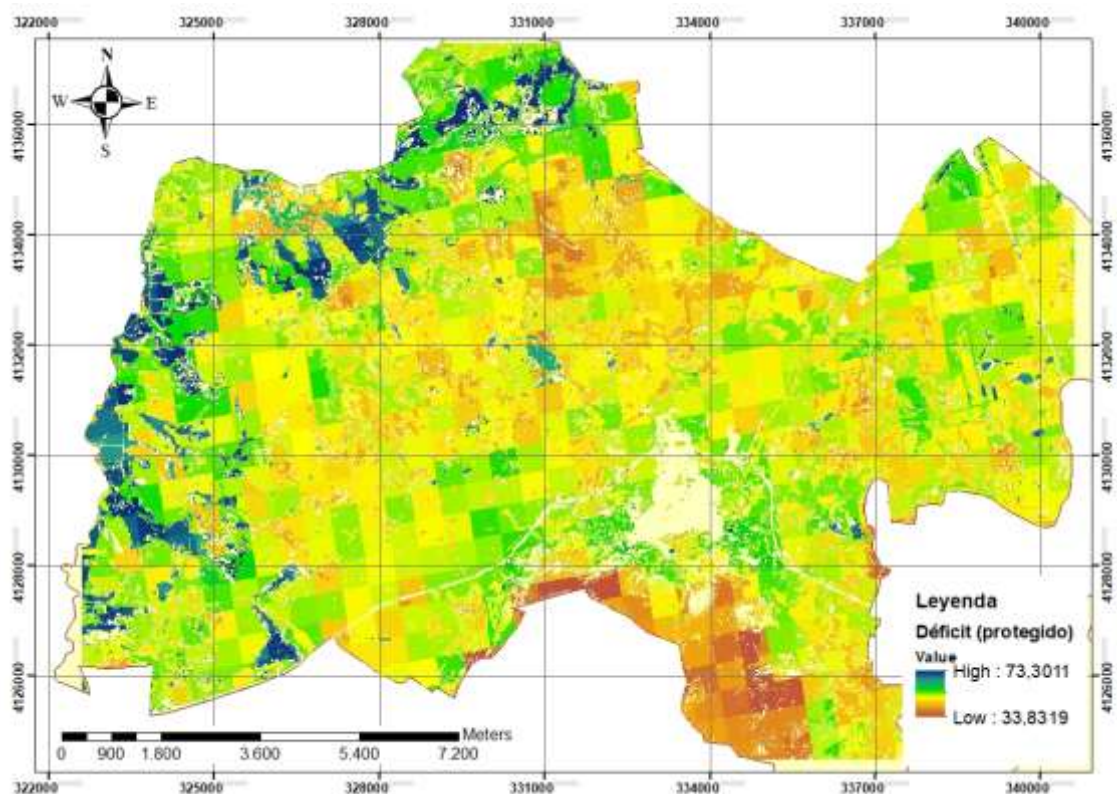


Figura 4.3.3. Mapa del déficit de saturación de carbono de las fracciones protegidas en porcentaje, en Estepa (Sevilla)

En el caso del monte, su suelo presenta porcentajes más bajos de déficit de saturación y déficit de saturación en las fracciones protegidas, 36% y 49%, respectivamente. Este resultado no es inesperado porque los niveles de carbono orgánico del suelo forestal están más cerca de encontrarse saturado en carbono orgánico que el resto de usos del suelo, siendo las tonalidades más marrones en los mapas pertenecientes al déficit (Figuras 4.3.2., y 4.3.3.).

Con respecto al cultivo de olivar, el olivar convencional está ligeramente menos saturado en carbono que el olivar sostenible (43% y 39%). Sin embargo, ambos presentan valores medios (53% y 56%), de déficit de saturación en sus fracciones protegidas, por lo que son capaces de fijar carbono orgánico en el suelo.

5. CONCLUSIONES

La metodología empleada ha permitido obtener valores aproximados del contenido de carbono orgánico presente en el suelo, sobretodo aquel destinado a cultivo agrícola. El modelo RothC es una buena herramienta para prever los cambios en las cantidades de carbono a escalas espaciales elevadas sobre posibles escenarios futuros de manejo y cambios en el clima y actuar frente a ello.

En los cultivos de cereales y para 2050, sin y con cambio climático, los niveles de carbono orgánico aumentan debido, principalmente, a la entrada de carbono orgánico por parte de los restos de cosecha (tC ha^{-1}), considerados del estudio de (Francaviglia, *et al.* 2012), ya que son más altos que los aportes según el programa para que el contenido de carbono no varíe (Tablas 5 y 15 del Anexo). Por ende, ese aporte de más en herbáceos hace que el carbono orgánico del suelo aumente y teniendo en cuenta su alto déficit de saturación de carbono es capaz de fijar SOC.

Como era esperable, los contenidos en carbono orgánico en el ecosistema natural de monte fueron los mayores y éstos no cambiaron debido a los cambios en la temperatura y precipitación promedios mensuales previsto ante un escenario de cambio climático.

Los suelos del olivar convencional presentaron los valores previstos más bajos de carbono orgánico en 2050, debido a las prácticas de manejo que en él se llevan a cabo, tales como como la eliminación completa de la cubierta vegetal, el laboreo del suelo que rompe los agregados del mismo que favorece la pérdida de carbono a la atmósfera, y la ausencia de aportes de fuentes de carbono orgánico al suelo. Como consecuencia del cambio climático la disminución de los contenidos en carbono orgánico en el suelo se agrava, debido, principalmente, a un aumento de la emisión de CO_2 del suelo ligado al incremento en la temperatura.

En el olivar sostenible, pese a tener un aporte más que en el convencional como es la cubierta vegetal en abril, éste aporte no es suficiente para mantener o incrementar los niveles de carbono orgánico en el suelo, ya que también se prevé un descenso del contenido de carbono orgánico en el suelo. Esto es debido a que la entrada de carbono orgánico en el suelo a través de los restos de cubierta vegetal es inferior a las estimaciones de la emisión de CO₂ del suelo. Esto es, principalmente, debido a que la cubierta vegetal en la DOP se implementa en bandas de una anchura determinada (típicamente entre 2-3 metros) en la entrecalle que resulta en bajos valores de producción primaria neta y, por lo tanto, bajos valores de entrada de carbono orgánico al suelo.

Un cambio de manejo en el cultivo de olivar que implica además de la cubierta vegetal el aporte de alperujo compostado, resultó en una reducción en el descenso de carbono orgánico en el suelo. Por lo tanto, el establecimiento de la cubierta vegetal en toda la superficie de la finca, junto con la aplicación de alperujo compostado podría contribuir notablemente a reducir las pérdidas de carbono orgánico en el olivar.

Los resultados obtenidos demuestran que con la implementación de adecuadas prácticas de manejo, se puede contribuir a disminuir la pérdida de carbono orgánico del suelo de los olivares y al almacenamiento de carbono orgánico en el suelo, teniendo en cuenta los bajos valores de saturación de carbono orgánico, además de mejorar la calidad de los suelos agrícolas. Ante esto, estrategias como el *Carbon Farming* son cruciales para llevar a cabo dicho incremento de SOC y mitigar el cambio climático.

6. REFERENCIAS

- Adil, M., Yao, Z., Zhang, C, Lu S, Fu S, Mosa WFA, Hasan ME and Lu H (2022). Climate change stress alleviation through nature based solutions: A global perspective. *Front. Plant Sci.* 13:1007222.
- Anderegg WRL, Trugman AT, Wang J, Wu C (2022). Open science priorities for rigorous nature-based climate solutions. *PLoS Biol* 20(12): e3001929.
- Bassot, E., 2022. The six policy priorities of the von der Leyen Commission. State of play as the Commission approaches mid-term. IN-DEPTH ANALYSIS. EPRS | European Parliamentary Research Service
- Calero, J., Ontiveros-Ortega, A., Aranda, V., Plaza, I. (2017). Humic acid adsorption and its role in colloidal-scale aggregation determined with the zeta potential, surface free energy and the extended-DLVO theory. *European Journal of Soil Science* 68: 491–503.
- Calero, J.; García-Ruiz, R.; Torrús-Castillo, M.; Vicente-Vicente, J.L.; Martín-García, J.M. Role of Clay Mineralogy in the Stabilization of Soil Organic Carbon in Olive Groves under Contrasted Soil Management. *Minerals* 2023, 13, 60.
- Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C. and Maginnis, S. (eds.) (2016). *Nature-based Solutions to address global societal challenges*. Gland, Switzerland: IUCN. xiii + 97pp.
- Coleman K., Jenkinson D. 1996. RothC-26.3 - A model for the turnover of carbon in soil. In D. Powlson, P. Smith, J. Smith (Eds.), *Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing, Long-Term Datasets*, Vol. 38, pp. 237–246. NATO ASI Series I.
- Coleman, K. y Jenkinson, D. S. 2014. RothC –A model for the turnover of carbon in soil.
- COM/2018/392 final. Propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo por el que se establecen normas en relación con la ayuda a los planes estratégicos que deben elaborar los Estados miembros en el marco de la política agrícola común (planes estratégicos de la PAC), y por el que se derogan el Reglamento (UE) n.º 1306 y 1307/2013 del Parlamento Europeo y del Consejo y el Reglamento (UE)
- COM/2019/640 final. Pacto Verde europeo. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones), 11-12-2019.

- COM/2020/381 final. Estrategia “de la granja a la mesa” para un sistema alimentario justo, saludable y respetuoso con el medio ambiente. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones. 20-5-2020.
- COM/2021/699 final. Estrategia Europea para la Protección del Suelo para 2030. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones. 11-17-2021.
- COWI, Ecologic Institute and IEEP (2021). Technical Guidance Handbook - setting up and implementing result-based carbon farming mechanisms in the EU Report to the European Commission, DG Climate Action, under Contract No. CLIMA/C.3/ETU/2018/007. COWI, Kongens Lyngby.
- Damaneh, H., Khosravi, H., Habashi, K. et al. The impact of land use and land cover changes on soil erosion in western Iran. *Nat Hazards* 110, 2185–2205 (2022)
- Delgado-Londoño, D. M., 2017. Aplicación de enmiendas orgánicas para la recuperación de propiedades físicas del suelo asociadas a la erosión hídrica. *Lámpsakos* (revista Descontinuada), 1(17), 77–83.
- Dignac, M.F., Delphine Derrien, D., Pierre Barré, P., Sébastien Barot, S., Lauric Cécillon, L., et al. 2017. Increasing soil carbon storage: mechanisms, effects of agricultural practices and proxies. *Agron. Sustain. Dev.* (2017) 37: 14
- ESDB v2.0: The European Soil Database distribution version 2.0, European Commission and the European Soil Bureau Network, CD-ROM, EUR 19945 EN, 2004 <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/resource-type/european-soil-database-soil-properties> (Accesed, 07-05-2020)
- FAO & GTIS. 2015. Status of the World’s Soil Resources, Roma: s.n.
- FAO. 2017. Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. Roma, Italia.
- Faivre, N., Fritz, M., Freitas, T., Boissezon, B., and Vandewoestijne, S. 2017. Nature-Based Solutions in the EU: Innovating with nature to address social, economic and environmental challenges. *Environmental Research* 159 (2017) 509–518.
- Falloon P, Smith P, Coleman K, and Marshall S (1998) Estimating the size of the inert organic matter pool for use in the Rothamsted carbon model. *Soil Biology and Biochemistry* 30: 1207-1211

- Fernández Hernández, A., Vega Humanes, M., Concepción García-Ortiz Civantos, C. (2015) – Diez años de aplicación de compost de alperujo en olivar. Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural, Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera, 2015. 1-15 p. - (Producción Agraria)
- Fernandes, J.P., Guimar, N., 2017. Nature Based Solutions: The Need to Increase the Knowledge on their Potentialities and Limits. *Land Degradation and Development* 102, 99 – 107.
- Francaviglia, R., Coleman, K., Whitmore, A. P., Doro, L., Urracci, G., Rubino, M., Ledda L. (2012). Changes in soil organic carbon and climate change – Application of the RothC model in agro-silvo-pastoral Mediterranean systems. *Agricultural Systems* 112: 48–54.
- Pierre Friedlingstein, P., et al. 2020. Global Carbon Budget 2020. *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 3269–3340, 2020
- García, A., Laurín, M., Llosá, M. J., González, V., Sanz, M. J., & Porcuna, J. L. (2008). Contribución de la agricultura ecológica a la mitigación del cambio climático en comparación con la agricultura convencional. *Agroecología*, 1, 75–88. <https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/169>
- García-Ruiz, R., Ochoa, M., Hinojosa, M., Gómez-Muñoz, B., (2012). Improved soil quality after 16 years of olive mill pomace. *Agronomy for sustainable development*, 32:803–810.
- Gerardin, C., Jenkins, S., Seddon, N., Allen, M., Lewis, S.L., Wheeler, C.E., Griscom, B.W., et al., 2021. Nature-based Solutions can help cool the planet –if we act now. *Nature* 593, 191-194.
- González Sánchez, E.J., Veroz González, O., Gil Ribes, J.A., Ordóñez Fernández, R.M., (2018). Iniciativa 4 por mil: el carbono orgánico del suelo como herramienta de mitigación y adaptación al cambio climático en España.
- Griscom, B. W., Adams, J., Ellis, P. W., Houghton, R. A., Lomax, G., Miteva, D. A., Schlesinger, W. H., Shoch, D., Siikamäki, J. V., Smith, P., Woodbury, P., Zganjar, C., Blackman, A., Campari, J., Conant, R. T., Delgado, C., Elias, P., Gopalakrishna, T., Hamsik, M. R., Fargione, J., et al. (2017): Natural climate solutions. *Proceedings of the National*.
- Hadjichambis, A.C. European Green Deal and Environmental Citizenship: Two Interrelated Concepts. *Environ. Sci. Proc.* 2022, 14, 3.

IGN. Instituto Geográfico Nacional, Visor Iberpix. <https://www.ign.es/iberpix/visor/>

IPCC, 2000 – Nebojsa Nakicenovic y Rob Swart (Eds.) Cambridge University Press, Reino Unido. pp 570 Disponible en Cambridge University Press , The Edinburgh Building Shaftesbury Road, Cambridge CB2 2RU INGLATERRA.

IPCC (2006) 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva.

IPCC, 2007: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. enhen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019. Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.

Kane, D. 2015. Carbon Sequestration Potential on Agricultural Lands: A Review of Current Science and Available Practices, s.l.: s.n.

Lal, R., 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. Geoderma, 123:1– 22.

Lal, R., 2008. Carbon sequestration. Philosophical Transactions of the Royal Society, 363:815–830.

Lal, R., 2013. Soil carbon management and climate change, Carbon Management, 4:4, 439-462.

Lal, R., 2016. Beyond COP21: Potential and challenges of the “4 per Thousand” initiative. Jan/Feb 2016—vol. 71, no. 1

Lal, R., 2019. Accelerated soil erosion as a source of atmospheric CO₂. Soil and Tillage Research Volume 188, May 2019, Pages 35-40

Macháč, J., Trantinová, M., and Zaňková, L. 2021. Externalities in agriculture: How to include their monetary value in decision-making? International Journal of Environmental Science and Technology (2021) 18:3–20

Martínez, E., Fuentes, J. P., Acevedo, E. 2008. Soil organic carbon and soil properties. J. Soil Sc. Plant Nutr. 8 (1) 2008 (68-96)

- Maqueda González, María Rosario; Carbonell Padrino, María Victoria; Martínez Ramírez, Elvira; Flórez García, Mercedes Fuentes de emisión de gases de efecto invernadero en la agricultura Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, núm. 4, 2005, pp. 14-18
- McDonald, H., Frelih-Larsen, A., Lóránt, A., Duin, L., Pyndt Andersen, S., Costa, G., and Bradley, H. 2021, Carbon farming – Making agriculture fit for 2030, Study for the committee on Environment, Public Health and Food Safety (ENVI), Policy Department for Economic, Scientific and Quality of Life Policies, European Parliament, Luxembourg.
- Minasny, B., Malone, B.P., McBratney, A.O., Angers, D.A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., et al., (2017). Soil Carbon 4 per mille. *Geoderma* 292, 59 – 86.
- MITECO, 2022. Resumen del Inventario Nacional de Emisiones a la Atmósfera. Emisiones de gases de efecto invernadero, Serie 1990-2020.
- Morais, T. G., Teixeira, R., Domingos, T. 2019. Detailed global modelling of soil organic carbon in cropland, grassland and forest soils.
- Mrunalini, K., Behera, B., Jayaraman, S., Abhilash, P. C., Dubey, P. K., Swamy, G. N., Prasad, J. V. N. S., Rao, K. V., Krishnan, P., Pratibha, G., & Srinivasa Rao, C. (2022). Nature-based solutions in soil restoration for improving agricultural productivity. *Land Degradation & Development*, 33(8), 1269–1289.
- Ordóñez, R., Ramos, F.J., González, P., Pastor, M., Giráldez, J.V. (2001). Influencia de la aplicación continuada de restos de poda de olivo sobre las propiedades físico-químicas de un suelo de olivar. *Temas de investigación en zona no saturada: actas de las V Jornadas sobre Investigación en la Zona no Saturada*, 7-9 de noviembre de 2001, Pamplona.
- REDIAM. Centro de descargas. <https://portalrediam.cica.es/descargas>
- Rodríguez, C. (2022). Estimación de la cubierta vegetal mediante el análisis de imágenes de satélite de media y alta resolución en una zona de olivar en Estepa (Sevilla). Trabajo Fin de Máster. Universidad de Jaén.
- Simelton E, Carew-Reid J, Coulier M, Damen B, Howell J, Pottinger-Glass C, Tran HV and Van Der Meiren M (2021). NBS Framework for Agricultural Landscapes. *Front. Environ. Sci.* 9:678367.

- Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil* 241: 155– 176, 2002.
- Sumberg, J. 2022. Future agricultures: The promise and pitfalls of a (re)turn to nature. *Outlook on Agriculture* 2022, Vol. 51(1) 3–10
- Sonneveld, B.G.J.S. Merbis, M.D. Alfara, A. & Ünver, O. and Arnal, M.A. 2018. Nature-Based Solutions for agricultural water management and food security. *FAO Land and Water Discussion Paper no. 12*. Rome, FAO. 66 pp.
- Torrú-Castillo, M., (2019). Reservas de carbono orgánico e inorgánico en sistemas perennes semiáridos; el papel de la cubierta vegetal. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Jaén.
- Torrús-Castillo, M., Calero, J., García-Ruiz, R., In press. Andalusian olive groves carbon balance along a manageable C input. *Land*
- UKCP18 Guidance: Representative Concentration Pathways 2018. Environment Agency.
<https://www.metoffice.gov.uk/binaries/content/assets/metofficegovuk/pdf/research/ukcp/ukcp18-guidance---representative-concentration-pathways.pdf>
- Vicente, J.L. 2017. Soil organic carbon sequestration in olive groves of Andalusia: Effect of the managements on soil organic carbon dynamincs. Tesis Doctoral. Universidad de Jaén.
- Von Lützow, M., Kögel-Knabner, L., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B. & Flessa, H. (2006). Stabilization of organic matter in temperate soils: Mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review. *European Journal of Soil Science*, 57: 426-445.
- WHCEQ, White House Council on Environmental Quality, 2022. Nature-Based Solutions Resource Guide. Washington DC, 43 pp.

ANEXO

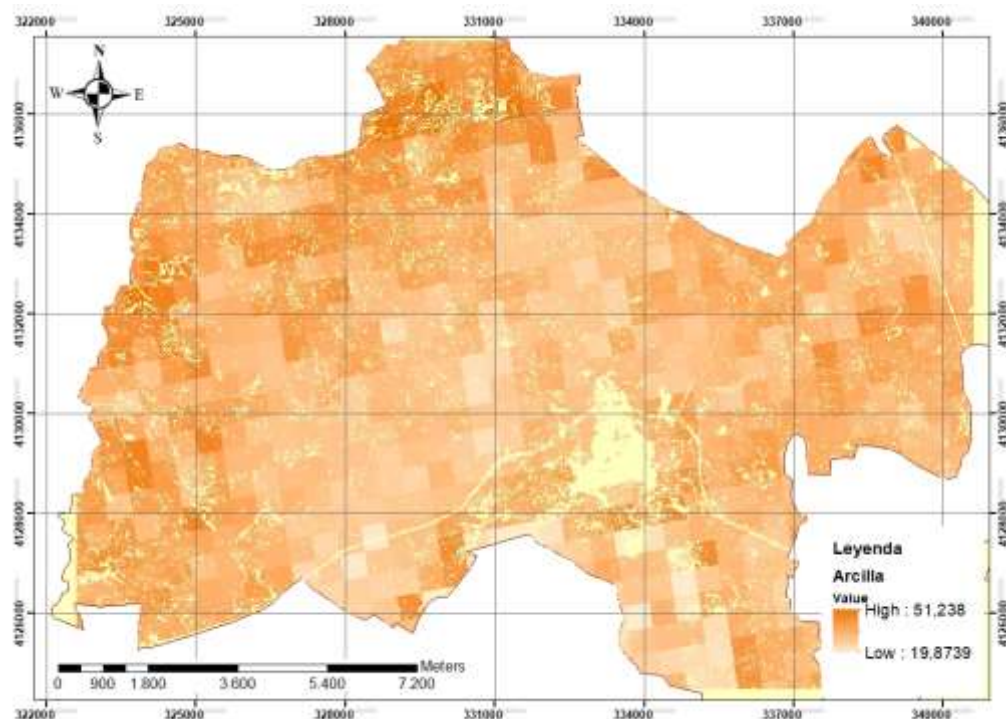


Figura 1. Mapa del contenido de arcilla (%) en el municipio de Estepa, Sevilla. Fuente: Elaboración propia a partir del mapa europeo del contenido de arcilla

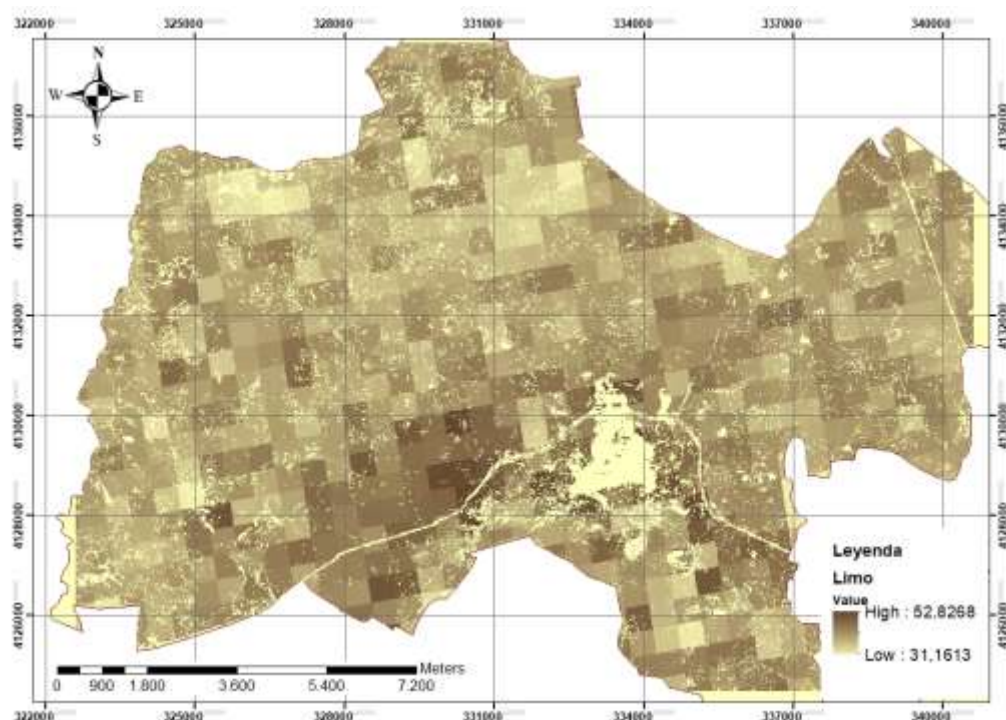


Figura 2. Mapa del contenido de limo (%) en el municipio de Estepa (Sevilla). Fuente: Elaboración propia a partir del mapa europeo del contenido de limo

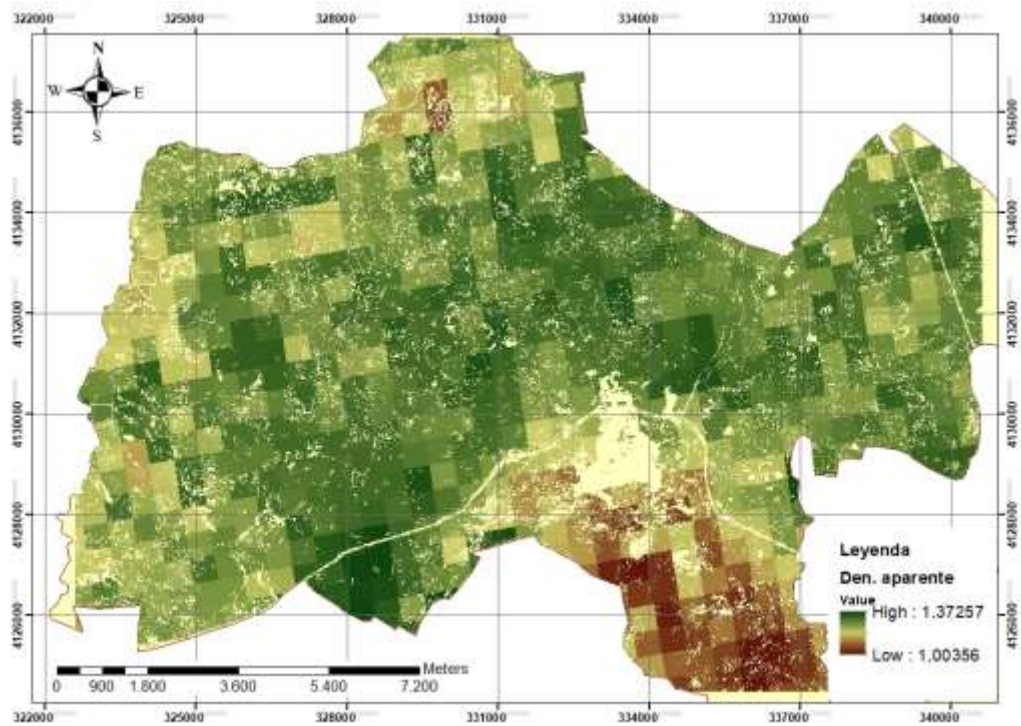


Figura 3. Mapa de densidad aparente (g cm⁻³) en el municipio de Estepa, Sevilla Fuente: Elaboración propia a partir del mapa europeo del contenido de arcilla

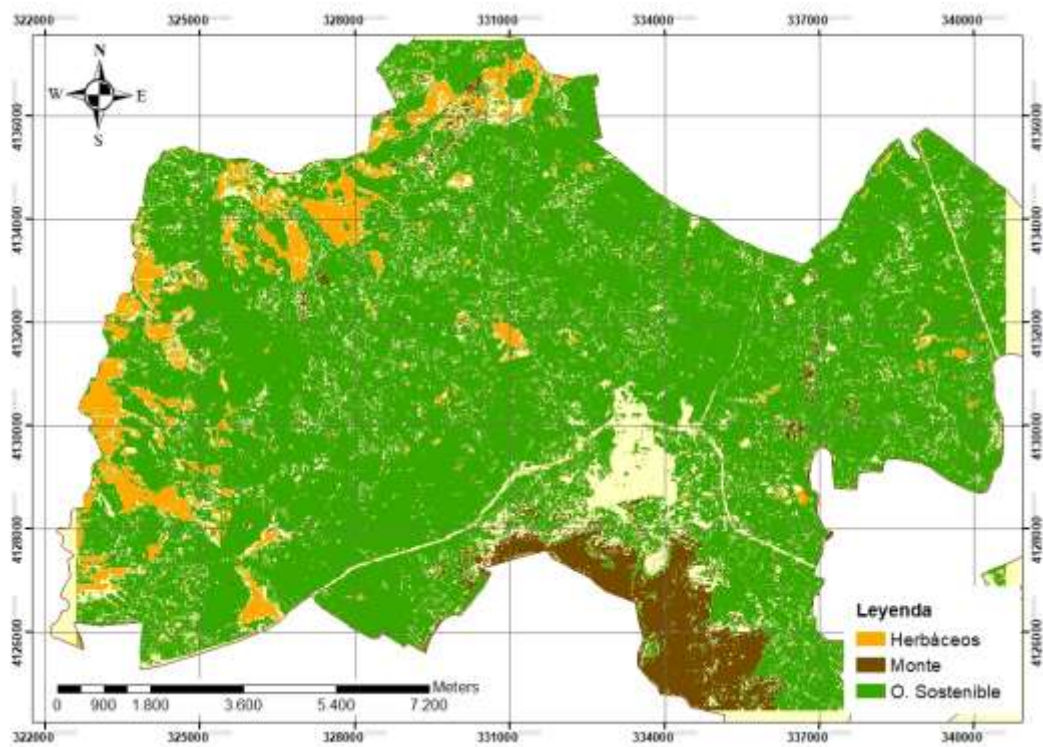


Figura 4. Mapa de coberturas del suelo con cambio de manejo en el olivar convencional a un manejo sostenible

Tabla 1. Valores de weather y land management con los datos de clima y residuos de plantas vegetales para olivar sostenible sin cambio climático.

Meses	Weather			Land management		
	ETP	P	Tmed.	Plant R. (tC/ha)	FYM (tC/ha)	Soil cover
Enero	17,2	61,8	8,9	0,089	0	1
Febrero	21,5	48,2	10,5	0,582	0	1
Marzo	37,5	41,1	12,8	0,089	0	1
Abril	49,8	54,1	14,5	0,637	0	1
Mayo	81,7	38,9	18,1	0,085	0	1
Junio	123,2	14,1	23,2	0,085	0	1
Julio	166,6	5,2	26,4	0,024	0	1
Agosto	155,9	8,4	26,5	0,024	0	1
Septiembre	109,5	21,7	23,2	0,024	0	1
Octubre	64,2	52,9	17,8	0,038	0	1
Noviembre	32,2	70,8	13,0	0,038	0	1
Diciembre	19,8	79,9	10,1	0,038	0	1

Tabla 2. Valores de weather y land management con los datos de clima y residuos de plantas vegetales para olivar sostenible con cambio climático.

Meses	Weather			Land management		
	ETP	P	Tmed.	Plant R. (tC/ha)	FYM (tC/ha)	Soil cover
Enero	18,9	54,2	11,1	0,089	0	1
Febrero	21,7	29,6	11,9	0,582	0	1
Marzo	40,4	30,9	14,6	0,089	0	1
Abril	64,1	26,4	17,7	0,637	0	1
Mayo	98,5	19,3	20,6	0,085	0	1
Junio	137,6	16,6	24,2	0,085	0	1
Julio	187,8	9,8	27,8	0,024	0	1
Agosto	185,2	7,8	28,6	0,024	0	1
Septiembre	131,2	8,8	25,7	0,024	0	1
Octubre	75,8	20,9	20,3	0,038	0	1
Noviembre	35,4	41,1	15,0	0,038	0	1
Diciembre	21,8	53,1	12,1	0,038	0	1

Tabla 3. Valores de weather y land management con los datos de clima y residuos de plantas vegetales para olivar convencional sin cambio climático.

Meses	Weather			Land management		
	ETP	P	Tmed.	Plant R. (tC/ha)	FYM (tC/ha)	Soil cover
Enero	17,0	64,6	8,7	0,089	0	0
Febrero	21,3	49,9	10,3	0,582	0	1
Marzo	37,2	43,1	12,6	0,089	0	0
Abril	49,4	55,9	14,3	0,085	0	0
Mayo	81,0	40,7	17,8	0,085	0	0
Junio	122,2	13,9	23,1	0,085	0	0
Julio	165,4	4,7	26,3	0,024	0	0
Agosto	154,8	8,9	26,4	0,024	0	0
Septiembre	108,6	22,6	23,0	0,024	0	0
Octubre	63,8	53,4	17,6	0,038	0	0
Noviembre	31,9	74,3	12,8	0,038	0	0
Diciembre	19,7	83,3	9,8	0,038	0	0

Tabla 4. Valores de weather y land management con los datos de clima y residuos de plantas vegetales para olivar convencional con cambio climático.

Meses	Weather			Land management		
	ETP	P	Tmed.	Plant R. (tC/ha)	FYM (tC/ha)	Soil cover
Enero	19,0	53,1	11,2	0,089	0	0
Febrero	21,8	28,9	12,1	0,582	0	1
Marzo	40,5	30,2	14,7	0,089	0	0
Abril	64,1	26,8	17,8	0,085	0	0
Mayo	98,6	19,7	20,7	0,085	0	0
Junio	139,2	16,9	24,3	0,085	0	0
Julio	191,1	9,9	28,0	0,024	0	0
Agosto	188,3	8,1	28,8	0,024	0	0
Septiembre	132,5	8,7	25,8	0,024	0	0
Octubre	76,2	21,4	20,4	0,038	0	0
Noviembre	35,5	40,7	15,2	0,038	0	0
Diciembre	21,9	52,2	12,2	0,038	0	0

Tabla 5. Valores de weather y land management con los datos de clima y residuos de plantas vegetales para herbáceos sin cambio climático.

Meses	Weather			Land management		
	ETP	P	Tmed.	Plant R. (tC/ha)	FYM (tC/ha)	Soil cover
Enero	17,3	62,4	9,0	0	0	0
Febrero	21,6	48,7	10,6	0	0	0
Marzo	37,7	41,7	12,9	0	0	0
Abril	50,3	54,5	14,6	0	0	0
Mayo	82,0	39,4	18,1	1,227	0	1
Junio	123,5	13,5	23,4	1,227	0	1
Julio	166,7	4,7	26,5	1,227	0	1
Agosto	156,4	8,5	26,6	0	0	0
Septiembre	109,9	21,7	23,3	0	0	0
Octubre	64,4	53,3	17,9	0	0	0
Noviembre	32,4	72,2	13,2	0	0	0
Diciembre	20,0	80,7	10,2	0	0	0

Tabla 6. Valores de weather y land management con los datos de clima y residuos de plantas vegetales para herbáceos con cambio climático.

Meses	Weather			Land management		
	ETP	P	Tmed.	Plant R. (tC/ha)	FYM (tC/ha)	Soil cover
Enero	18,8	54,6	11,1	0	0	0
Febrero	21,6	30,2	11,9	0	0	0
Marzo	40,1	31,2	14,6	0	0	0
Abril	63,6	26,8	17,6	0	0	0
Mayo	98,0	19,6	20,5	1,227	0	1
Junio	137,9	17,0	24,2	1,227	0	1
Julio	189,1	10,3	27,9	1,227	0	1
Agosto	186,6	8,2	28,7	0	0	0
Septiembre	131,5	7,7	25,7	0	0	0
Octubre	75,7	20,0	20,3	0	0	0
Noviembre	35,3	41,7	15,0	0	0	0
Diciembre	21,7	53,7	12,0	0	0	0

Tabla 7. Valores de weather y land management con los datos de clima y residuos de plantas vegetales para monte sin cambio climático.

Meses	Weather (MONT)			Land management (MONT1)		
	ETP	P	Tmed.	Plant R. (tC/ha)	FYM (tC/ha)	Soil cover
Enero	17,3	62,4	9,0	0,312	0	1
Febrero	21,6	48,7	10,6	0,312	0	1
Marzo	37,7	41,7	12,9	0,312	0	1
Abril	50,3	54,5	14,6	0,312	0	1
Mayo	82,0	39,4	18,1	0,312	0	1
Junio	123,5	13,5	23,4	0,312	0	1
Julio	166,7	4,7	26,5	0,312	0	1
Agosto	156,4	8,5	26,6	0,312	0	1
Septiembre	109,9	21,7	23,3	0,312	0	1
Octubre	64,4	53,3	17,9	0,312	0	1
Noviembre	32,4	72,2	13,2	0,312	0	1
Diciembre	20,0	80,7	10,2	0,312	0	1

Tabla 8. Valores de weather y land management con los datos de clima y residuos de plantas vegetales para monte con cambio climático.

Meses	Weather			Land management		
	ETP	P	Tmed.	Plant R. (tC/ha)	FYM (tC/ha)	Soil cover
Enero	17,0	58,4	9,9	0,312	0	1
Febrero	19,8	33,0	10,8	0,312	0	1
Marzo	37,5	33,4	13,4	0,312	0	1
Abril	59,8	28,6	16,5	0,312	0	1
Mayo	91,8	21,2	19,5	0,312	0	1
Junio	127,4	19,3	23,0	0,312	0	1
Julio	173,8	11,6	26,8	0,312	0	1
Agosto	172,2	8,8	27,8	0,312	0	1
Septiembre	122,6	10,8	24,7	0,312	0	1
Octubre	71,1	22,4	19,2	0,312	0	1
Noviembre	32,9	44,5	13,9	0,312	0	1
Diciembre	19,9	57,1	10,8	0,312	0	1

Tabla 9. Valores de weather y land management con los datos de clima y residuos de plantas vegetales para un cambio de manejo a olivar sostenible, sin cambio climático

Meses	Weather			Land management		
	ETP	P	Tmed.	Plant R. (tC/ha)	FYM (tC/ha)	Soil cover
Enero	17,0	62,3	8,7	0,089	0	1
Febrero	21,4	49,1	10,4	0,582	0	1
Marzo	37,3	42,1	12,7	0,089	0	1
Abril	49,5	55,0	14,3	0,637	0	1
Mayo	81,2	39,8	17,9	0,085	0	1
Junio	122,4	14,0	23,1	0,085	0	1
Julio	165,7	5,0	26,3	0,024	0	1
Agosto	155,1	8,7	26,4	0,024	0	1
Septiembre	108,8	22,2	23,0	0,024	0	1
Octubre	63,7	53,2	17,6	0,038	0,45	1
Noviembre	32,0	72,6	12,9	0,038	0	1
Diciembre	19,8	81,6	10,0	0,038	0	1

Tabla 10. Valores de weather y land management con los datos de clima y residuos de plantas vegetales para un cambio de manejo a olivar sostenible con cambio climático

Meses	Weather			Land management		
	ETP	P	Tmed.	Plant R. (tC/ha)	FYM (tC/ha)	Soil cover
Enero	19,0	53,7	11,2	0,089	0	1
Febrero	21,8	29,3	12,0	0,582	0	1
Marzo	40,5	30,6	14,7	0,089	0	1
Abril	64,1	26,6	17,8	0,637	0	1
Mayo	98,6	19,5	20,7	0,085	0	1
Junio	138,4	16,8	24,3	0,085	0	1
Julio	189,5	9,9	27,9	0,024	0	1
Agosto	186,8	8,0	28,7	0,024	0	1
Septiembre	131,9	8,8	25,8	0,024	0	1
Octubre	76,0	21,2	20,4	0,038	0,45	1
Noviembre	35,5	40,9	15,1	0,038	0	1
Diciembre	21,9	52,7	12,2	0,038	0	1

Tabla 11. Inputs de residuos vegetales por mes para olivar sostenible, sin cambio climático

Calculate: Plant inputs: Knowing total carbon			
Weather	SCOS	Plant input per month	
Land management	OS1	January	0,1086
Measured Total Carbon	37 (tC ha ⁻¹)	February	0,7103
		March	0,1086
DPM/RPM Ratio	0.1189	April	0,7774
Year sampled	2020	May	0,1037
(between 1860-2100)		June	0,1037
		July	0,0293
Modelled values		August	0,0293
		September	0,0293
Total Organic Carbon (tC/ha)	37.0000	October	0,0464
Biomass C (tC/ha)	0.6509	November	0,0464
Radiocarbon content	-2.8	December	0,0464
IOM (0.049*TOC* ^{1.139})	2.9949	Total	2,1393

Tabla 12. Inputs de residuos vegetales por mes para olivar sostenible, con cambio climático

Calculate: Plant inputs: Knowing total carbon			
Weather	CCOS	Plant input per month	
Land management	OS1	January	0,1070
Measured Total Carbon	37 (tC ha ⁻¹)	February	0,6995
		March	0,1070
DPM/RPM Ratio	0.1189	April	0,7656
Year sampled	2020	May	0,1022
(between 1860-2100)		June	0,1022
		July	0,0288
Modelled values		August	0,0288
		September	0,0288
Total Organic Carbon (tC/ha)	37.0000	October	0,0457
Biomass C (tC/ha)	0.6499	November	0,0457
Radiocarbon content	-3.4	December	0,0457
IOM (0.049*TOC* ^{1.139})	2.9949	Total	7.3379

Tabla 13. Inputs de residuos vegetales por mes para olivar convencional, sin cambio climático

Calculate: Plant inputs: Knowing total carbon			
Weather	SCOC	Plant input per month	
Land management	OC1	January	0.4508
Measured Total Carbon	35.1 (tC ha ⁻¹)	February	2.9482
		March	0.4508
DPM/RPM Ratio	0.1188	April	0.4306
Year sampled	2020	May	0.4306
(between 1860-2100)		June	0.4306
		July	0.1216
Modelled values		August	0.1216
		September	0.1216
Total Organic Carbon (tC/ha)	35.1000	October	0.1925
Biomass C (tC/ha)	0.6361	November	0.1925
Radiocarbon content	19.4	December	0.1925
IOM (0.049*TOC* ^{1.139})	2.8203	Total	6.0838

Tabla 14. Inputs de residuos vegetales por mes para olivar convencional, con cambio climático

Calculate: Plant inputs: Knowing total carbon			
Weather	CCOC	Plant input per month	
Land management	OC1	January	0.5191
Measured Total Carbon	35.1 (tC ha ⁻¹)	February	3.3647
		March	0.5191
DPM/RPM Ratio	0.1188	April	0.4958
Year sampled	2020	May	0.4958
(between 1860-2100)		June	0.4958
		July	0.1400
Modelled values		August	0.1400
		September	0.1400
Total Organic Carbon (tC/ha)	35.1000	October	0.2216
Biomass C (tC/ha)	0.6388	November	0.2216
Radiocarbon content	16.4	December	0.2216
IOM (0.049*TOC* ^{1.139})	2.8203	Total	7.0052

Tabla 15. Inputs de residuos vegetales por mes para herbáceos, sin cambio climático

Calculate: Plant inputs: Knowing total carbon			
Weather	SCHB	Plant input per month	
Land management	HB1	January	0.0000
Measured Total Carbon	31.7 (tC ha ⁻¹)	February	0.0000
		March	0.0000
DPM/RPM Ratio	1.44	April	0.0000
Year sampled	2020	May	1.0554
(between 1860-2100)		June	1.0554
		July	1.0554
Modelled values		August	0.0000
		September	0.0000
Total Organic Carbon (tC/ha)	31.7000	October	0.0000
Biomass C (tC/ha)	0.6769	November	0.0000
Radiocarbon content	20.1	December	0.0000
IOM (0.049*TOC* ^{1.139})	2.5113	Total	3.1661

Tabla 16. Inputs de residuos vegetales por mes para herbáceos, con cambio climático

Calculate: Plant inputs: Knowing total carbon			
Weather	CCHB	Plant input per month	
Land management	HB1	January	0.0000
Measured Total Carbon	31.7 (tC ha ⁻¹)	February	0.0000
		March	0.0000
DPM/RPM Ratio	1.44	April	0.0000
Year sampled	2020	May	1.0665
(between 1860-2100)		June	1.0665
		July	1.0665
Modelled values		August	0.0000
		September	0.0000
Total Organic Carbon (tC/ha)	31.7000	October	0.0000
Biomass C (tC/ha)	0.6804	November	0.0000
Radiocarbon content	20.5	December	0.0000
IOM (0.049*TOC* ^{1.139})	2.5113	Total	3.1995

Tabla 17. Inputs de residuos vegetales por mes para monte, sin cambio climático

Calculate: Plant inputs: Knowing total carbon			
Weather	SCMN	Plant input per month	
Land management	MONT1	January	0.3275
Measured Total Carbon	64.2 (tC ha ⁻¹)	February	0.3275
		March	0.3275
DPM/RPM Ratio	0.67	April	0.3275
Year sampled	2020	May	0.3275
(between 1860-2100)		June	0.3275
		July	0.3275
Modelled values		August	0.3275
		September	0.3275
Total Organic Carbon (tC/ha)	64.2000	October	0.3275
Biomass C (tC/ha)	1.2063	November	0.3275
Radiocarbon content	-9.3	December	0.3275
IOM (0.049*TOC* ^{1.139})	5.6102	Total	3.9303

Tabla 18. Inputs de residuos vegetales por mes para monte, con cambio climático

Calculate: Plant inputs: Knowing total carbon			
Weather	CCMN	Plant input per month	
Land management	MONT1	January	0.3057
Measured Total Carbon	64.2 (tC ha ⁻¹)	February	0.3057
		March	0.3057
DPM/RPM Ratio	0.67	April	0.3057
Year sampled	2020	May	0.3057
(between 1860-2100)		June	0.3057
		July	0.3057
Modelled values		August	0.3057
		September	0.3057
Total Organic Carbon (tC/ha)	64.2000	October	0.3057
Biomass C (tC/ha)	1.2076	November	0.3057
Radiocarbon content	-12.6	December	0.3057
IOM (0.049*TOC* ^{1.139})	5.6102	Total	3.6681

Tabla 19. Inputs de residuos vegetales por mes para olivar sostenible con cambio de manejo, sin cambio climático

Calculate: Plant inputs: Knowing total carbon			
Weather Land management Measured Total Carbon DPM/RPM Ratio Year sampled (between 1860-2100) Modelled values	OST2 OST1 35.5 (tC ha ⁻¹) 0.1187 2020 Total Organic Carbon (tC/ha) Biomass C (tC/ha) Radiocarbon content IOM (0.049*TOC* ^{1.139})	Plant input per month	
		January	0.0815
		February	0.5331
		March	0.0815
		April	0.5834
		May	0.0779
		June	0.0779
		July	0.0220
		August	0.0220
		September	0.0220
Total Organic Carbon (tC/ha) Biomass C (tC/ha) Radiocarbon content IOM (0.049*TOC* ^{1.139})	35.5227 0.6300 -1.8 2.8570	October	0.0348
		November	0.0348
		December	0.0348
		Total	1.6056

Tabla 20. Inputs de residuos vegetales por mes para olivar sostenible con cambio de manejo, con cambio climático

Calculate: Plant inputs: Knowing total carbon			
Weather Land management Measured Total Carbon DPM/RPM Ratio Year sampled (between 1860-2100) Modelled values	CCT2 OST1 35.5 (tC ha ⁻¹) 0.1187 2020 Total Organic Carbon (tC/ha) Biomass C (tC/ha) Radiocarbon content IOM (0.049*TOC* ^{1.139})	Plant input per month	
		January	0.0795
		February	0.5197
		March	0.0795
		April	0.5688
		May	0.0759
		June	0.0759
		July	0.0214
		August	0.0214
		September	0.0214
Total Organic Carbon (tC/ha) Biomass C (tC/ha) Radiocarbon content IOM (0.049*TOC* ^{1.139})	35.5302 0.6295 -2.7 2.8570	October	0.0339
		November	0.0339
		December	0.0339
		Total	1.5653

ASIGNATURAS CURSADAS EN EL MÁSTER

Primer cuatrimestre

- *Métodos avanzados de análisis de datos ambientales (MAAD)*. En esta asignatura se abordaron conceptos estadísticos relevantes en el diseño de experimentos, muestreos y formulación de hipótesis, además del empleo de técnicas de minería de datos, geoestadísticas, etc., importantes para el análisis de grandes cantidades de datos y poder tener las herramientas necesarias para casos reales. También se adquirió manejo con programas estadísticos como past, RStudio, statygraphics y surfer.
- *Técnicas Geomáticas aplicadas al Medio Ambiente (TGAM)*. Mediante el empleo de Sistemas de Información Geográfica (GIS) y teledetección se llevaron a cabo la elaboración de casos prácticos como la evaluación de pérdida de suelo por erosión y el análisis de revegetación de una zona afectada tras un incendio utilizando índices de vegetación y Softwares específicos como QGIS, SNAP y ArcGis. La realización de estos casos prácticos mediante estas técnicas geomáticas y el empleo de estos programas permitieron comprobar la eficacia de éstas y su importancia en la conservación del medio ambiente.
- *Caracterización de los elementos físicos del hábitat (CEFH)*. La asignatura permitió conocer técnicas e instrumentos de análisis de la composición geoquímica-física como técnicas de microscopía electrónica o técnicas espectroscópicas para la determinación y caracterización de los elementos físicos que conforman el hábitat, como es la composición de minerales, etc.
- *Caracterización de los componentes bióticos del hábitat (CCBH)*. En esta asignatura se abordó el estudio de diferentes hábitats (aunque sobretudo hábitats de tipo acuático), su estructura y composición para llevar a cabo los métodos de muestreo adecuados en cada caso y aplicar los protocolos correspondientes para garantizar su conservación. En suma, se adquirieron conocimientos acerca de las técnicas de muestreo de vegetación y modelos de gestión de hábitats. Mientras que, en cuanto a fauna, se vieron las diferentes técnicas de muestreo, captura y estimación de la abundancia dependiendo del tipo de especie.
- *Recursos hídricos y ecosistemas acuáticos (RHEA)*. Se estudió y abarcó la gestión de acuíferos de tipo kárstico y detrítico, además de la gestión y conservación de los humedales. Permitted evaluar la gestión de los ecosistemas acuáticos en general, la vegetación predominante de dicho ecosistemas y cómo su conservación influye en el alcance de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

- *Conservación y restauración de sistemas terrestres (CRST)*. Permitió estudiar la diversidad de impactos en el medio ambiente consecuentes por la actividad humana, así como la restauración de estos impactos. Además, se adquirieron conocimientos teóricos y técnicos sobre restauración de laderas, taludes y cárcavas que se pusieron en práctica tras las salidas al campo en la elaboración de un informe sobre la restauración y revegetación de una cárcava.

Segundo cuatrimestre

- *Explotación sostenible de suelos y agro-ecosistemas (ESSA)*. La asignatura permitió abordar métodos de evaluación sobre la calidad de los suelos, primordialmente, así como diferentes procesos de degradación que afectan a los suelos de manera relevante debido a la agricultura. También se estudiaron diversas técnicas de restauración y rehabilitación de los suelos degradados.

- *Modelización de la distribución potencial de especies y hábitats (MDPE)*. Se analizaron modelos de distribución potencial de especies de flora y fauna, realizando un caso práctico sobre la distribución y abundancia del Pinzón Azul (*Fringilla teydea*) empleando los softwares QGIS y Rstudio (estadística) para llevar a cabo el análisis de la especie y su distribución a nivel global.

- *Restauración de impactos asociados a la explotación de recursos geológicos (RIAE)*. Se adquirieron conocimientos teóricos sobre la explotación de recursos geológicos, además de diferenciar conceptos clave, conocer la distribución de los recursos, y los impactos que acarrea consigo su explotación. Estos conocimientos se pusieron en práctica en las salidas de campo realizadas al Distrito Minero de Linares-La Carolina, en donde dichos conocimientos se vieron enriquecidos por las observaciones en campo y análisis de los casos prácticos planteados.

- *Geomorfología fluvial y análisis de inundaciones (GFAI)*. Esta asignatura permitió analizar la dinámica fluvial de las inundaciones y realizar predicciones espacio-temporales para evaluar el riesgo de inundación. Los conocimientos de dicha asignatura se pusieron en práctica tanto en campo como con el empleo del software Iber simulando y analizando dos inundaciones ocurridas en el tramo del cauce de la Presa de Marmolejo.

- *Riesgos asociados a la dinámica terrestre (RADT)*. Se estudiaron diversos riesgos naturales y su relación con la actividad antrópica, abordando principalmente riesgos asociados a la dinámica de costas y el riesgo de deslizamiento de laderas. También se evaluaron, a raíz de estos riesgos, la aplicación de respuesta de emergencia y prevención.

- *Explotación sostenible del patrimonio geológico (ESPG)*. En la asignatura se estudiaron formaciones geológicas y su valorización para su geoconservación. También se enriquecieron los conocimientos adquiridos mediante las observaciones realizadas en campo a formaciones geológicas de interés en la provincia de Jaén, así como la realización de su análisis y catalogación como Lugares de Interés Geológico (LIG).

CURRICULUM VITAE

Formación académica

- Grado en Ciencias Ambientales por la Universidad de Jaén (2016-2021)

Experiencia

- Prácticas en el Departamento de Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos de la Universidad de Jaén (1 mes), en análisis y evaluación de energía renovables en Andalucía.
- Prácticas (Beca Ícaro) en el Instituto Universitario de Investigación en el Olivar y Aceites de Oliva (Universidad de Jaén).

Formación complementaria

- Curso de Gestión de Residuos, Reciclaje y Educación Ambiental (Programa Recapacila, 2021) a través de la Universidad de Jaén.
- Curso (inglés) International Workshop: Ecohydrology to face future environmental and societal challenges, por la Universidad Internacional de Andalucía (UNIA) en Baeza.
- Curso de Gestión de Residuos y Retos y Oportunidades de la Economía Circular (Programa Recapacila, 2021) por la Universidad de Jaén.

Idiomas

- Español: Nativo
- Inglés: B2 (Aptis Certificate)

Conocimientos informáticos:

- Manejo de software: Excel, Word y PowerPoint (avanzado); QGIS y ArcGIS (medio y autodidacta); RStudio y Statgraphics, SNAP (básico).