



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Centro de Estudios de Postgrado

Trabajo Fin de Máster

CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA EN OLIVARES SOSTENIBLES Y CONVENCIONALES DE ANDALUCÍA: FRACCIONAMIENTO HÚMICO Y SU IMPORTANCIA EN LA FIJACIÓN DE CARBONO.

Alumno/a: Villatoro Rodríguez, Fidela

Tutor/a: Julio Antonio Calero González
Roberto García Ruíz

Dpto: Departamento de Edafología

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

**CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA
ORGÁNICA EN OLIVARES SOSTENIBLES
Y CONVENCIONALES DE ANDALUCÍA:
FRACCIONAMIENTO HÚMICO Y SU
IMPORTANCIA EN LA FIJACIÓN DE
CARBONO.**

Fdo.: _____
(alumno/a)

Fdo.: _____
(tutor/a)

Jaén, febrero, 2023

Índice

1. Introducción.....	6
1.2. Olivar sostenible.....	7
1.3. Calidad del suelo en el olivar	9
1.4. La Materia orgánica como indicador de la calidad del suelo.....	11
1.5. Materia orgánica y huella de carbono de los olivares andaluces.	13
2. Justificación.....	14
2.1. SUSTAINOLIVE: avances hacia una olivicultura sostenible	14
2.2. hacia un nuevo enfoque del olivar: Carbon Farming.....	15
3. Hipótesis.....	16
4. Objetivos.	16
5. Material y Métodos.....	17
5.1. Material.	17
5.1.1. Área de estudio.	17
5.1.2. Muestreo.....	21
5.2. Métodos	21
5.2.1. Métodos analíticos.....	21
5.2.2. Estadística.....	26
5.2.3 Modelos de Roth Carbon.	26
6. Resultados y Discusión.....	27
6.1. Resultados analíticos.	27
6.2. Resultados estadísticos.	37
6.3. Resultados de Roth Carbon.	39
7. Discusión.	44
8. Conclusiones	46
9. Referencias.	47

Resumen:

Uno de los principales Servicios Ecosistémicos que desempeña el olivar es el secuestro y fijación de CO₂ en el suelo a medio y largo plazo, magnitud que puede ser estimada a partir de modelos estándar como Roth Carbon. La calidad de la materia orgánica (SOM) que se aporta al suelo desde distintas fuentes (restos de poda y hoja, restos de cubierta herbácea, enmiendas orgánicas) es el parámetro más importante que regula el proceso de incorporación de carbono estable (humus) al suelo y, por tanto, de la evolución del mismo en el suelo. En el presente trabajo, se han muestreado 12 suelos de fincas de olivar convencionales y sus equivalentes sostenibles, en los que se aplican distintas prácticas NBS (soluciones basadas en la naturaleza), con el objetivo de determinar la composición de la SOM mediante fraccionamiento húmico (fracción húmica total (TEC), ácidos húmicos (HA), ácidos fúlvicos (FA) y huminas (HUMIN)). Partiendo de la hipótesis de que los suelos sostenibles presentan una mayor fertilidad química y capacidad de retención de CO₂, se ha comprobado que, efectivamente, las prácticas NBS incrementan de forma estadísticamente significativa ($p < 0.05$) el carbono total, TEC, HA, FA y HUMIN, así como otros nutrientes relacionados con la SOM como el nitrógeno total y el potasio asimilable. Usar TEC como dato de entrada de RothCarbon, en comparación con la estimación teórica del modelo -que calcula la fracción húmica total (HUM) como un porcentaje del carbono total- prevé valores de carbono en suelo para 2050 dispares.

Abstract:

One of the main Ecosystem Services performed by the olive grove is the sequestration and fixation of CO₂ in the soil in the medium and long term, a magnitude that can be estimated from standard models such as Roth Carbon. The quality of the organic matter (SOM) that is contributed to the soil from different sources (remains of pruning and leaves, remains of herbaceous cover, organic amendments) is the most important parameter that regulates the process of incorporating stable carbon (humus) into the soil and, therefore, its evolution in the soil. In the present work, 12 soils from conventional olive groves and their sustainable equivalents have been sampled, in which different NBS (nature-based solutions) practices are applied, with the aim of determining the composition of the SOM by humic fractionation (total humic fraction (TEC), humic acids (HA), fulvic acids (FA) and humins (HUMIN)). Starting from the hypothesis that sustainable soils have greater chemical fertility and CO₂ retention capacity, it has been verified that, indeed, NBS practices increase in a statistically significant way ($p < 0.05$) the total carbon, TEC, HA, FA and HUMIN, as well as other SOM-related nutrients such

as total nitrogen and assimilable potassium. Using TEC as RothCarbon input, compared to the theoretical estimate of the model - which calculates the total humic fraction (HUM) as a percentage of total carbon - predicts disparate 2050 soil carbon values.

Palabras clave: olivar, materia orgánica, fraccionamiento húmico, Roth Carbon

1. Introducción.

1.1. Importancia del olivar en Andalucía.

El olivar en Andalucía ha tenido gran importancia histórica en varios ámbitos de manera, siendo tal que actualmente, el 85% de la producción de aceite de oliva a nivel nacional es de origen andaluz (García-Brenes, 2012). A finales de los años cincuenta llegó a la agricultura andaluza la “revolución verde”, cambiando el paradigma tradicional y empezando a introducir fitosanitarios, mecanización, selección de variedades de oliva más productivas, etc. (Guzmán et al., 2000), pasando a un olivar mucho menos naturalizado y consumidor de combustibles fósiles (Ortega, 1983). Tras la implantación de “Plan de reestructuración y reconversión del olivar español (1972-1979)” y el “Programa de reestructuración y reconversión de las comarcas olivareras deprimidas (1981-1986)”, se eliminaron muchos olivares que no eran potencialmente productivos, siendo muchos de estos olivares erradicados los situados en zonas de montañas, cuyas condiciones físicas del suelo son de elevada pendiente y suelo pobre, siendo el olivar el único cultivo viable que, además, cumplía con importantes funciones de regulación ecológica (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1988).

La llegada de la “revolución verde” junto a la gran industrialización que los países más desarrollados, entre los que se encontraba España, provocaron que la agricultura tradicional sobre la que se basaba el olivar tradicional se viera gravemente afectada, debido al cambio en la forma de cultivar y a que gran parte de la población activa que se dedicaba al sector agrícola migrara a las grandes ciudades, donde se encontraban las industrias, en busca de mejores condiciones laborales que la precariedad que le ofrecía el trabajo en el campo.

La entrada de España en la UE (1986), hizo que la agricultura española, incluida la andaluza, se viera intervenida por la Política Agraria Comunitaria (PAC), la cual favoreció a los grandes cultivos como el olivar con medidas que fomentan la productividad del cultivo, permitiendo una subida de los salarios y que parte de la población pudiera volver a dedicarse a la agricultura. Tras casi cuatro décadas, la PAC

se han demostrado insuficiente en el plano de la sostenibilidad ambiental, ya que, debido a la “revolución verde”, el olivar se ha vuelto un cultivo mucho menos diverso y más dependiente de riego y agroquímicos, por lo que se ve gravemente comprometido el medio ambiente. Además, con el olivar tradicional había trabajo prácticamente durante todo el año, ahora el trabajo en el campo se reduce principalmente a los meses de recolección, por lo que no ofrece puestos de trabajo estables (García-Brenes, 2012).

Debido a dichas problemáticas, el rumbo de la agricultura está siguiendo de vuelta a la agricultura sostenible, haciendo que la población sea más consciente de los perjuicios que tiene la agricultura convencional que se ha estado llevando a cabo años atrás (Fernández, 2016).

1.2. Olivar sostenible.

La FAO define la agricultura sostenible como “aquella que satisface las necesidades de las generaciones presentes y futuras, respecto a la provisión de productos y servicios, mientras asegura la rentabilidad, salud ambiental y equidad económica y social” (FAO, 2019). En este sentido, la agricultura sostenible se enmarca en las prioridades de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) implementadas en la Agenda 2030 de Naciones Unidas, especialmente en los objetivos nº2 (“Hambre cero”), nº 13 (“Acción por el clima”), nº 15 (“Vida de ecosistemas terrestres”) y nº 8 (“Empleo y crecimiento económico”). En resumen, se trata de asegurar la seguridad alimentaria de los estados, al tiempo que se respetan los servicios ecosistémicos básicos, tales como la biodiversidad y el ciclo del carbono.

La sostenibilidad agrícola, por tanto, es un concepto amplio que debe manejar necesariamente todos los problemas anteriormente comentados. De esta manera, la creciente relevancia en nuestro país de la agenda 2030 y su empeño en transitar hacia un modelo de crecimiento sostenible, determinará en un futuro próximo la gestión pública y privada.

Para valorar el grado de sostenibilidad alcanzado en un sistema agrícola y así poder asesorar el grado de eficacia de las prácticas y políticas aplicadas, es necesario contar con medidas holísticas capaces de cuantificar los numerosos factores ambientales, económicos y sociales que integran la sostenibilidad agrícola. En este sentido, se han aplicado al olivar metodologías cuantitativas como la eco-eficiencia (Gómez-Limón et al., 2012) o el ANP (Analytical Network Processing) (Carmona-Torres et al., 2014), que valoran un amplio catálogo de experiencias y tecnologías que, en

distinto grado de desarrollo, arrojan resultados prometedores desde el punto de vista de la sostenibilidad, pero que sin embargo no terminan de implantarse de forma efectiva.

La sostenibilidad del olivar no está exenta de amenazas. Así es, el manejo convencional (arado profundo, extenso y frecuente, por ejemplo) al que los suelos de olivar han estado sometidos en las últimas décadas ha mermado significativamente su calidad/salud, lo que se traduce en una disminución en su capacidad a medio-largo plazo para sustentar la producción agrícola, la protección ambiental y la propia salud y bienestar humano. Actualmente, la pérdida de calidad del suelo del olivar se puede observar en los siguientes fenómenos:

- **Pérdida de la materia orgánica del suelo (SOM).** La cantidad de carbono orgánico en horizontes superficiales de suelos de olivar propios de la provincia de Jaén son inferior al 1% (concretamente en promedio del 0.68%, según Nieto et al. 2010 y el 0.88%, según Rodríguez-Martín et al., 2009), siendo estos niveles muy bajos para un suelo agrícola según los estándares europeos (Freibauer et al. 2004). Esto puede significar disminución en la fertilidad y en el contenido de nutrientes de los suelos (Castro et al., 2008), variando en la degradación estructural del suelo. Los procesos de degradación física también concurren en los suelos de olivar convencional en una pérdida de aptitud para soportar la biota del suelo, factor que afecta profundamente a los ciclos biogeoquímicos de los elementos. Algunos estudios demostraron un descenso en tasas de respiración y biomasa microbiana en olivares convencionales (Gómez et al., 2009), y una disminución significativa en la eficacia fotosintética y la regulación estomática e hídrica de olivos en cultivo convencional con respecto a olivares sostenibles (Calero et al., 2013a). Todos estos procesos pueden originar pérdida de materia orgánica del suelo (SOM).
- **Erosión del suelo.** Según el Inventario Nacional de Erosión de Suelos (INES, 2006) el 80% del olivar de Jaén presentan valores de erosión $> 10000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, y valores medios de $60.000\text{-}80.000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Estos valores son comunes en cultivos actuales, cuya actividad tiene un efecto en la erosión mucho mayor de la que pueden soportar (Gómez et al. 2003). Estos valores de erosión han podido suponer la pérdida de más de un tercio del espesor del suelo en el último siglo, lo que se traduce que en pocas décadas sufrirán una pérdida total del valor productivo de los olivares (Vanwallegghem et al., 2011).
El cambio de un sistema agrícola convencional, basado en el uso extensivo de herbicidas y en la mecanización intensiva, por uno sostenible, basado en la adopción de prácticas destinadas al incremento de materia orgánica del suelo

(SOM), al cuidado de la estructura y el control de la erosión, es algo completamente necesario, siendo la calidad del suelo la variable que es capaz de actuar como indicador de la sostenibilidad ambiental en olivares (Calero et al., 2018). En relación a esto, desde la aprobación del Pacto Verde europeo (COM(EU) 2019 Final), la adopción de medidas de restauración y rehabilitación de los servicios ecosistémicos basadas en la promoción de los ciclos y procesos naturales, lo que se denomina *soluciones basadas en la naturaleza* (Nature-based solutions, NBS), se convierte una prioridad en el campo de la acción ambiental (Faivre et al., 2017). En el campo de la agricultura, las NBS incluyen prácticas de uso común en olivar de conservación, como el empleo de cubiertas vegetales, enmiendas orgánicas, ganado y otras muchas prácticas encaminadas a resolver de forma efectiva los problemas de degradación del olivar.

1.3. Calidad del suelo en el olivar

Se entiende por calidad del suelo como la capacidad que tiene para cumplir de forma efectiva sus funciones en el ecosistema, desde la productividad de los ecosistemas hasta el soporte y protección del patrimonio cultural de la humanidad (Karlen et al., 1997). Por tanto, se entiende como la capacidad del mismo para desempeñar los servicios ecosistémicos que le son propios (Adhikari & Hartemink, 2016; Drobnik et al., 2018; Luján-Soto et al., 2020). Junto con la calidad del agua y del aire, es un parámetro clave para la sostenibilidad de los sistemas agrícolas.

El suelo es un sistema de gran complejidad, siendo muy complejo la cuantificación de su calidad en base a parámetros simples. El estudio de la calidad del suelo se lleva a cabo gracias a indicadores, los cuales son propiedades del suelo susceptibles de ser medidas y que pueden relacionarse con algunas de las funciones del suelo (Lal, 2019). Para realizar un estudio de la calidad del suelo, se dividen los parámetros en función de la calidad física, química o biológica (MacEwan & Carter, 1997) (Figura 1). Se considera que un indicador es ideal cuando cuenta con las siguientes características (MacEwan & Carter, 1997):

- Debe ser una propiedad fácil y barata de medir.
- Debe estar presente en las bases de datos de suelos disponibles (ej: cartografías edáficas).
- Debe responder bien ante las acciones humanas, sean negativas (degradación) o positivas (restauración).
- Debe relacionarse de forma unívoca con alguna función del suelo.

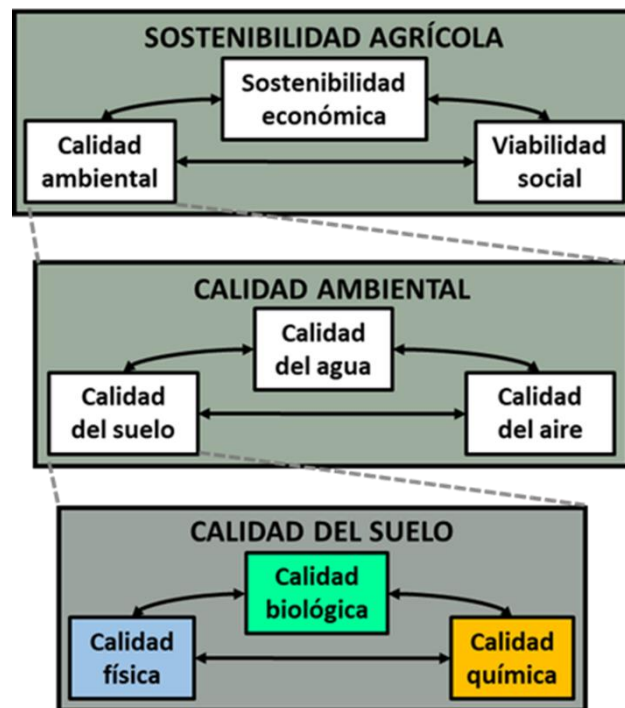


Figura 1: Calidad del suelo en el contexto de la sostenibilidad de los sistemas agrícolas.

Fuente: Calero, (2021).

El estudio de los indicadores se realiza diferenciando los distintos tipos de Calidad del Suelo, siendo estos los siguientes:

- **Calidad física del suelo.** La calidad física se entiende como la capacidad del suelo para proporcionar un ambiente físico apto para el desarrollo de raíces, lo incluyendo porosidad y estructuras adecuadas para cumplir las funciones de aireación, reserva y flujo de agua, así como la ausencia de capas endurecidas que dificulten o impidan la germinación de las semillas o el crecimiento de las raíces (Dexter, 2004). Sus indicadores son aquellos relacionados con la estructura y la porosidad, la retención de agua, flujos de agua. y propiedades mecánicas. Podemos considerar las propiedades morfológicas del suelo como un subconjunto de propiedades físicas del suelo de carácter cualitativo, no cuantitativo.
- **Calidad química del suelo.** La calidad química del suelo se entiende como la capacidad del mismo para el adecuado suministro y reciclaje de nutrientes necesarios para la vegetación y la regulación de elementos tóxicos (MacEwan & Carter, 1997). Por ello, son muy empleados propiedades como pH o la saturación de bases, y también componentes como el carbono orgánico o los nutrientes primarios.

- **Calidad biológica del suelo.** La calidad biológica del suelo se entiende como la capacidad para mantener redes tróficas sostenibles y resistentes a las alteraciones ambientales (MacEwan & Carter, 1997). Tiene interacción con la calidad física (humedad y aireación del suelo) y química (pH y nutrientes), los indicadores de la calidad biológica cuantifican la cantidad y biodiversidad en todos los aspectos, (especialmente microorganismos) del suelo, que se ha demostrado clave para el mantenimiento de cualquier otra función edáfica y ecosistémica: descomposición de la materia orgánica, síntesis de sustancias húmicas y fijación de carbono, etc. Además, los indicadores biológicos son, probablemente, los que responde más rápidamente a las perturbaciones humanas, por lo que son ideales para este fin (Paz-Ferreiro & Fu, 2016). A pesar de ello, la cuantificación de la calidad biológica del suelo es compleja de realizar por la dificultad de relacionar el valor del indicador con una determinada función del suelo o por la propia analítica en la determinación algunos de los indicadores biológicos.

1.4. La Materia orgánica como indicador de la calidad del suelo.

Se entiende como materia orgánica del suelo (SOM) a la fracción sólida de origen orgánico que forma parte del suelo, compuesto principalmente por raíces, microorganismos, humus... Es una mezcla de sustancias de origen animal y/o vegetal que constan de dinámicas propias y que están expuestas a procesos de transformación físico-químicos constantes (Weil and Brady, 2017). Se trata de la suma total del carbono orgánico presente en la fase sólida del suelo donde se encuentran restos orgánicos en distintas fases en descomposición y degradación, compuestos de síntesis microbiológica y/o bioquímica y, además, cuerpos de pequeños organismos, vivos o muertos, en su seno.

Para suelos minerales, se trata de un componente minoritario del suelo, posicionándose en torno al 3% del total del suelo (Silva, 1998), aunque este porcentaje puede variar en función del tipo de suelo, siendo en los olivares mucho menor, de en torno al 1% o incluso menos, como se comentó arriba. Es de suponer que alcanza un equilibrio dinámico en condiciones determinadas, hallando la tasa de aporte y de descomposición de la materia orgánica por mineralización. Cuando el equilibrio se alcanza, el contenido en materia orgánica no aumentará tanto como perdure en las mismas condiciones ecológicas, suponiendo que en cada tipo de suelo se encuentra un contenido de materia orgánica constante. Por tanto, la materia orgánica es un material heterogéneo y complejo, con orígenes diversos.

Actividades como pueden ser los abonados con abonos verdes, mantenimiento de cubiertas vegetales, conservación del suelo sin arar, retorno de residuos vegetales, utilización de restos orgánicos o inorgánicos en la superficie del suelo (protege de la erosión) o la utilización de estiércol hacen que se incrementen las ganancias de carbono orgánico (Johnston, 1991). Sin embargo, la erosión, el sobrepastoreo, el arado intensivo, la aplicación sólo de materiales inorgánicos o la utilización de abonos ricos en nitrógenos son actividades que promueven la pérdida de carbono orgánico en los suelos (Estrada-Herrera, 2017).

Existen factores que afectan al balance de carbono orgánico, como, por ejemplo, el clima. Cuando se alcanza una temperatura media anual predomina la destrucción de la materia orgánica por mineralización y no se acumula materia orgánica, por lo que desaparecería dicha materia orgánica, encontrándose directamente en la vegetación y no en el suelo. La textura, a mayor cantidad de partículas finas, mayor contenido a carbono orgánico y materia orgánica. En cuanto a drenaje, a peor drenaje, mayor concentración de materia orgánica en suelo debido a que peor es la aireación (Estrada-Herrera, 2017).

De acuerdo con los estudios clásicos de Kononova (1982), el humus es la fracción del suelo que representa el mayor grado de evolución, en cuanto a transformación a nivel bioquímico, del carbono edáfico. Se compone por un conjunto heterogéneo, las denominadas fracciones húmicas, cuya principal característica es presentarse como compuestos coloidales, de colores oscuros, y con distintos grados de solubilidad. En ellos no es posible reconocer ya, ni bioquímicamente, ni morfológicamente, restos de los tejidos muertos de la materia orgánica fresca (fracción no húmica). Se trata, por tanto, de una fracción propia y exclusiva del suelo, resultado de una serie de alteraciones profundas en forma de reacciones bioquímicas mediadas por los microorganismos del suelo (a veces, abióticas) y que resumen en su génesis las condiciones biológicas, físicas y químicas actuales y pasadas del mismo.

Todo lo comentado indica que el carbono orgánico del suelo, en general, y las fracciones húmicas del carbono total, en particular, pueden funcionar como indicadores de la calidad del suelo óptimos, a medio camino entre la calidad química y biológica, ya que se relacionan tanto con las características biofísicas del ambiente edáfico (microorganismos, clima, material original, topografía), como con la influencia antrópica, a cualquier nivel que consideremos (Bonifacio et al., 2018). Si bien es cierto que las fracciones húmicas no son fáciles de determinar (al menos no como el carbono orgánico), y no suelen estar presentes en las bases de datos o cartografías edáficas, su

relación con las condiciones y propiedades del suelo las convierte en indicadores muy interesantes (Sofo et al., 2022).

1.5. Materia orgánica y huella de carbono de los olivares andaluces.

La calidad de la materia orgánica y su cantidad en el suelo influyen notoriamente en las emisiones de CO₂, entre otros gases de efecto invernadero. En el suelo, el contenido de CO₂ es entre dos y tres veces superior al contenido atmosférico (Bouwman, 1990), el cual es producido por el metabolismo de la biota propia del sustrato y por las raíces de las plantas (Pérez et al., 1998), como parte del proceso de respiración aeróbica. Estos procesos forman parte de los flujos propios del ciclo del carbono, el cual se puede ver alterado por alteraciones como cambios en los usos del suelo, laboreo, deforestación... alterando las condiciones ambientales (Munson et al., 1993). Estas alteraciones hacen que se pierda el equilibrio en el ciclo de carbono, haciendo que se emita más carbono a la atmósfera como consecuencia (Houghton et al., 1983), ocurriendo lo contrario cuando se favorece la acumulación de materia orgánica (humus) en los suelos.

Estudiando los balances totales de carbono en olivares, se ha comprobado que las emisiones de CO₂ correspondientes a la respiración del suelo son las más importantes, con diferencia, de todas las salidas de carbono (Torrús-Castillo et al., *in press*). Estas pueden superar ampliamente las entradas de carbono debidas a la fotosíntesis y a la incorporación de restos de poda picados al suelo, luego pueden determinar balances negativos de carbono en una parcela agrícola (huellas de carbono positivas). Gran parte de la respiración del suelo puede atribuirse a la calidad del carbono edáfico, dado que el humus es la fracción más estable (inactiva) será la que menor estimulación genere en las poblaciones microbianas, que crecen en respuesta a sustratos con relaciones C/N mayores, menos evolucionados y más lábiles (Kononova, 1982). La calidad de la materia orgánica del suelo (SOM), pues, en cuanto a su composición húmica, va a determinar la tasa de emisión de CO₂. Así, los principales modelos empleados a nivel mundial para prever la evolución del carbono orgánico del suelo y del CO₂ emitido, como el Roth Carbon, aplican ecuaciones teóricas para determinar la ratio fracción húmica / fracción no húmica como un parámetro esencial del modelo.

Para este trabajo se utiliza el modelo Roth Carbon, el cual se utiliza para la simulación de las entradas y salidas de carbono en suelos no anegados, teniendo en

cuenta condiciones ambientales, físicas, químicas y biológicas del suelo en cuestión (tipo de suelo, cubierta vegetal, condiciones ambientales...), las cuales afectan a la absorción y emisión de CO₂. Roth Carbon utiliza intervalos de tiempo mensuales para calcular el carbono orgánico total (t ha⁻¹), el carbón 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 (Jenkinson et al., 1987; Jenkinson, 1990; Jenkinson et al., 1991; Jenkinson et al., 1992; Jenkinson y Coleman, 1994). Versiones posteriores lograron cambiar los intervalos de tiempo de mensuales a intervalos continuos (Parshotam, 1995) e incorporado un modelo mucho más amplio para simular el ciclo global de carbono (King et al., 1997).

2. Justificación

2.1. SUSTAINOLIVE: avances hacia una olivicultura sostenible

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 he disfrutado de una beca ICARO durante el curso 2021 – 2022.

El objetivo principal de SUSTAINOLIVE es el desarrollo de NBS 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 tarea importante dentro del paquete de trabajo dedicado a la producción sostenible ha sido el estudio de la calidad del suelo asociada a los distintos tipos de olivar (tradicional, intensivo, secano, regadío, etc.) y de prácticas de manejo (producción integrada, ecológica, etc.). Como se ha explicado en el apartado anterior, la caracterización cualitativa y cuantitativa de la materia orgánica del suelo (SOM) es un componente esencial en el estudio de la calidad del suelo, y esto dota de especial relevancia al estudio propuesto en el presente trabajo.

En el caso de España, como se explica con más detalle en el apartado 1.5.5 (área de estudio), se han seleccionado doce pares de parcelas de olivar, compuesto

cada uno de ellos por una parcela sostenible (i.e. acogida a producción ecológica, o que emplea NBS como cubiertas vivas) y una parcela convencional. Ambas parcelas se han seleccionado, en lo posible, bajo criterio de máxima contigüidad geográfica (a ser posible, colindantes), con el objetivo de mantener todos los factores que afecta a la calidad del suelo constantes, excepto el manejo, y poder así contrastar de forma adecuada el efecto de estas prácticas (las NBS) en cada uno de los indicadores de calidad del suelo. Entre estos indicadores se considera, obviamente, todo lo relacionado con la materia orgánica, incluyendo la determinación de las fracciones húmicas del suelo. Por esta razón, este trabajo puede considerarse como una tarea muy importante de SUSTAINOLIVE, con todas las repercusiones que ello pueda tener a nivel científico, técnico y de transferencia.

2.2. hacia un nuevo enfoque del olivar: Carbon Farming

Que la cadena agroalimentaria tiene su cuota de responsabilidad en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), y, por ende, en el cambio climático, es una realidad reconocida por la Unión Europea (Pelletier et al., 2013). Los sistemas de producción de alimentos contribuyen entre el 19.0 y 29.0 % del total de las emisiones antropogénicas de GEI (Vermeulen et al., 2012). Entre el 80 y el 86% de estas emisiones son causadas por la producción agrícola, mientras que el resto provienen de insumos necesarios para esa producción (fertilizantes, fungicidas, irrigación, insecticidas) y las actividades de procesamiento, envasado o embalaje y transporte, entre otros (Avraamides y Fatta, 2008).

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 numerosas instituciones internacionales están implementando estrategias para promocionar e incentivar que las cadenas alimentarias de productos agrícolas concretos emitan la menor cantidad posible de GEI. En este contexto, la Política Agraria Común (PAC), en su nuevo periodo de aplicación 2023 – 2027, ha experimentado un verdadero revulsivo en cuanto al peso concedido a los planteamientos agro-ambientales. Motivada por el Pacto Verde Europeo y la Estrategia de la Unión Europea 2030 para la protección del suelo (COM, 2021, 699, Final), uno de los tres principales bloques de la nueva PAC es la sostenibilidad ambiental. Esto se traduce en las medidas de la condicionalidad extendida (RD 1049/2022), obligatorias para todos los agricultores, así como los eco-regímenes (RD 1051/2022), optativos, pero de los que dependerá hasta una cuarta parte de la subvención recibida. 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 Agricultura baja en Carbono o *Carbon Farming* (MAPA 2022, página 21).

Otra de las estrategias más importantes derivadas del Pacto Verde Europeo, La Estrategia UE del campo a la mesa (*Farm to Fork Strategy*) (COM(2020), 381 final) ha lanzado recientemente una iniciativa de Carbon Farming con similar enfoque, extendida en este caso a toda la cadena agroalimentaria (desde el manejo del suelo a la gestión de residuos alimentarios), 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.

La fijación de carbono en el suelo constituye a día de hoy, por tanto, un tema transversal ambicioso, que tendrá importantes repercusiones económicas y legislativas y en el que todo el conocimiento generado en torno a esta cuestión se convertirá en información relevante y con elevada aplicabilidad en el medio socioeconómico de la Universidad de Jaén.

3. Hipótesis

La principal hipótesis del presente estudio es que las prácticas de manejo sostenibles (NBS) se relacionan con un mayor contenido de materia orgánica de los suelos, incluyendo el carbono orgánico total y las diversas fracciones húmicas del suelo, así como otras variables directamente relacionadas con la materia orgánica, como el nitrógeno total, el fósforo y el potasio asimilables o la densidad aparente. Una hipótesis secundaria de trabajo nos llevará a comprobar si el ajuste de los modelos teóricos de evolución temporal del carbono orgánico del suelo mediante los datos empíricos obtenidos, altera en alguna medida las previsiones de los mismos.

4. Objetivos.

El objetivo principal del presente estudio, establecido con el ánimo de contrastar la hipótesis de trabajo, es realizar un fraccionamiento de la materia orgánica procedente de 24 parcelas de olivares sostenibles y convencionales de Andalucía y contrastar su

relación con las prácticas de manejo. Para ello, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- 1) Muestreo de las parcelas seleccionadas a nivel de capa arable (30 cm), tomando réplicas de suelo para poder aplicar análisis estadísticos.
- 2) Análisis de propiedades clave de la fertilidad física y química del suelo: textura, densidad aparente, pH, carbono orgánico, nitrógeno y macroelementos asimilables (P y K).
- 3) Fraccionamiento de la materia orgánica según el procedimiento clásico, establecido originalmente por Kononova (modificado por Swift), para obtener las distintas fracciones húmicas: extracto húmico total soluble (TEC), ácidos húmicos (HA), ácidos fúlvicos (FA) y sustancias húmicas insolubles (huminas, HUMIN).
- 4) Análisis estadístico de los resultados, considerando como factores de variación el manejo (sostenibles –NBS- vs. convencionales) y la zona de estudio (oriental – Jaén/Granada- vs. occidental –Estepa-).
- 5) Aplicación del Software Roth Carbon para la previsión de carbono orgánico del suelo ($t\ ha^{-1}$) para 2050 en las parcelas agrupadas en cuatro escenarios: Estepa-Sostenibles, Estepa-Convencionales, Jaén/Granada-Sostenibles, Jaén/Granada-Convencionales, mediante la implementación estándar del modelo (ratio fracciones húmicas / fracciones no húmicas teórico), y para la introducción como input la fracción húmica (TEC) determinada empíricamente en laboratorio de forma previa.
- 6) Discusión de resultados, extracción de conclusiones y redacción de la memoria.

5. Material y Métodos.

5.1. Material.

5.1.1. Área de estudio.

Para la elaboración de este estudio, se seleccionaron dos zonas de muestreo: una situada en la localidad de Estepa (Sevilla) y otra en las provincias de Jaén y Granada, en la cual están integrados varios municipios. El motivo de la elección de estos dos ámbitos geográficos es establecer los dos rangos bioclimáticos más importantes del olivar Andaluz: Jaén/Granada (piso mesomediterráneo) y Estepa (piso termomediterráneo), entendiendo el primero como representativo de las comarcas del

Alto Guadalquivir y, en menor medida, de las Sierras Béticas, y el segundo como representativo del Bajo Guadalquivir.

En ambas zonas se dividen las parcelas en parcelas sostenibles (NBS) o convencionales (CON), haciendo alusión al tipo de manejo que se lleva a cabo en ellas. Las Tablas 1 y 2 resumen las características físicas y agronómicas más importantes de las parcelas. Todas estas variables pueden ayudar a conocer si las condiciones que se dan en cada finca son o no favorables para que se dé humificación en el suelo y, por tanto, que se produzca un efecto de sumidero de carbono orgánico en él. En cualquier caso, como puede observarse, la entrada de materia orgánica al sistema, principalmente en forma de cubierta vegetal, pero también (aunque no en todas las fincas sostenibles) la incorporación de enmiendas orgánicas (estiércol, compost) es la principal NBS que marca la diferencia entre olivares sostenibles y convencionales. Es importante destacar este hecho, puesto que el carbono total y húmico del suelo debería estar estrechamente relacionado con la entrada total de materia orgánica en el sistema. Además, hay algunas parcelas (DE-NBS, ES-NBS y JT-NBS) se usa alperujo a modo de abono natural, aunque la gran mayoría de las parcelas, tanto sostenibles como convencionales, hacen uso de abonos químicos. Otra gran diferencia es el uso de herbicidas, los cuales son usados en todas las parcelas de la zona de Estepa y solo en una (ES-CON) de la zona de Jaén/Granada.

Tabla 1. Características físicas y agronómicas de las parcelas sostenibles y convencionales de Jaén/Granada.

Nomenclatura de la parcela	DE-NBS	DE-CON	ES-NBS	ES-CON	PV1-NBS	PV2-NBS	PV3-CON	JT-NBS	JT-CON	CC-NBS	CC-CON
Provincia	Granada	Granada	Jaén	Jaén	Jaén	Jaén	Jaén	Jaén	Jaén	Jaén	Jaén
Localización (municipio)	Dílfones	Albolote	Úbeda	Úbeda	Villacarrillo	Villacarrillo	Villacarrillo	Pegajajar	Pegajajar	Úbeda	Baeza
Altitud (m.s.n.m.)	902	991	550	530	615	457	462	1069	934	557	368
Precipitación media anual (mm)	521.47	521.47	392.81	392.81	385.39	385.39	385.39	330	330	392.8	392.8
Temperatura media anual (°C)	14.8	14.8	16.7	16.7	16.4	16.4	16.4	17.5	17.5	16.2	16.2
Área parcela de estudio (ha)	36.97	16.11	5.69	10.09	4.36	1.70	2.79	6.94	19.65	101.74	37.09
Densidad plantación total (arb/ha)	156	143	100	100	83	100	100	150	83	70	140
Pendiente media (%)	10.34	14.79	16.47	14.72	28.95	6.86	7.10	16.83	16.72	1.80	9.80
Manejo	Sostenible	Integrado	Sostenible	Convencional	Sostenible	Integrado	Integrado	Sostenible	Integrado	Integrado	Convencional
Fertilización química (S/N/O)	Sí	Sí	NO	Sí	Sí	Sí	Sí	NO sulfato potásico	Sí	Sí	Sí
Fertilización orgánica (S/N/O)	Sí	NO	Sí	NO	NO	Sí	NO	Sí	NO	Sí/no ovejas	NO
Labranza (S/N/O)	Sí	Sí	NO	Sí	NO	NO	Sí	NO	Sí	NO	Sí
Cubierta vegetal espontánea (S/N/O)	Sí	NO	Sí	NO	Sí	Sí	NO	Sí	NO	Sí	NO
Poda (S/N/O)	Sí (bienal)	Sí (bienal)	Sí (bienal)	Sí (bienal)	Sí (bienal)	Sí (bienal)	Sí (bienal)	Sí (bienal)	Sí (bienal)	Sí (bienal)	Sí (bienal)
Restos de poda (S/N/O)	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	NO (quemada)	NO (quemada)	NO (quemada)
Granado (S/N/O)	NO	NO	Sí (caballos)	NO	NO	NO	NO	Sí (ovejas)	NO	Sí (ovejas)	NO
Estiércol (S/N/O)	NO	NO	Sí	NO	NO	NO	NO	Sí	NO	Sí	NO
Alperrujo (S/N/O)	Sí	NO	Sí	NO	NO	NO	NO	Sí	NO	NO	NO
Incorporación de hojas de almazara (S/N/O)	NO	NO	Sí	NO	Sí	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Pesticidas (S/N/O)	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	NO	NO	Sí	Sí
Herbicidas (S/N/O)	NO	NO	NO	Sí	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Tipo de suelo (WRB, 2006)	Leptosol calcáreo	Leptosol Réndico	Cambisol calcáreo	Cambisol calcáreo	Cambisol calcáreo	Flusol calcáreo	Flusol calcáreo	Cambisol calcáreo	Cambisol calcáreo	NO	NO
Erosión del suelo (irrelevante/media/alta)	Irrelevante	Medio	Irrelevante	Medio	Low	Low	Low	Low	Medium-high		

Tabla 2. Características físicas y agronómicas de las parcelas sostenibles y convencionales de Estepa.

Nombrecultura de la parcela	IS-NBS	IS-CON	CH-NBS	CH-CON	MR-NBS	MR-CON	PA-NBS	PA-CON	GA-NBS	GA-CON	CR-NBS	CR-CON
Provincia	Sevilla	Sevilla	Sevilla	Sevilla	Sevilla	Sevilla	Sevilla	Sevilla	Sevilla	Sevilla	Sevilla	Sevilla
Localización (municipio)	Estepa	Estepa	Estepa	Estepa	Estepa	Estepa	Estepa	Estepa	Estepa	Estepa	Estepa	Estepa
Altitud (m.s.n.m.)	414	412	343	335	319	320	308	326	266	264	493	492
Precipitación media anual (mm)	382.9	382.9	382.9	382.9	382.9	382.9	382.9	382.9	382.9	382.9	382.9	382.9
Temperatura media anual (°C)	17.6	17.6	17.6	17.6	17.6	17.6	17.6	17.6	17.6	17.6	17.6	17.6
Área parcela de estudio (ha)	14.09	4.03	11.77	2.66	26.04	0.55	3.17	7.92	15.49	5.85	4.68	3.1
Densidad plantación total (arb/ha)	126	100	260	236	285	357	238	333	110	160	100	56
Pendiente media (%)	6.37	6.70	4.92	5.27	3.20	4.10	1.40	6	4.40	5.20	5.30	9.70
Manejo	Integrado	Integrado	Integrado	Integrado	Integrado	Integrado	Integrado	Integrado	Integrado	Integrado	Integrado	Integrado
Fertilización química (S/NO)	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Fertilización orgánica (S/NO)	NO	NO	NO	Sí	NO	NO	NO	Sí	Sí	NO	NO	Sí
Labranza (S/NO)	NO	NO	NO	Sí	NO	NO	NO	Sí	Sí	Sí	NO	Sí
Cubierta vegetal espontánea (S/NO)	Sí	NO	Sí	NO	Sí	NO	Sí	NO	Sí	NO	Sí	NO
Poda (S/NO)	Sí (bienal)	Sí (bienal)	Sí (bienal)	Sí (bienal)	Sí (bienal)	Sí (bienal)	Sí (bienal)	Sí (bienal)	Sí (bienal)	Sí (bienal)	Sí (bienal)	Sí (bienal)
Restos de poda (S/NO)	Sí	NO (quemada)	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Ganado (S/NO)	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Estiércol (S/NO)	NO	NO	NO	Sí	NO	NO	NO	NO	Sí	NO	NO	Sí
Alperrujo (S/NO)	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Incorporación de hojas de almazara (S/NO)	NO	NO	NO	NO	Sí	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Pesticidas (S/NO)	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Herbicidas (S/NO)	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Tipo de suelo (VRB. 2006)	Cambisol calcáreo	Cambisol calcáreo	Cambisol calcáreo	Cambisol calcáreo	Cambisol calcáreo	Cambisol calcáreo	Cambisol calcáreo	Cambisol calcáreo	Cambisol calcáreo	Cambisol calcáreo	Leptosol Rándizo	Cambisol calcáreo
Erosión del suelo (irrelevante/media/hta)	Low	Low-medium	Low	Low	Low	Low	Low		Low	Low	Low	Medium

Estas diferencias en las características de las parcelas pueden favorecer o no a la formación de sustancias húmicas en el suelo, lo cual se verá si se cumple o no más adelante.

5.1.2. Muestreo.

Para la elaboración de este trabajo, se realizó un muestreo del suelo de un total de 24 parcelas (ANEXO), con 3 réplicas por parcela distribuidas en los 2 ámbitos bioclimáticos comentados. Las muestras se obtienen a una profundidad de estudio de 30 cm y se eligen de forma aleatoria con el fin de evitar sesgos en el estudio.

Para cada parcela se estudian las siguientes variables: carbono orgánico del suelo (C.O, %), nitrógeno total (N, %), fósforo asimilable (P, mg kg⁻¹ o ppm), K asimilable (K, mg kg⁻¹ o ppm), CaCO₃ equivalente (%), pH, textura, densidad aparente (D.A) de la capa arable del olivar (0-30 cm, g/cm³) y datos fraccionamiento (HA, FA, HUMIN, TEC, mg / g suelo). Para un tipo de cultivo como el olivo, la medición de la densidad aparente se hizo mediante toma de muestra inalterada con cilindros kopeki de 5 cm de altura y 5 cm de diámetro (98,175 cm³). El cilindro se posiciona en el sustrato y se cubre con una tapa de plástico, clavándolo en la tierra y cortándola con un cuchillo o similar para obtener el volumen de muestra deseado. El sustrato obtenido se conserva con precaución en una bolsa de plástico hermética, se deja secando a 105°C durante una noche, se pesa la muestra en gramos y el peso se divide entre el volumen del cilindro, obteniendo así el dato de densidad aparente para dicha muestra. La estimación de la densidad aparente (DA, g/cm³) media de la capa arable se obtuvo como el promedio de la DA obtenida de muestras tomadas a profundidades de 0-5 cm y de 15-20 cm. La DA, aparte de su valor intrínseco como indicador de la calidad del suelo, será el parámetro que nos permita convertir posteriormente los valores analíticos de CO y fracciones húmicas en t ha⁻¹, teniendo en cuenta la profundidad de 30 cm.

5.2. Métodos

5.2.1. Métodos analíticos

A. CO%, N%, P%, K%, CaCO₃ equivalente, pH y textura.

Las muestras de suelo se secaron al aire a temperatura ambiente y se pasaron por un tamiz de 2 mm para obtener los fragmentos de tierra fina (< 2 mm) y gruesos. Todos los análisis se realizaron sobre la fracción tierra fina.

El carbono orgánico del suelo (CO) se determinó digiriendo las muestras, previamente molidas en un molino de bolas, con dicromato y ácido sulfúrico, siguiendo el método propuesto por Anderson e Ingram (1993). Para otros análisis, se siguieron los procedimientos especificados por la American Society of Agronomy and Soil Science Society of America (Page et al., 1982; Klute, 1986). El nitrógeno total (N) se midió con el método de Kjeldhal. El pH (1:1 g/g) se midió por potenciometría en agua destilada. El CaCO_3 equivalente se determinó por volumetría con un calcímetro Bernard. El potasio disponible (K) se extrajo con acetato de amonio (pH 7) y se determinó con espectrómetro de ICP-masas y el fósforo disponible por extracción con bicarbonato de sodio (pH 8.5) y colorimetría por molibdato de amonio (método de Olsen). La textura del suelo se estimó por el método de la pipeta, previa eliminación de la materia orgánica con H_2O_2 y dispersión con polifosfato de sodio.

B. Fraccionamiento de Carbono.

Una vez extraída la muestra, se secan para evitar que haya humedad, se tamizan con una luz < 2mm y se sigue el procedimiento descrito por Swift, 1996.

1º Extracción de carbono orgánico.

En primer lugar, se hace una extracción del carbono orgánico añadiendo pirofosfato + NaOH 0.1M a 6 g de muestra, secándose en estufa con agitación durante 24 horas a unos 65°C. Una vez acabado este proceso, se centrifuga durante 20 min a 2500 rpm y se separa el sobrenadante (TEC) del precipitado (huminas), añadiendo a este último HCl 6M y lavándolo con H_2O . El TEC será filtrado al vacío por Sistema Sartorius Membran Filter con una bomba de vacío, quedando separado en dos botes de centrifuga de 10 mL: uno con un volumen de 10 mL de TEC que será utilizado para extraer ácidos húmicos y ácidos fúlvicos, y el volumen restante de la filtración se conserva como TEC en otro bote igual al anterior.

2º Preparación de la Columna Cromatográfica y Resina

Para preparar la resina que se utiliza en la columna cromatográfica, se mezclan 25 g/05 L H₂O de polivinilpirrolidone. Se lava y decanta 3 veces con agua del grifo y 2 con agua destilada, añadiendo al final de este proceso sulfúrico 0.005M para mantener el pH en 1-2 y para evitar que se seque. En una jeringa, se compacta en su interior lana de vidrio hasta alcanzar un volumen de 2mL y la resina irá por encima, hasta alcanzar el volumen de la jeringa de 6 mL (4 mL de resina). La jeringa se coloca en un soporte vertical, a través de la cual fluyen los fluidos, la cual se conserva cubriendo con ácido sulfúrico hasta la boquilla, y se limpia añadiendo 5 mL de NaOH 0,5M hasta que la elución salga transparente y 10 mL de ácido sulfúrico 0,0005 M para restaurar el pH de la columna.

3º Fraccionamiento del carbono orgánico extraído

A la parte destinada a la determinación de ácidos fúlvicos y húmicos se le añaden 7 gotas de H₂SO₄ con el objetivo de bajar el pH a menos de 2. Al acabar la reacción se centrifuga a 2500 rpm durante 15 min, volcando el sobrenadante en la columna y añadiendo al precipitado (ácidos húmicos) NaOH 0.5M hasta alcanzar el volumen de 10 mL, agitando para homogeneizar. Tras añadir el sobrenadante y que baje por completo la columna (eluye H₂SO₄), se añade H₂SO₄ 0.005M en series de 4,4 y 2 mL hasta que la columna vuelva a bajar por completo. Se repite la misma operación con NaOH 0.5M, recogiendo lo eluido cuando empieza a cambiar el color de transparente a amarillento-marrónáceo (ácidos fúlvicos). Para limpiar la columna, se añaden 2+5 mL de NaOH 0.5 y 5+5 mL de H₂SO₄ 0.005M para restablecer el pH.

4º Determinación de la M.O.

En esta fase final, se tiene en cuenta la siguiente tabla, teniendo en cuenta si es convencional (poca M.O.), sostenible (Intermedia cantidad de M.O.) o bosque (muchas M.O.):

Tabla 3. Cantidad de muestra a emplear en función de la M.O del suelo.

Poca M.O. (cultivo convencional)	3 ml de HA, 3 ml TEC y 3 ml FA
Intermedia cantidad de M.O. (cultivo orgánico)	2 ml de HA, 2 ml TEC y 3 ml FA
Mucha M.O. (bosque)	1 ml de HA, 1ml TEC y 3 ml FA

En el digestor se prepara un tubo para cada fracción de la muestra (FA, HA o TEC), añadiendo 5mL de dicromato potásico y 7,5mL de H₂SO₄ comercial. Meter al digestor precalentado a 155°C durante 30 min y añadir agua destilada tras enfriarse los tubos hasta que el tubo alcance un volumen de 23,5 mL. Una vez enfriado y homogeneizado, se mide una alícuota en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 600 nm y se anota la absorbancia obtenida.

La recta patrón que se utilizó en esta experiencia fue la siguiente:

Tabla 4. Datos para la recta patrón para la medida de TEC, HA y FA.

	Concentración $\mu\text{g C ml}^{-1}$	Absorbancia (600 nm)
P1	0	0
P2	0,02	0,055
P3	0,05	0,067
P4	0,1	0,195
P5	0,15	0,248
P6	0,2	0,261
P7	0,25	0,303
P8	0,5	0,58
P9	0,75	0,862
P10	1	1,357

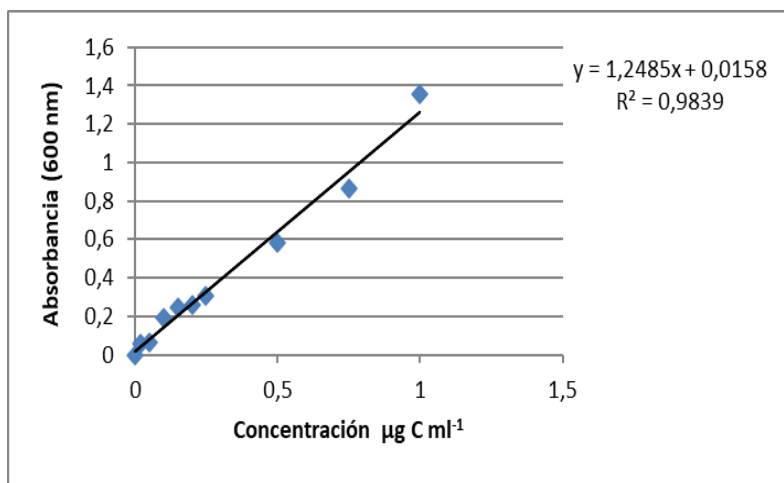


Figura 2. Recta patrón para la medida de HA, FA y TEC

En el caso de la preparación de las huminas, se eluye el sobrenadante lo máximo posible, se homogeniza y se vierte en cápsulas de porcelana para meterlas a estufa durante 24h a 60°C. Una vez secas, se cogen 300 mg de muestra pulverizada y se hace la digestión idénticamente como en el caso de FA, HA y TEC.

Tabla 5. Datos para la recta patrón para la medida de HUMIN.

	Concentración µg C ml ⁻¹	Absorbancia (600 nm)
P1	0	0,005
P2	0,02	0,072
P3	0,05	0,076
P4	0,1	0,176
P5	0,15	0,252
P6	0,2	0,282
P7	0,25	0,376
P8	0,5	0,555
P9	0,75	0,781
P10	1	1,102

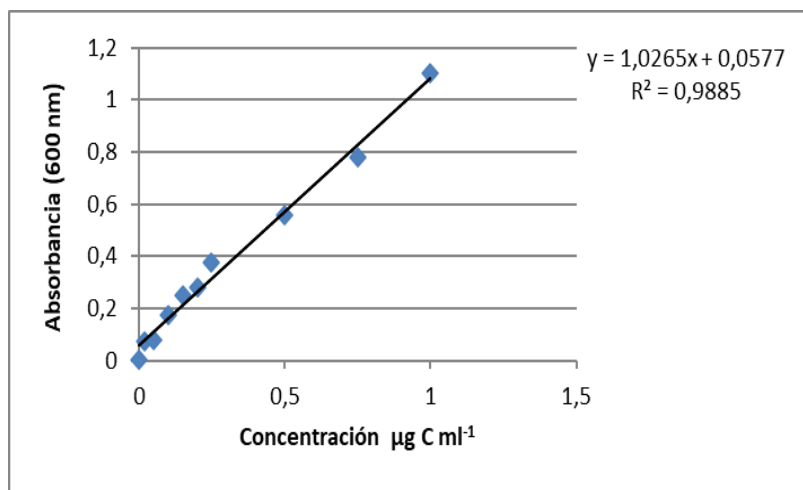


Figura 3. Recta patrón para la medida de HUMIN.

5.2.2. Estadística

Para contrastar la hipótesis de que las medias de las variables independientes (carbono orgánico, nitrógeno, fracciones húmicas, etc.) son significativamente distintas en olivares sostenibles y convencionales, se aplicará el test T-Student. Así mismo, se aplicará dicho test para conocer si hay diferencias significativas entre las dos zonas bioclimáticas del estudio, zona de Jaén/Granada (mesomediterráneo) y Estepa (termomediterráneo).

Según los valores que se obtengan tras realizar los siguientes estadísticos, se podrá concluir si dichos valores son significativos o no. Es decir, podremos saber si las variables que consideramos como variables de estudio (zona climática y tipo de manejo) influyen de manera evidente en la formación de humus y, por tanto, en la retención de carbono orgánico en el suelo y su impacto tanto en el ciclo del carbono como en el cambio climático.

5.2.3 Modelos de Roth Carbon.

Como se indicó en los apartados de Hipótesis y Objetivos, en este trabajo se pretende comprobar la variación en las salidas del programa Roth Carbon (carbono orgánico en el suelo previsto para 2050, en t/ha), en el caso de emplear como entrada los valores de la fracción húmica determinados empíricamente en el laboratorio (fracción TEC calculada mediante el procedimiento explicado en el apartado 5.2.1), frente a los supuestos por el modelo implementado en el software. En este sentido, el programa

Roth Carbon aplica un modelo dinámico que distribuye el carbono total inicial en dos fracciones: fracción lábil (DPM) y fracción resistente (RPM), dividiendo esta última en la subfracción de carbono microbiano (BIO) y subfracción de carbono húmico (HUM). A través de una matriz determinada por las entradas del modelo (clima, arcilla, etc.), para cada mes del intervalo temporal considerado, una proporción de BIO y HUM pasarán a la fracción DPM, descomponiéndose en forma de CO₂, mientras que el resto de BIO y HUM permanecen estables como RPM (la dinámica del modelo se explica detalladamente en Jenkinson y Coleman, 1994).

Además de las t/ha de TEC como fracción húmica, el modelo Roth Carbon requiere entradas climáticas (T^a media mensual, P media mensual, ETP media mensual) y edáficas (profundidad de capa arable, % de arcilla, e inputs al suelo de materia orgánica fresca como restos de cubierta o de poda, en tC ha⁻¹, a nivel mensual). Estos valores se han obtenido de García-Ruiz et al. (2020) y Torrús-Castillo et al. (comunicación personal), de manera que se han construido 4 escenarios generales, cuyos datos se exponen en forma de tablas en el punto 6.2. (*Resultados estadísticos*):

1. Estepa sostenible.
2. Estepa convencional.
3. Jaén sostenible.
4. Jaén convencional.

Para cada uno de estos escenarios se ha rodado el modelo en el intervalo temporal de 2020 (actualidad) a 2050, de la forma habitual, incluyendo el cálculo previo de la fracción húmica mediante Roth Carbon, y a partir de los datos de t h⁻¹ de TEC, manteniendo idénticas el resto de entradas del programa, de manera que se pueda contrastar: 1) la coincidencia de las t ha⁻¹ de fracción húmica inicial asignadas por de Roth Carbon (HUM) a partir del dato bruto de CO de la finca, y el TEC determinado empíricamente, y 2) las previsiones de carbono orgánico en 2050 realizadas en base a HUM (fracción húmica teórica de Roth Carbon) y TEC (fracción húmica empírica) iniciales.

6. Resultados y Discusión.

6.1. Resultados analíticos.

Tras describir brevemente el proceso metodológico analítico, los resultados de CO, N, P, K, CaCO₃ equivalente, pH, textura y densidad aparente se exponen en las Tablas 6 y Tabla 7 (los valores medios y las desviaciones estándar para estas propiedades se

incluyen más abajo, en la Tabla 12). En las tablas aparece el tipo de manejo y la localización, ya que son factores que pueden haber influenciado a los resultados de algunas de estas variables.

Se observa que los valores de carbono orgánico total (C.O.) muestran gran diferencia entre las parcelas CON (media 0,90%) y NBS (media 1,42%), siendo el dato menor en las parcelas con manejo convencional que en la que tienen un manejo sostenible, viéndose mayor diferencia en las parcelas de Estepa (la media de Estepa es 1,04%, frente a 1,37% en Jaén/Granada). Los niveles de carbono orgánico en las parcelas estudiadas son escasos -la media total de las 24 parcelas es 1,20%, lo que indica un valor moderadamente bajo, en consonancia con lo expuesto con otros trabajos en olivar (Nieto et al., 2010)-, aunque alcanza valores máximos destacables en algunas parcelas sostenibles como Juan Torres (JT) o Deifontes (DE), ambas en producción sostenible, y que se acercan al 3,00%. El nitrógeno total (N) presenta valores normales ($> 1,00\%$) en las parcelas sostenibles y bajos ($< 1,00\%$) en las convenciones. La relación CN es mayor, generalmente, en las parcelas convencionales (media de 10) que en las sostenibles (media 9), aunque esta diferencia es muy leve y se da en ambas zonas de estudio, probablemente asociada al empleo de fertilizantes nitrogenados que disminuyen tal relación.

Tabla 6. Resultados analíticos obtenidos para las parcelas de la zona de Estepa.

Parc. Biolog	Manejo	Zona	pH	CO (%)	N (%)	CN	CaCO ₃ eq.	P (ppm)	K (ppm)	Textura	DA (g cm ³)
GA-NBS1	NBS	Occiden	8,44	0,58	0,07	8	68	41	125	Fr-Arcil	1,36
GA-NBS2	NBS	Occiden	8,48	1,47	0,15	10	22	23	411	Fr-Arcil	1,14
GA-NBS3	NBS	Occiden	8,5	1,21	0,13	9	32	13	203	Arcillos	1,31
GA-CON1	CON	Occiden	8,23	1,54	0,16	10	33	14	254	Arcillos	1,33
GA-CON2	CON	Occiden	8,14	1,41	0,15	10	32	32	332	Arcillos	1,37
GA-CON3	CON	Occiden	8,14	1,65	0,14	11	26	31	516	Arcillos	1,19
PA-NBS1	NBS	Occiden	8,05	1,81	0,17	11	43	11	450	Arcillos	1,31
PA-NBS2	NBS	Occiden	8,19	1,42	0,13	11	34	6	250	Arcillos	1,29
PA-NBS3	NBS	Occiden	8,21	2,04	0,21	10	30	9	485	Fr-Arcil	1,37
PA-CON1	CON	Occiden	8,35	1,22	0,11	11	13	7	199	Arcillos	1,17
PA-CON2	CON	Occiden	8,37	1,16	0,1	11	20	11	207	Arcillos	1,33
PA-CON3	CON	Occiden	8,34	1,37	0,11	12	24	14	305	Arcillos	1,31
MR-NBS1	NBS	Occiden	8,08	1,25	0,12	11	47	10	504	Fr-Arcil	1,16
MR-NBS2	NBS	Occiden	8,26	1,12	0,1	11	45	10	457	Fr-Arcil	1,42
MR-NBS3	NBS	Occiden	8,42	1,01	0,11	10	45	12	532	Fr-Arcil	1,38
MR-CON1	CON	Occiden	8,15	1,77	0,14	13	50	18	719	Arcillos	1,44
MR-CON2	CON	Occiden	8,15	1,22	0,11	11	52	8	489	Arcillos	1,39
MR-CON3	CON	Occiden	7,94	1,46	0,12	13	49	27	782	Arcillos	1,5
CR-NBS1	NBS	Occiden	8,38	1,23	0,12	10	36	6	285	Arcillos	1,32
CR-NBS2	NBS	Occiden	8,35	0,96	0,11	9	47	9	231	Arcillos	1,45
CR-NBS3	NBS	Occiden	8,23	1	0,12	8	51	9	246	Arcillos	1,31
CR-CON1	CON	Occiden	8,64	0,97	0,07	13	78	11	133	Fr-Arcil	1,53
CR-CON2	CON	Occiden	8,68	0,61	0,05	12	95	27	145	Arcillos	1,35
CR-CON3	CON	Occiden	8,27	1,03	0,1	11	72	40	219	Fr-Arcil	1,36
CH-NBS1	NBS	Occiden	8,41	1,23	0,14	9	33	11	356	Fr-Arcil	1,29
CH-NBS2	NBS	Occiden	8,53	1,35	0,14	10	33	12	579	Fr-Arcil	1,32
CH-NBS3	NBS	Occiden	8,47	2,12	0,18	12	38	16	559	Fr-Arcil	1,21
CH-CON1	CON	Occiden	8,23	1,28	0,11	12	53	29	219	Fr-Arcil	1,37

CH-CON2	CON	Occiden	8,29	1,13	0,12	9	48	32	278	Arcillos	1,32
CH-CON3	CON	Occiden	8,32	1,22	0,11	11	53	26	239	Arcillos	1,32
IS-NBS1	NBS	Occiden	8,09	1,87	0,16	11	74	20	192	Arcillos	1,39
IS-NBS2	NBS	Occiden	8,1	1,76	0,17	10	67	26	242	Fr-Arcil	1,38
IS-NBS3	NBS	Occiden	7,98	1,64	0,15	11	77	27	192	Fr-Arcil	1,33
IS-CON1	CON	Occiden	8,16	1,03	0,09	11	81	72	188	Arcillos	1,4
IS-CON2	CON	Occiden	8,21	1,18	0,11	11	73	60	203	Arcillos	1,5
IS-CON3	CON	Occiden	8,28	1,17	0,11	11	71	59	207	Arcillos	1,49

Tabla 7. Resultados analíticos obtenidos para las parcelas de la zona de Jaén/Granada.

Parc. Biolog	Manejo	Zona	pH	CO (%)	N (%)	CN	CaCO ₃ eq.	P (ppm)	K (ppm)	Textura	DA (g cm ³)
PV1-NBS1	NBS	Oriental	8,12	2,04	0,19	11	49	25	301	Fr-Arcil	1,59
PV1-NBS2	NBS	Oriental	8,17	1,23	0,14	9	51	22	239	Arcillos	1,35
PV1-NBS3	NBS	Oriental	8,2	1,16	0,1	11	53	17	192	Fr-Arc-A	1,4
PV1-CON1	CON	Oriental	8,47	0,78	0,09	9	47	18	203	Arcillos	1,4
PV1-CON2	CON	Oriental	8,55	0,28	0,06	5	49	13	254	Arcillos	1,37
PV1-CON3	CON	Oriental	8,47	0,21	0,06	4	48	10	254	Arcillos	1,31
PV2-NBS1	NBS	Oriental	8,57	0,46	0,06	7	57	14	266	Arcillos	1,36
PV2-NBS2	NBS	Oriental	8,47	0,88	0,09	10	57	16	242	Arcillos	1,33
PV2-NBS3	NBS	Oriental	8,48	1,05	0,09	12	46	12	180	Arcillos	1,3
PV2-CON1	CON	Oriental	8,5	0,59	0,07	9	63	10	133	Arcillos	1,42
PV2-CON2	CON	Oriental	8,42	0,88	0,08	10	52	10	250	Arcillos	1,3
PV2-CON3	CON	Oriental	8,4	0,67	0,1	7	59	20	207	Arcillos	1,42
ES-NBS1	NBS	Oriental	8,33	1,36	0,17	8	33	17	1021	Arcillos	1,34
ES-NBS2	NBS	Oriental	8,36	1,25	0,16	8	35	9	626	Arcillos	1,39
ES-NBS3	NBS	Oriental	8,56	1,03	0,08	13	49	4	497	Fr-Arcil	1,19
ES-CON1	CON	Oriental	8,43	0,39	0,09	5	36	9	430	Arcillos	1,36

ES-CON2	CON	Oriental	8,4	0,74	0,11	7	33	10	504	Arcillos	1,28
ES-CON3	CON	Oriental	8,41	0,6	0,1	6	35	14	457	Arcillos	1,48
JT-NBS1	NBS	Oriental	8,42	1,9	0,2	10	46	22	411	Fr-Arcil	1,26
JT-NBS2	NBS	Oriental	8,34	2,73	0,3	9	40	78	864	Fr-Arcil	1,26
JT-NBS3	NBS	Oriental	8,43	2,11	0,22	10	39	7	289	Fr-Arcil	1,37
JT-CON1	CON	Oriental	8,8	0,3	0,03	10	83	4	23	Fr-Arcil	1,23
JT-CON2	CON	Oriental	8,52	0,24	0,05	5	66	3	109	Arcillos	1,39
JT-CON3	CON	Oriental	8,53	0,35	0,06	6	66	6	102	Arcillos	1,34
CC-NBS1	NBS	Oriental	8,42	0,57	0,06	10	33	7	289	Fr-Arc-A	1,75
CC-NBS2	NBS	Oriental	8,31	0,68	0,08	8	33	8	313	Fr-Arcil	1,56
CC-NBS3	NBS	Oriental	8,43	0,4	0,07	6	31	5	219	Fr-Arcil	1,47
CC-CON1	CON	Oriental	8,36	0,32	0,05	7	69	6	207	Arcillos	1,58
CC-CON2	CON	Oriental	8,34	0,21	0,02	9	78	6	239	Fr-Arcil	1,66
CC-CON3	CON	Oriental	8,37	0,49	0,04	11	76	7	125	Fr-Arcil	1,46
DE-NBS1	NBS	Oriental	8,15	2,75	0,26	11	15	24	364	Fr-Arcil	1,25
DE-NBS2	NBS	Oriental	8,22	2,63	0,21	12	15	23	543	Fr-Arcil	1,24
DE-NBS3	NBS	Oriental	8,27	1,83	0,18	10	28	7	352	Arcillos	1,43
DE-CON1	CON	Oriental	8,37	0,9	0,12	8	28	9	227	Arcillos	1,39
DE-CON2	CON	Oriental	8,37	0,76	0,1	8	35	7	176	Arcillos	1,41
DE-CON3	CON	Oriental	8,49	1,13	0,1	11	42	5	141	Arcillos	1,43

Los datos de fósforo (P) y potasio (K) también son ligeramente mayores en las parcelas de manejo sostenible (medias de 19 y 375 mg/kg para P y K, respectivamente) que en las de manejo convencional (medias de 16 y 268 mg/kg para P y K, respectivamente), independientemente de la zona, tendiendo ambos a ser normales o ligeramente elevados para suelos de texturas predominantemente finas (arcillosas y franco arcillosas).

En general, por tanto, se puede hablar de que el cultivo sostenible mejora la fertilidad química de los suelos de olivar, como se ha comprobado repetidas veces (Calero et al., 2018; Aranda et al., 2011).

En cuanto a otras variables edáficas, encontramos pHs con valores medios de 8,31, típicos del olivar de zonas carbonatadas (principalmente margas), como es el caso de todas las parcelas estudiadas, se trata de valores bastante representativos del olivar andaluz (Calero et al., 2018). Relacionados con el pH, los contenidos de carbonatos son altos o muy altos en todas las parcelas, siendo los valores medios ligeramente superiores en las convencionales (media 52%, frente al 43% en las sostenibles). Esta variación podría atribuirse a la erosión de los horizontes superficiales en los suelos convencionales, que dejan aflorar más directamente los horizontes cálcicos que en el caso de las sostenibles (recordemos que la profundidad de muestreo es de 30 cm). Por otra parte, no hay variación apreciable entre la zona occidental y oriental (46 y 47% de media, respectivamente). Por último, la textura, al ser una variable intrínseca del suelo o de la roca madre (poco o nada modificable por el manejo), es similar entre parcelas sostenibles y convencionales (textura arcillosa como valor modal, en ambas).

Los valores obtenidos de las distintas fracciones húmicas (TEC, HA, FA, HUMIN) se exponen en las tablas 8 y 9 (las medias según tipo de manejo se indican más abajo, en la Tabla 13). La fracción húmica total soluble (TEC) arroja medias de 0,789 mg C/100 g suelo en parcelas sostenibles, frente a 0,503 mg C/100 g suelo, diferencias que se repiten para todas las demás fracciones: HA (0,426 mg C/100 g y 0,237 mg C/100 g suelo en sostenibles y convencionales, respectivamente), HUMIN (0,100 mg C/100 g y 0,080 mg C/100 g suelo en sostenibles y convencionales, respectivamente) y FA (0,072 mg C/100 g y 0,035 mg C/100 g suelo en sostenibles y convencionales, respectivamente). Todos estos valores entran en el rango de los obtenidos por Aranda et al. (2011) en suelos convencionales y bajo producción sostenible en la zona de Sierra Mágina, en consonancia con lo que sería esperable en suelos agrícolas mediterráneos. Hay que destacar, desde el punto de vista agroecológico, que los valores de la fracción húmica se componen principalmente por ácidos húmicos, mientras que los ácidos

fúlvicos suele ser la fracción menos abundante. Esto puede explicarse por el equilibrio climático de la materia orgánica representado por las muestras de bosque de ambas zonas, en las que las relaciones cuantitativas entre las fracciones son similares (si bien, lógicamente, con mayores valores absolutos en los horizontes naturales no alterados por la agricultura), y coincide con lo comentado por Bonifacio et al. (2018).

Si atendemos a los datos del fraccionamiento húmico reflejados en las Tabla 8 y Tabla 9, pues, se puede observar que, en ambas zonas, hay una clara tendencia generalizada a que los valores de las 4 fracciones (TEC, HUMIN, HA, FA) sean mayores en las parcelas con manejo sostenible, frente a las parcelas cuyo manejo es convencional, reforzando así nuestra hipótesis de que el manejo sostenible favorece la retención de carbono húmico en el sustrato. Esta diferencia se hace más notoria en las parcelas de la zona de Jaén/Granada que en la zona de Estepa.

Tabla 8. Datos de laboratorio del fraccionamiento de carbono de Estepa (mg C / g suelo).

Parcela	Zona	TEC	HA	FA	HUMIN
GA-NBS1	Occiden	0,894	TRAZA	TRAZA	1,228
GA-NBS2	Occiden	5,945	3,131	1,233	1,196
GA-NBS3	Occiden	5,166	2,854	1,065	1,254
GA-CON1	Occiden	6,727	2,908	TRAZA	1,157
GA-CON2	Occiden	5,387	2,908	0,111	1,118
GA-CON3	Occiden	5,806	3,075	0,362	1,108
PA-NBS1	Occiden	5,492	1,950	TRAZA	1,095
PA-NBS2	Occiden	5,844	2,704	TRAZA	1,745
PA-NBS3	Occiden	10,643	3,884	0,027	1,196
PA-CON1	Occiden	4,332	1,317	TRAZA	1,014
PA-CON2	Occiden	4,332	2,791	TRAZA	0,835
PA-CON3	Occiden	4,700	2,841	TRAZA	0,874
MR-NBS1	Occiden	6,146	3,156	0,144	0,884
MR-NBS2	Occiden	4,714	1,724	0,278	0,988
MR-NBS3	Occiden	7,251	3,508	0,529	1,023
MR-CON1	Occiden	7,296	4,482	0,412	1,215
MR-CON2	Occiden	9,407	5,219	0,613	1,020

MR-CON3	Occiden	8,117	5,002	0,379	1,001
CR-NBS1	Occiden	9,085	6,146	0,680	0,737
CR-NBS2	Occiden	7,528	4,739	0,864	0,897
CR-NBS3	Occiden	8,005	4,261	0,680	0,747
CR-CON1	Occiden	5,203	3,226	0,379	0,786
CR-CON2	Occiden	3,410	1,434	0,345	0,705
CR-CON3	Occiden	13,075	3,511	0,915	0,942
CH-NBS1	Occiden	8,156	7,226	0,060	0,867
CH-NBS2	Occiden	6,045	4,035	1,601	0,988
CH-NBS3	Occiden	11,899	5,894	0,529	0,929
CH-CON1	Occiden	8,285	3,896	0,596	1,007
CH-CON2	Occiden	6,844	4,181	0,764	0,822
CH-CON3	Occiden	8,017	5,688	1,082	0,994
IS-NBS1	Occiden	10,065	4,060	1,702	1,020
IS-NBS2	Occiden	12,779	6,824	1,099	0,825
IS-NBS3	Occiden	8,457	5,065	1,266	0,906
IS-CON1	Occiden	3,394	1,116	0,245	0,731
IS-CON2	Occiden	8,302	4,231	1,149	0,728
IS-CON3	Occiden	7,414	4,549	0,797	0,572

Tabla 9. Datos de laboratorio del fraccionamiento de carbono de Jaén/Granada (mg C / g suelo).

Parcela	Zona	TEC	HA	FA	HUMIN
PV1-NBS1	Oriental	9,161	2,804	0,596	0,647
PV1-NBS2	Oriental	8,131	4,814	0,077	0,903
PV1-NBS3	Oriental	8,231	2,905	1,065	0,737
PV1-CON1	Oriental	5,102	0,245	TRAZA	0,565
PV1-CON2	Oriental	1,668	0,395	TRAZA	0,383
PV1-CON3	Oriental	2,104	TRAZA	TRAZA	0,328
PV2-NBS1	Oriental	2,729	1,774	0,848	0,523
PV2-NBS2	Oriental	3,759	2,452	1,082	0,919
PV2-NBS3	Oriental	4,085	1,648	0,412	0,676

PV2-CON1	Oriental	2,841	1,836	0,931	0,507
PV2-CON2	Oriental	3,829	2,707	1,015	0,595
PV2-CON3	Oriental	4,348	3,762	1,702	0,793
ES-NBS1	Oriental	8,030	3,859	1,065	1,030
ES-NBS2	Oriental	7,528	1,221	0,060	0,647
ES-NBS3	Oriental	4,060	2,025	0,245	0,763
ES-CON1	Oriental	3,829	0,730	0,077	0,708
ES-CON2	Oriental	3,745	2,070	0,730	0,919
ES-CON3	Oriental	3,678	1,501	0,144	0,357
JT-NBS1	Oriental	11,598	5,492	0,982	1,157
JT-NBS2	Oriental	12,050	8,683	2,573	1,923
JT-NBS3	Oriental	10,970	8,407	0,513	1,381
JT-CON1	Oriental	0,496	TRAZA	0,144	0,653
JT-CON2	Oriental	1,568	TRAZA	TRAZA	0,487
JT-CON3	Oriental	0,831	TRAZA	TRAZA	1,215
CC-NBS1	Oriental	2,930	1,497	0,161	0,208
CC-NBS2	Oriental	5,417	1,397	0,362	0,572
CC-NBS3	Oriental	2,628	1,045	0,111	0,624
CC-CON1	Oriental	1,384	0,395	0,094	0,543
CC-CON2	Oriental	1,032	0,211	TRAZA	0,653
CC-CON3	Oriental	1,853	0,328	0,044	0,435
DE-NBS1	Oriental	17,176	15,593	2,305	1,728
DE-NBS2	Oriental	21,372	12,578	2,288	1,611
DE-NBS3	Oriental	10,015	4,362	0,278	1,335
DE-CON1	Oriental	7,966	2,908	1,082	1,303
DE-CON2	Oriental	5,085	2,908	0,412	0,929
DE-CON3	Oriental	9,792	3,879	0,730	0,841

En cuanto a los datos promedio de toneladas de TEC, HA, FA, y HUMIN por hectárea para las parcelas de Jaén/Granada (Tabla 10) y Estepa (Tabla 11), se observa que

dichos valores son, generalmente, mayores en las parcelas de manejo sostenible que en las parcelas con manejo convencional, aunque haya parcelas que dicha afirmación no se cumple. Si comparamos por zonas, vemos que esta generalidad se da de forma más contundente en la zona de Jaén/Granada que en la zona de Estepa. Esto podría indicar que, quizás, el factor de variación “zona” puede estar relacionada con la formación de sustancias húmicas por algún rasgo bioclimático específico, como la temperatura media mensual (menor en la zona Jaén/Granada), o por la naturaleza de la materia orgánica añadida en una u otra zona. Además, en ambas tablas (Tabla 10 y Tabla 11), se calcula la relación HA/FA, la cual indica, en caso de ser menor de 1, una limitación en el proceso de humificación. En nuestro caso, dadas las condiciones relativamente favorables para la humificación del ambiente mediterráneo del olivar andaluz (pH básicos, presencia de calcio, y temperaturas medias moderadas o cálidas), las relaciones HA/FA son mayores de 1, a pesar de que, en muchos casos, los valores de FA son prácticamente despreciables (Traza, por debajo del límite de detección del método).

Tabla 10. Promedio de toneladas de TEC, HA, FA y HUMIN por hectárea en las parcelas de Jaén/Granada.

	t (TEC) / ha	t (HA) / ha	t (FA) / ha	t (HUMIN) / ha	HA/FA
PV1-NBS	37,039	15,008	0,009	3,277	>1
PV1-CON	12,177	1,624	0,000	1,746	>1
PV2-NBS	13,757	7,752	0,004	2,786	>1
PV2-CON	15,942	12,055	0,012	2,739	>1
ES-NBS	26,054	6,554	0,002	3,187	>1
ES-CON	16,169	1,657	0,000	2,846	>1
JT-NBS	44,933	41,247	0,046	5,786	>1
JT-CON	3,901	12,055	0,012	3,108	>1
CC-NBS	17,995	6,554	0,002	2,302	>1
CC-CON	6,607	1,657	0,000	2,577	>1
DE-NBS	62,187	41,247	0,046	6,058	>1
DE-CON	32,240	13,687	0,015	4,322	>1

Tabla 11. Promedio de toneladas de TEC, HA, FA y HUMIN por hectárea en las parcelas de Estepa.

	t (TEC) / ha	t (HA) / ha	t (FA) / ha	t (HUMIN) / ha	t (HA/FA) / ha
GA-NBS	14,762	6,158	0,005	4,674	>1
GA-CON	23,265	11,256	0,004	4,394	>1
PA-NBS	29,353	10,252	0,002	5,327	>1
PA-CON	16,967	9,945	0,000	3,438	>1
MR-NBS	23,855	10,173	0,001	3,845	>1
MR-CON	35,699	19,076	0,010	4,661	>1
CR-NBS	33,331	21,681	0,009	3,247	>1
CR-CON	30,292	12,806	0,007	3,431	>1
CH-NBS	32,847	18,917	0,015	3,542	>1
CH-CON	32,900	19,742	0,011	4,017	>1
IS-NBS	42,908	22,621	0,026	3,767	>1
IS-CON	28,221	15,058	0,012	2,964	>1

6.2. Resultados estadísticos.

Para comprobar que las diferencias de las variables analíticas son significativas en función de los factores considerados (manejo, zona), se realizaron test T de Student. En la Tabla 12 comprobamos que las medias entre tratamientos del factor manejo, descritas en el apartado anterior, son significativamente mayores entre las parcelas sostenibles que convencionales ($p < 0,05$) para todos los parámetros nutricionales del suelo: CO, N y K, excepto para el P y relación C/N, mientras que no hay diferencia significativa para el pH ni la DA. Al contrario, el contenido de carbonatos si es significativamente superior en parcelas convencionales, como se discutió arriba respecto a los valores medios.

Tabla 12. Test T-Student para diferencia de medias para el resto de variables según el manejo.

Variable	Manejo	N	Media	DS	t	Gl	p-value
pH	NBS	36	8,32	0,16	-1,194	70	0,236
	CON	36	8,36	0,17			
CO (%)	NBS	36	1,42	0,61	4,163	70	0
	CON	36	0,90	0,45			
N (%)	NBS	36	0,14	0,06	4,594	70	0
	CON	36	0,09	0,03			
CaCO ₃ eq.	NBS	36	42,56	14,61	-2,377	70	0,02
	CON	36	52,44	20,24			
CN	NBS	36	9,89	1,51	0,910	70	0,366
	CON	36	9,44	2,51			
DA (g cm ⁻³)	NBS	36	1,35	0,12	-1,420	70	0,160
	CON	36	1,39	0,10			
P (mg/kg)	NBS	36	16,33	13,28	-0,757	70	0,452
	CON	36	19,03	16,73			
K (mg/kg)	NBS	36	375	193	2,507	70	0,015
	CON	36	268	165			

Por tanto, según la estadística obtenida según los datos de laboratorio indica que, efectivamente, existe dicha relación entre el carbono del suelo y el manejo sostenible, ya que este último favorece la retención de carbono orgánico en suelo frente al manejo convencional.

Todas las fracciones húmicas determinadas, tal como se ha descrito arriba, presentan valores superiores en las parcelas sostenibles que en las convencionales (Tabla 13), siendo este efecto significativo desde el punto de vista estadístico ($p < 0.05$).

Sin embargo, al fijarnos en los resultados obtenidos tras realizar la t-student (Tabla 14) para comprobar si la zonación climática afecta a la fracción húmica y, por tanto, a la captación de carbono orgánico, vemos que los datos muestran que dicha relación no

existe entre ambas variables, por lo que se deduce que el factor climático (ver Tabla 17 y Tabla 20 con datos climáticos) no interviene en la formación de sustancias húmicas de manera significativa.

Tabla 13. Test T-Student para diferencia de medias de TEC, HA, FA y HUMIN según el factor manejo del suelo.

Variable	Manejo	N	Media	DS	t	Gl	p-value
TEC (mg C / g suelo)	NBS	36	0,789	0,410	3,402	70	0,001
	CON	36	0,503	0,293			
HA (mg C / g suelo)	NBS	36	0,426	0,321	3,098	70	0,003
	CON	36	0,237	0,177			
FA (mg C / g suelo)	NBS	36	0,072	0,072	2,514	70	0,014
	CON	36	0,035	0,053			
HUMIN (mg C / g suelo)	NBS	36	0,100	0,037	2,626	70	0,011
	CON	36	0,080	0,026			

Tabla 14. Test T-Student para diferencia de medias de TEC, HA, FA y HUMIN según el factor manejo de la zona.

Variable	Manejo	N	Media	DS	T	gl	p-value
TEC (mg C / g suelo)	Jaén	37	0,596	,0465	-1,519	72	0,133
	Estepa	37	0,736	0,319			
HA (mg C / g suelo)	Jaén	37	0,290	0,346	-1,521	72	0,133
	Estepa	37	0,391	0,205			
FA (mg C / g suelo)	Jaén	37	0,057	0,074	0,039	72	0,969
	Estepa	37	0,057	0,068			
HUMIN (mg C / g suelo)	Jaén	37	0,084	0,042	-1,498	72	0,139
	Estepa	37	0,096	0,023			

6.3. Resultados de Roth Carbon.

En las Tablas de 15 a 20 se indican los dos tipos de entradas, a escala mensual, del modelo RothCarbon, para los cuatro escenarios previstos: Estepa sostenible, Estepa convencional, Jaén/Granada sostenible, Jaén/Granada convencional. Las entradas

consisten en datos climáticos (temperatura media, precipitación media y ETP media) e inputs de materia orgánica (tipo de residuo, en el que contabilizan restos de poda y cubierta vegetal, y enmiendas orgánicas –FYM-). En la Tabla 20 se muestran las fracciones húmicas y el carbono total del suelo para 2020 (actualidad) calculadas en el laboratorio, y en la Tabla 22, finalmente, las previsiones para 2050 a partir de los datos de RothCarbon y medidos directamente en laboratorio.

Destaca la gran precisión con la que el modelo RothCarbon modeliza los contenidos iniciales de fracción húmica, en relación a los datos del laboratorio (donde HUMIN corresponde al TEC), con una desviación máxima de ± 4 t/ha (Tabla 21). Sin embargo, estas pequeñas variaciones iniciales se amplifican a lo largo de los 30 años de rodaje del modelo y se hacen relativamente dispares en 2050 (Tabla 22). Como puede observarse, la variación tanto del carbono orgánico total, como el de humus cada una de las zonas y manejos del suelo, es bastante diferente en 2050. Por lo general, las predicciones a partir de datos de laboratorio arrojan valores menores de carbono total (un 5 t C ha^{-1} menos de media que los valores del modelo), pero estos valores son muy variables, desde una diferencia de -19 t C en los olivares sostenibles de Estepa hasta $+11 \text{ t C}$ en los convencionales (donde la cantidad prevista es mayor en base a los datos de laboratorio). Estos resultados ponen de manifiesto una variación que probablemente habría que tener en cuenta a la hora de aplicar este modelo para previsión de carbono.

Tabla 15. Datos de valores medios de inputs orgánicos para las parcelas sostenibles (NBS) de Estepa.

Mes	Plant R. (t C/ha)	FYM (t C /ha)	Soil cover
Enero	0	0	0
Febrero	0,54	0	1
Marzo	0,54	0	1
Abril	0,12	0	1
Mayo	0,12	0	1
Junio	0,12	0	1
Julio	0	0	0
Agosto	0	0	0
Septiembre	0	0	0
Octubre	0	0,23	0
Noviembre	0	0	0
Diciembre	0	0	0

Tabla 16. Datos medios de inputs orgánicos para las parcelas convencionales (CON) de Estepa.

Mes	Plant R. (t C/ha)	FYM (t C /ha)	Soil cover
Enero	0	0	NO
Febrero	0,54	0	SI
Marzo	0,54	0	SI
Abril	0	0	NO
Mayo	0	0	NO
Junio	0	0	NO
Julio	0	0	NO
Agosto	0	0	NO
Septiembre	0	0	NO
Octubre	0	0	NO
Noviembre	0	0	NO
Diciembre	0	0	NO

Tabla 17. Datos climáticos medios de las parcelas de Estepa (CON y NBS).

Mes	TEMP.M.	PRECIPIT.	ETP
Enero	9,0	51	54
Febrero	10,3	48	76
Marzo	12,8	58	125
Abril	15,5	48	161
Mayo	19,6	30	225
Junio	24,2	4	283
Julio	27,1	0	315
Agosto	27,3	2	284
Septiembre	23,2	19	202
Octubre	18,6	59	137
Noviembre	12,9	64	74
Diciembre	10,3	51	56

Tabla 18. Valores medios de inputs orgánicos para las fincas sostenibles (NBS) de Jaén/Granada.

Mes	Plant R. (t C/ha)	FYM (t C /ha)	Soil cover
Enero	0	0	NO
Febrero	0,25	0	SI
Marzo	0,25	0	SI
Abril	0,97	0	SI
Mayo	0,97	0	SI
Junio	0,97	0	SI
Julio	0	0	NO
Agosto	0	0	NO
Septiembre	0	0	NO
Octubre	0	0,40	NO
Noviembre	0	0	NO
Diciembre	0	0	NO
% arcilla	41,00		

Tabla 19. Valores medios de inputs orgánicos para las fincas convencionales (CON) de Jaén/Granada.

Mes	Plant R. (t C/ha)	FYM (t C /ha)	Soil cover
Enero	0	0	NO
Febrero	0,36	0	SI
Marzo	0,36	0	SI
Abril	0,15	0	SI
Mayo	0,15	0	SI
Junio	0,15	0	SI
Julio	0	0	NO
Agosto	0	0	NO
Septiembre	0	0	NO
Octubre	0	0	NO
Noviembre	0	0	NO

Diciembre	0	0	NO
% arcilla	48,28		

Tabla 20. Datos climáticos medios de las parcelas de Jaén/Granada (CON y NBS).

Mes	TEMP.M.	PRECIPIT.	ETP
Enero	7,1	51	42
Febrero	8,6	52	61
Marzo	11,4	67	107
Abril	14,3	67	143
Mayo	18,7	46	201
Junio	24,1	17	251
Julio	27,5	9	282
Agosto	27,0	18	244
Septiembre	22,0	32	159
Octubre	17,0	45	102
Noviembre	10,6	64	52
Diciembre	8,0	55	38
ARCILLA MEDIA	45		

Tabla 21. Datos de partida (2020) de los escenarios considerados según determinación en laboratorio y a partir de modelización de RothCarbon.

DATOS DE PARTIDA (2020)			
	A partir de datos de laboratorio		A partir de datos de Modelo RothCarbon
	t C (TEC) /ha	t C/ ha	HUM (t C/ha)
Estepa sostenible	27,55	55,89	29,51
Estepa convencional	29,77	53,8	27,89
Jaén/Granada sostenible	30,1	58,63	33,66
Jaén/Granada convencional	16,17	23,38	14,51

Tabla 22. Resultados obtenidos tras la simulación de Roth Carbon para 2050, y comparativa con los valores de entrada obtenidos en laboratorio para el mismo modelo. os en laboratorio.

PREVISIÓN PARA 2050				
	A partir de datos modelo RothCarbon		A partir de datos de laboratorio	
	HUM (t C/ ha)	C org (t C ha-1)	HUM (t C/ha)	C org (t C ha-1)
Estepa sostenible	40,98	48,47	22,02	29,43
Estepa convencional	11,46	18,73	22,69	30
Jaén/Granada sostenible	43,08	60,65	38,34	52,61
Jaén/Granada convencional	17,08	22,13	14,75	19,8

7. Discusión.

Los valores de carbono total pueden verse afectados positivamente debido al aporte de cubierta vegetal, justo lo contrario de lo que ocurre con el manejo convencional y la eliminación de la cubierta por medios químicos o mecánicos propio de éste, los cuales favorecen los procesos oxidativos que reducen dichos restos vegetales (Aranda et al., 2011).

Se observa un mayor porcentaje en cuanto a secuestro de carbono orgánico en suelos cuyo manejo es sostenible, en comparación con aquellos cuyo manejo es convencional. Dicho valor de carbono orgánico secuestrado en el suelo se considera como fracción orgánica estable, ya que constan mayoritariamente de forma húmicas (Stevenson, 1994). El paso de un manejo de tipo convencional a uno de tipo sostenible, junto a la adición de restos vegetales, muestra beneficios sobre la reserva orgánica del suelo, además de garantizar otro tipo de beneficios de tipo agroalimentario al terreno, como aumento de la fertilidad, prevención de la erosión...Dicha habilidad depende de la capacidad del suelo de almacenamiento de componentes vegetales resistentes o de aumentar sustancias húmicas protectoras (Celerier et al., 2009), es decir, sustancias que son químicamente estables y que, a su vez hacen mejorar las características estructurales del suelo (Stevenson y Cole, 1999). Estos efectos pueden verse afectados por factores como el tipo de suelo, especialmente por características como la granulometría y la composición mineralógica (Parfitt et al., 1997). En el artículo realizado por Calero et al., (2022), muestra como a nivel coloidal, los suelos catalogados como “bosque” tienen mayor capacidad de retención de carbono orgánico en ellos, cosa que ocurre de igual manera con los suelos con manejo orgánico frente a aquellos con un manejo convencional.

Como hemos visto en el punto 1.4., la materia orgánica es un gran indicador de calidad de los suelos, por lo que estos datos, además de mostrar que los datos de carbono en suelo disminuyen, indica que el suelo sufrirá, como consecuencia, pérdida de calidad y cualidades beneficiosas para el suelo. Según Gallardo et al., (1982), en su novena cuestión, formula la siguiente cuestión: “¿Influye la clase de vegetación sobre la formación y calidad del humus?”. La respuesta a dicha cuestión es que sí, ya que el humus es de mejor calidad y más “complejo” cuanto más “compleja” es la vegetación que se establece sobre el suelo en cuestión. Sin embargo, como se cita anteriormente en el punto 1. y sus subpuntos, el deterioro o calidad de la materia orgánica de un suelo no solo depende de la vegetación existente, sino que también de otros factores como es el aporte de materia orgánica extra a modo de abono (vegetal o animal), pendiente, tipo de manejo... cuyos datos quedan recogidos en la Tabla 1 y Tabla 2.

Según la normativa de la UE acorde al *Carbon Farming*, los datos obtenidos muestran que las soluciones basadas en la naturaleza aplicados en las fincas con manejo sostenible no son todo lo eficientes que sería deseable, ya que los datos para el año 2050 obtenidos tanto en los modelos de RothCarbon empleando datos de laboratorio o rodados de forma habitual, indican pérdidas de carbono orgánico con el paso de los años, tanto para las parcelas con manejo sostenible como para manejo convencional, con la única excepción del escenario Jaén/Granada sostenible, en el que el modelo estándar de RothCarbon predice un ligero aumento (de 59 t/ha a 62 t/ha).

La pérdida en olivares convencionales de ambas zonas climáticas es explicable y se ha descrito en la bibliografía (Nieto et al., 2011), dado el tipo de manejo con escaso input de materia orgánica. Sin embargo, es más sorprendente la pérdida de carbono orgánico en el caso del manejo sostenible, especialmente en la zona de Estepa, donde las pérdidas en 2050 contabilizan las 8 t/ha en el modelo estándar, y casi el doble, 15 t/h, en el modelo con datos empíricos. Esta pérdida, y el comportamiento acusadamente distinto en el caso del escenario Jaén/Granada sostenible, podría ser relacionado con el escaso input total de materia orgánica en los olivares de Estepa sostenibles, 1,410 t/ha (Tabla 15), en relación con el input en Jaén/Granada, 3,801 t/ha (Tabla 18), especialmente, en lo que refiere a la cubierta vegetal (inputs de abril, mayo y junio). Esto nos lleva a concluir que no todas las cubiertas vegetales presentan una cobertura o desarrollan una biomasa suficiente como para compensar la pérdida de carbono del suelo por la respiración microbiana. Como indican Torrús-Castillo et al. (2022), sería necesario establecer un mínimo de porcentaje de cubierta por ha en la finca como para que se produzca fijación neta de carbono.

En cualquier caso, la tendencia general si comparamos los modelos estándar con los que emplean el TEC es que la disminución es aún más importante en estos

últimos. Esto podría aconsejar una cierta precaución a la hora de aplicar RothCarbon, y la conveniencia de determinar de forma empírica la fracción húmica del suelo.

8. Conclusiones

Tras la realización de este trabajo, podemos sacar las siguientes conclusiones:

- Tanto los datos de laboratorio como los obtenidos con las simulaciones en Roth Carbon muestran indicios de que el manejo sostenible favorece el secuestro de carbono orgánico frente al manejo convencional.
- Teniendo en cuenta las características físicas y de manejo, los resultados analíticos, de fraccionamiento y las tablas promedio de toneladas por hectárea de FA, HA, TEC y HUMIN, se llega a la conclusión de que el manejo es un factor predominante en la formación de sustancias húmicas.
- El estudio estadístico evidencia diferencias significativas de secuestro de carbono en cuanto a manejo, pero no en cuanto a la variable climática. Tanto el carbono orgánico total, como todas las fracciones del humus (HA, FA, TEC, HUMIN) y los nutrientes (nitrógeno y potasio), muestran contenidos significativamente superiores en suelos sostenibles donde se han aplicado NBS.
- Los resultados obtenidos por Roth Carbon muestran pérdidas de carbono en suelo a medio-largo plazo (2050), por lo que las prácticas llevadas a cabo en los cuatro escenarios, tanto sostenibles como convencionales, son insuficientes para compensar la emisión de CO₂ por el suelo.
- Las parcelas para ambos tipos de manejo de Estepa no se diferencian tanto entre ellas como las parcelas para ambos manejos de Jaén/Granada, posiblemente por la actividad de abonado e introducción de ganado en el cultivo que se lleva a cabo en algunas fincas de Jaén/Granada, y no en Estepa.
- Se concluye que una cubierta vegetal de calidad es un factor fundamental en el secuestro de carbono en cultivos olivareros.
- En el contexto de las recomendaciones de la UE para conseguir una fijación neta de CO₂ en el olivar, se debería insistir en una mayor aplicación de inputs de carbono, sea dejando mayores extensiones de cubierta, sea aplicando mayores cantidades de enmienda orgánica, en el suelo.

9. Referencias.

- Adhikari, K. & Hartemink, A.E., (2016). Linking soils to ecosystem services: A global review. *Geoderma* 262, 101-111.
- Anderson, J. & Ingram, J., (1993). Soil organic matter and organic carbon. *Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods*, pp 171-221. Oxford, UK: CAB International.
- Aranda, V., Ayora-Cañada, M. J., Domínguez-Vidal, A., Martín-García, J. M., Calero, J., Delgado, R., & González-Vila, F. J. (2011). Effect of soil type and management (organic vs. conventional) on soil organic matter quality in olive groves in a semi-arid environment in Sierra Mágina Natural Park (S Spain). *Geoderma*, 164(1-2), 54-63.
- Avraamides, M. & Fatta, D., (2008). Resource consumption and emissions from olive oil production: a life cycle inventory case study in Cyprus. *J. Clean. Prod.* 16, 809-821.
- Bonifacio, E., D'Amico, M., Catoni, M. & Stanchi, S., (2018). Humus forms as a synthetic parameter for ecological investigation. Some examples in the Ligurian Alps (North-Western Italy). *Applied Soil Ecology* 123, 568 – 571.
- Bouwman, A. F. (1990). Soils and the greenhouse effect.
- Calero, J., Aranda, V. Montejo-Ráez, A. & Martín-García J.M., (2018). A new soil quality index based on morpho-pedological indicators as a sitespecific web service applied to olive groves in the Province of Jaen (South Spain). *Computers and Electronics in Agriculture*, 146, 66-76.
- Calero, J., Cordovilla, M. P., Aranda V., Borjas, R. & Aparicio, C. (2013a). Effect of Organic Agriculture and Soil Forming Factors on Soil Quality and Physiology of Olive Trees. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 37, 193-214.
- Calero, J., Plaza, I., Ontiveros, A., Aranda, V., & García-Ruiz, R. (2022). Effects of Organic Agriculture in Structure and Organic Carbon Adsorption at Colloidal Scale in Marginal Olive Groves, Characterized by the Extended DLVO Model. *Frontiers in Environmental Science*, 143.

Carmona-Torres, C., Parra-López, C., Sayadi, S. & Chirisa-Ríos, M., (2014). A public/private benefits framework for the desing of polices oriented to Sustainability in agricultura: An application to olive growing. *Land Use Policy* 58, 54 – 69.

Castro, J., Fernández-Ondoño, E., Rodríguez, C., Lallena, A.M., Sierra, M. & Aguilar, J. (2008). Effects of different olive-grove management systems on the organic carbon and nitrogen content of the soil in Jaén (Spain). *Soil & Tillage Research* 98, 56–67.

Celerier, J., Rodier, C., Favetta, P., Lemee, L., & Amblès, A. (2009). Depth-related variations in organic matter at the molecular level in a loamy soil: reference data for a long-term experiment devoted to the carbon sequestration research field. *European journal of soil science*, 60(1), 33-43.

COM/2019/640 final. Estrategia de la granja a la mesa. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones, 20-05-2020.

COM/2019/640 final. *Estrategia de la UE 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, 17-12-2021.

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, 2020.

COM/2021/699 final. *Estrategia de la UE 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, 2021.

Dexter, A.R. (2004). Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120, 201–214.

Drobnik, T., Greiner, L., Keller, A. & Gret-Regamey, A. (2018). Soil quality indicators: From soil functions to ecosystem services. *Ecological Indicators* 94, 151 – 169.

Duchaufour, P., 1977. Pédogenèse et Classification. : Pédologie, 1. Masson, Paris.

Estrada-Herrera, I. R., Hidalgo-Moreno, C., Guzmán-Plazola, R., Almaraz Suárez, J. J., Navarro-Garza, H., & Etchevers-Barra, J. D. (2017). Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*, 51(8), 813-831.

Faivre, N., Fritz, M., Freitas, T., Boissezon, B. & Vandewoestikje, S., (2017). *Nature-Based Solutions in the EU: innovating with nature to address social, economic and environmental challenges*. *Environmental Research* 159, 509 – 518.

FAO (2019). El estado mundial de la agricultura y la alimentación. *Progresos en la lucha contra la pérdida y el desperdicio de alimentos*. Roma.

Fernández, D. (2016). *Las redes sociales como oportunidad de comercialización de los productos ecológicos*. Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Sociales y Jurídicas de la Universidad de Jaén, Jaén.

Freibauer, A., Rounsevell, D.A., Smith, P. & Verhagen, J. 2004. Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. *Geoderma* 122, 1 –23.

Gallardo, J. F., González Hernández, M. I., & Pérez García, C. (1982). *La materia orgánica del suelo. Su importancia en suelos naturales y cultivados*. Instituto de Orientación y Asistencia Técnica del Oeste.

García-Brenes, M. (2012). Incidencia de la política agraria de la Unión Europea en la sostenibilidad del cultivo del olivar en Andalucía, España. *Cuadernos de desarrollo rural*, 9(68), 87-103.

García-Ruiz, R., Aranda, V., Calero, J., García-Reina, R., Rodríguez-Caballero, E., Marchán, L., & García-Reina, R., (2020). El Carbono en los olivares de Estepa. *Consejo Regulador de la DOP de Estepa*, Sevilla. 84 pp.

Gómez-Limón, J.A., Picazo-Tadeo, A.J., & Reig-Martínez, E., (2012). Eco-efficiency assessment of olive farms in Andalusia. *Land Use Policy* 29, 395 – 406.

Gómez J.A., Battany M, Renschler CS, & Fereres E. (2003). Evaluating the impact of soil management on soil loss in olive orchards. *Soil Use and Management* 19, 127-134.

Gómez, J.A., Sobrinho, T.A., Giráldez, J.V. & Fereres, E. (2009). Soil management effects on runoff, erosion and soil properties in an olive grove of Southern Spain. *Soil & Tillage Research* 102, 5–13.

Guzmán Casado, G. I., González de Molina Navarro, M., & Sevilla Guzmán, E. (2000). *Introducción a la agroecología como desarrollo rural sostenible*. Ediciones Mundi-Prensa.

Houghton, R. A., Hobbie, J. E., Melillo, J. M., Moore, B., Peterson, B. J., Shaver, G. R., & Woodwell, G. M. (1983). Changes in the Carbon Content of Terrestrial Biota and Soils between 1860 and 1980: A Net Release of CO₂ to the Atmosphere. *Ecological monographs*, 53(3), 235-262.

INES, Inventario Nacional de Erosión de Suelos. (2006). Provincial de Jaén, escala 1:250.000. *Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente*, Madrid, 398 pp.

Jenkinson, D.S. (1990). The turnover of organic carbon and nitrogen in soil. *Philosophical transactions of the Royal Society, B*. 329, 361-368.

Jenkinson, D.S., Adams, D.E. & Wild, A. (1991). Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming. *Nature*, 351(6322), 304-306.

Jenkinson, D.S. & Coleman, K. (1994). Calculating the annual input of organic matter to soil from measurements of total organic carbon and radiocarbon. *European Journal of Soil Science*, 45, 167-174.

Jenkinson, D.S., Harkness, D.D., Vance, E.D., Adams, D.E. & Harrison, A.F. (1992). Calculating net primary production and annual input of organic matter to soil from the amount and radiocarbon content of soil organic matter. *Soil Biology & Biochemistry* 24(4), 295-308.

Jenkinson, D.S., Hart, P.B.S., Rayner, J.H. & Parry, L.C. (1987). Modelling the turnover of organic matter in long-term experiments at Rothamsted. *INTECOL Bulletin* 15, 1-8

Johnston, A. E. (1991). Soil fertility and soil organic matter. *Advances in soil organic matter research: The impact on agriculture and the environment. The Royal Society of Chemistry, Melksham, Wiltshire*, 299-314.

Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F., & Schuman, G. E. (1997). Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), 4-10.

Kononova, M. (1982). Materia orgánica del suelo: su naturaleza, propiedades y métodos de investigación. en español. *Editorial Oikos-Tau, SA Barcelona. España*.

King, A.W., Post, W.M. & Wullschleger, S.D. (1997). The potential response of terrestrial carbon storage to changes in climate and atmospheric CO₂. *Climatic Change*, 35, 199-227.

Klute, A., & Dirksen, C. (1986). Methods of Soil Analysis, American Society of Agronomy, Inc. *Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin. USA*, 635-686

Lal, R., (2019). Accelerated soil erosion as a source of atmospheric CO₂. *Soil Tillage & Research* 188, 35-40.

Luján-Soto, R., Cuéllar-Padilla, M. & de Vente, J. (2020). Participatory selection of soil quality indicators for monitoring the impact of regenerative agricultura on ecosystem services. *Ecosystem Services* 45, 101-157.

MacEwan, R. J., & Carter, M. R. (1996). Soil Quality is in the Hands of the Land Manager. In Proceedings of an international symposium. *Advances in soil quality for land management: science, practice and policy* (17-19).

MAPA, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2022. *El Plan Estratégico de la PAC de España (2023 – 2027)*.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (1988). *El olivar español. Planes de reestructuración y reconversión*. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación

Munson, A. D., Margolis, H. A., & Brand, D. G. (1993). Intensive silvicultural treatment: impacts on soil fertility and planted conifer response. *Soil Science Society of America Journal*, 57(1), 246-255.

Nieto, O. M., Castro, J., Fernández, E. & Smith, P. (2010). Simulation of soil organic carbon stocks in a Mediterranean olive grove under different soil-management systems using the Roth Carbon model. *Soil Use and Management* 26, 118–125.

Ortega Cantero, N. (1983). El proceso de mecanización y adaptación tecnológica del espacio agrario español (Le processus de mécanisation et d'adaptation technologique de l'espace agricole espagnol). *Agricultura y sociedad*, (27), 81-149.

Page, A. L., Miller, R. H., & Keeney, D. R. (1982). Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Agronomy, No. 9. *Soil Science Society of America, Madison, WI*, 1159.

Parfitt, R. L., Theng, B. K. G., Whitton, J. S., & Shepherd, T. G. (1997). Effects of clay minerals and land use on organic matter pools. *Geoderma*, 75(1-2), 1-12.

Parshotam, A., Tate, K.R. & Giltrap, D.J. (1995). Potential effects of climate and land use change on soil carbon and CO₂ emissions from New Zealand's indigenous forests and unimproved grasslands. *Weather and climate* 15, 3-12.

Paz-Ferreiro, J. & Fu, S., (2016). Biological índices for soil quality evaluation: perspectives and limitations. *Land Degradation & Development* 27, 14 – 25.

Pelletier N, Ibarburu M, & Xin H. (2013). A carbon footprint analysis of egg production and processing supply chains in the Midwestern United States. *J Clean Prod*; 54, 108–14.

Pérez Batallón, P., Ouro, G., Merino, A., & Macías, F. (1998). Descomposición de materia orgánica, biomasa microbiana y emisión de CO₂ en un suelo forestal bajo diferentes manejos selvícolas. *Edafología*, 5, 83-93.

Real Decreto 1049/2022, de 27 de diciembre, por el que se establecen las normas para la aplicación de la condicionalidad reforzada y de la condicionalidad social que deben cumplir las personas beneficiarias de las ayudas en el marco de la Política Agrícola Común que reciban pagos directos, determinados pagos anuales de

desarrollo rural y del Programa de Opciones Específicas por la Lejanía y la Insularidad (POSEI). *Boletín Oficial del Estado*, 312, 29 de diciembre de 2022.

Real Decreto 1051/2022, de 27 de diciembre, por el que se establecen normas para la nutrición sostenible en los suelos agrarios. *Boletín Oficial del Estado*, 312, 29 de diciembre de 2022.

Rodríguez-Martín, J.A., López-Arias, M. & Grau-Corbí, J.M., (2009). Metales Pesados, materia orgánica y otros parámetros de los suelos agrícolas y pastos de España. INIA, Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, Madrid.

Silva, A. (1998). La materia orgánica del suelo. *Montevideo: Facultad de Agronomía*. 34p.

Sofo, A., Zanella, A. & Ponge, J.F., (2022). Soil Quality and fertility in sustainable agriculture, with contribution to the biological classification of agricultural soils. *Soil Use and Management*.

Stevenson, F.J., 1994. Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions. Wiley, NY

Stevenson, F.J., Cole, M.A., 1999. Soil carbon budgets and role of organic matter in soil fertility. In: Stevenson, F.J., Cole, M.A. (Eds.), *Cycles of Soil*. Wiley, NY, pp. 46–77.

Swift, R. S. (1996). Organic matter characterization. *Methods of soil analysis: Part 3 chemical methods*, 5, 1011-1069.

Vermeulen, S.J., Campbell & B.M. Ingram, J.S.I. (2012). Climate change and food systems. *Annu Rev Environ Resour*; 37, 195–222.

Torrús-Castillo, M., Domouso, P., Herrera-Rodríguez, J. M., Calero, J., & García-Ruiz, R. (2022). Aboveground carbon fixation and nutrient retention in temporary spontaneous cover crops in olive groves of Andalusia. *Agricultural Diversification: Benefits and Barriers for Sustainable Soil Management*.

Vanwalleghe, T., Amate, J. I., de Molina, M. G., Fernández, D. S., & Gómez, J. A. (2011). Quantifying the effect of historical soil management on soil erosion rates in

Mediterranean olive orchards. *Agriculture, ecosystems & environment*, 142(3-4), 341-351.

Weil, R.R. & Brady N.C., (2017). *The Nature and Properties of Soils* -15th edition. Pearson. Essex, 624 pp.

ANEXO: INVENTARIO DE PARCELAS DE ESTUDIO.

ZONA OCCIDENTAL

La Isabelita

	Código de la parcela: IS_CON	Coordenadas: 332956,4131652 Tipo de manejo: Convencional Piso bioclimático: Termomediterráneo Municipio: Estepa (Sevilla)
	Código de la parcela: IS_NBS	Coordenadas: 332956,4131675 Tipo de manejo: Sostenible Piso bioclimático: Termomediterráneo Municipio: Estepa (Sevilla)

Camino Real

	Código de la parcela: CR_CON	Coordenadas: 326966,4131808 Tipo de manejo: Convencional Piso bioclimático: Termomediterráneo Municipio: Estepa (Sevilla)
	Código de la parcela: CR_NBS	Coordenadas: 326352,4132253 Tipo de manejo: Sostenible Piso bioclimático: Termomediterráneo Municipio: Estepa (Sevilla)

Gallo

	Código de la parcela: GA_CON	Coordenadas: 329288,4133196 Tipo de manejo: Convencional Piso bioclimático: Termomediterráneo Municipio: Estepa (Sevilla)
	Código de la parcela: GA_NBS	Coordenadas: 328648,4133864 Tipo de manejo: Sostenible Piso bioclimático: Termomediterráneo Municipio: Estepa (Sevilla)

Marta la Reguera

	Código de la parcela: MR_CON	Coordenadas: 336897,4132208 Tipo de manejo: Convencional Piso bioclimático: Termomediterráneo Municipio: Estepa (Sevilla)
	Código de la parcela: MR_NBS	Coordenadas: 336710,4132716 Tipo de manejo: Sostenible Piso bioclimático: Termomediterráneo Municipio: Estepa (Sevilla)

La Palma

	Código de la parcela: PA_CON	Coordenadas: 330917,4133703 Tipo de manejo: Convencional Piso bioclimático: Termomediterráneo Municipio: Estepa (Sevilla)
	Código de la parcela: PA_NBS	Coordenadas: 330676,4134584 Tipo de manejo: Sostenible Piso bioclimático: Termomediterráneo Municipio: Estepa (Sevilla)

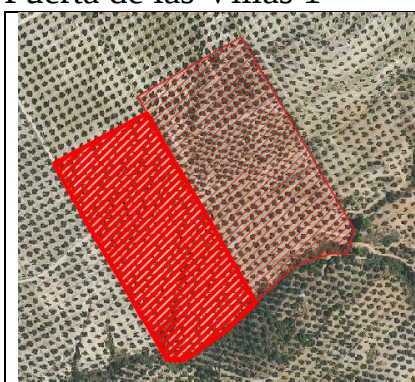
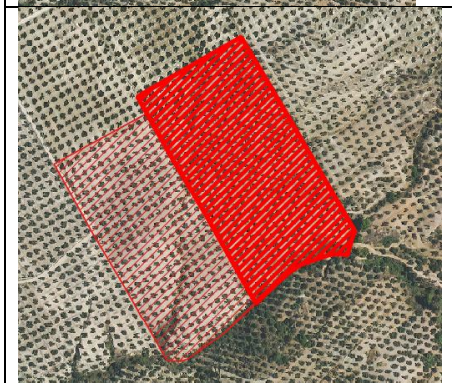
El Chaparral

	Código de la parcela: CH_CON	Coordenadas: 335483,4133197 Tipo de manejo: Convencional Piso bioclimático: Termomediterráneo Municipio: Estepa (Sevilla)
---	--	--

	Código de la parcela: CH_NBS	Coordenadas: 335535,4133143 Tipo de manejo: Sostenible Piso bioclimático: Termomediterráneo Municipio: Estepa (Sevilla)
---	--	--

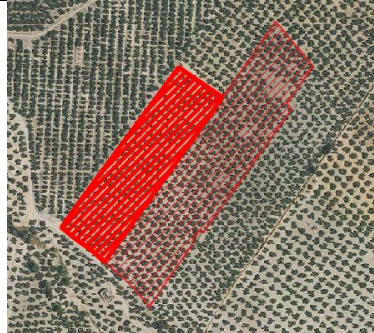
ZONA ORIENTAL

Puerta de las Villas 1

	Código de la finca: PV1_CON	Coordenadas: 497700,4211462 Tipo de manejo: Convencional Piso bioclimático: Mesomediterráneo Municipio: Villacarrillo (Jaén)
	Código de la finca: PV1_NBS	Coordenadas: 497847,4211666 Tipo de manejo: Sostenible Piso bioclimático: Mesomediterráneo Municipio: Villacarrillo (Jaén)

Puerta de las Villas 2

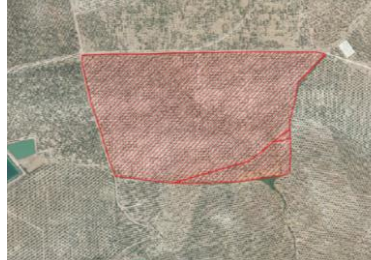
	Código de la finca: PV2_CON	Coordenadas: 494610,4210513 Tipo de manejo: Convencional Piso bioclimático: Mesomediterráneo Municipio: Villacarrillo (Jaén)
---	---------------------------------------	---

	Código de la finca: PV2_NBS	Coordenadas: 494545,4210535 Tipo de manejo: Sostenible Piso bioclimático: Mesomediterráneo Municipio: Villacarrillo (Jaén)
---	---------------------------------------	---

Juan Torres

	Código de la finca: JT_CON	Coordenadas: 444753,4178242 Tipo de manejo: Convencional Piso bioclimático: Supramediterráneo Municipio: Pegalajar (Jaén)
	Código de la finca: JT_NBS	Coordenadas: 445729,4178728 Tipo de manejo: Sostenible Piso bioclimático: Supramediterráneo Municipio: Pegalajar (Jaén)

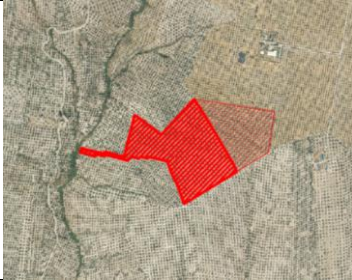
Castillo Canena

	Código de la finca: CC_CON	Coordenadas: 478443,4197107 Tipo de manejo: Convencional Piso bioclimático: Mesomediterráneo Municipio: Baeza (Jaén)
	Código de la finca: CC_NBS	Coordenadas: 480526,4195881 Tipo de manejo: Sostenible Piso bioclimático: Mesomediterráneo Municipio: Úbeda (Jaén)

Deifontes

	Código de la finca: DE_CON	Coordenadas: 443252,4137650 Tipo de manejo: Convencional Piso bioclimático: Mesomediterráneo Municipio: Albolote (Granada)
	Código de la finca: DE_NBS	Coordenadas: 443846,4137635 Tipo de manejo: Sostenible Piso bioclimático: Mesomediterráneo Municipio: Deifontes (Granada)

Espíritu Santo

	Código de la finca: ES_CON	Coordenadas: 472123,4203977 Tipo de manejo: Convencional Piso bioclimático: Mesomediterráneo Municipio: Úbeda (Jaén)
	Código de la finca: ES_NBS	Coordenadas: 472347,4204115 Tipo de manejo: Sostenible Piso bioclimático: Mesomediterráneo Municipio: Úbeda (Jaén)

Resumen de las asignaturas cursadas

77012001 Métodos avanzados de análisis de datos ambientales	EX2	Notable	7,7
77012002 Técnicas geomáticas aplicadas al medio natural (GIS, teledetección y cartografía geoambiental)	OR1	Notable	8,4
77012003 Recursos hídricos y ecosistemas acuáticos	EX2	Notable	7,2
77012004 Conservación y restauración de sistemas terrestres	OR1	Aprobado	6,2
77012005 Caracterización de los componentes físicos del hábitat	OR1	Aprobado	5,1
77012006 Caracterización de elementos bióticos del hábitat	OR1	Aprobado	5,5
77012007 Explotación sostenible de suelos y agroecosistemas	OR2	Notable	8,3
77012008 Modelización de la distribución potencial de especies y hábitats	OR2	Aprobado	6,5
77013001 Invasiones biológicas	OR2	Notable	8
77013002 Enfermedades de la fauna silvestre	OR2	Notable	8,5
77013004 Técnicas de conservación de fauna amenazada	OR2	Notable	8,7
77013006 Geomorfología fluvial y análisis de inundaciones	OR2	Notable	7,9
77015001 Prácticas externas	EX2	Sobresaliente	10

CURRICULUM VITAE DEL AUTOR/A

SOBRE MI

Me considero una persona dinámica, con ganas de trabajar, resolutiva y que da lo mejor de sí misma en el entorno laboral. Tengo gran interés tanto por seguir aprendiendo como por aportar ideas nuevas en el grupo de trabajo.

IDIOMAS

- Español (nativo)
- Inglés (Cambridge B2)
- Francés (básico)

EXPERIENCIA LABORAL

Delegado de Forum YT

Young Travelers Colombia | Septiembre 2022

- Asistencia a foros con temática en cambio climático y gases efecto invernadero con delegados de todo el mundo.
- Elaboración de documentos sobre leyes y planes de acción contra el cambio climático.
- Sesiones de debate sobre temática ambiental.

Técnico de Calidad y medioambiente

Proinca S.L. | Septiembre 2022

- Visita a clientes de toda Andalucía para la implantación de planes de prevención y seguimiento de buenas prácticas.
- LOPD, ISO, CFS, OHDSAS, autocontrol, prevención de acoso sexual...
- Formación complementaria a la actividad laboral.
- Control de documentación y auditorías.
- Elaboración de fichas técnicas para etiquetado de alimentos.

Fundadora y voluntaria

Aves de Osuna | Julio 2022- Actualidad

- Coordinación de grupo de voluntarios y asignación de rescates.

- Realización de fichas de aves rescatadas
- Realización de actividades medioambientales
- Divulgación en RRSS (@aves_de_osuna en Instagram)

Educadora ambiental y técnico de campo.

BRUTAL | Agosto 2022

- Censo de fauna urbana
- Revisión de nidos
- Talleres de educación ambiental
- Elaboración de informes

Técnico de laboratorio (beca ÍCARO)

Universidad de Jaén, Departamento de Edafología y Geología | Junio 2022 - Septiembre 2022

- Extracción de ácidos húmicos, fúlvicos y huminas
- Tratamiento de datos científicos
- Redacción y trabajo con bibliografía científica

Técnico de campo y medioambiente.

Ayuntamiento de Osuna | Agosto 2019 - Enero 2020

- Visitas a zonas verdes urbanas
- Censo de avifauna (especies protegidas)
- Gestión zona ZEPA del conjunto hidrográfico Lantejuela – Osuna
- Búsqueda de información científica
- Tratamiento de datos

Técnico de laboratorio (beca ÍCARO).

Universidad de Jaén, Departamento de Geobotánica y Aeropalinología:
Aplicaciones al medio natural | Febrero 2019 - Agosto 2019

- Aeropalinología (preparación de muestras)
- Germinación y desarrollo de especies autóctonas de cubiertas vegetales de olivar
- Biología de la conservación de plantas
- Documentación, actualización de bases de datos y trabajo en el herbario de la Universidad de Jaén.

FORMACIÓN

Universidad de Jaén

- Título Propio: “Diploma de Extensión Universitaria en Objetivos de Desarrollo Sostenible: hacia una formación integral del estudiantado” | 2023
- Diploma de Especialización Postgrado en Cooperación para el desarrollo con África Subsahariana | 2022-2023

- Master en Análisis, Conservación y Restauración de los componentes físicos y bióticos de los hábitats | Octubre 2021 - Octubre 2022
- Grado en Biología | Septiembre 2015 - Julio 2021

FORMACIÓN COMPLEMENTARIA

Beca Birding Congress

Birding Congres (2023)

TÉCNICAS DE AUDITORÍA DE SISTEMAS DE GESTIÓN

SGS (2022)

Forum YT

Young Traveles Colombia (2022)

Beca UNIVERGEM

Junta de Andalucía y Universidad de Jaén (2018 - 2022)

Educación y Medio Ambiente: Fortalecimiento de capacidades locales para la apropiación sustentable de los ecosistemas

Universidad de Jaén (2022)

Colaboración en la crianza y liberación de especies silvestres protegidas

Junta de Andalucía (2022)

V Curso de Formación en proceso de elaboración de aceite de oliva virgen

Universidad de Jaén (2021)

Curso de alfabetización (nivel medio)

Biblioteca de la Universidad de Jaén (2021)

I Foro de transferencia LIFE INVASAQUA (control de especies invasoras)

LIFE INVASAQUA (2021)

Elementos para una cooperación al desarrollo sostenible

Universidad de Jaén (2021)

Jornadas de estadística como herramienta científica

Universidad de Jaén (2021)

El cambio climático: repercusiones sobre el medio

Universidad de Jaén (2020)

El huerto como recurso didáctico en centros educativos

Universidad de Jaén (2020)

Introducción a la educación y voluntariado ambiental

Universidad de Jaén (2020)

Proyecto SCIENCE - IES
Universidad de Jaén (2020)

Microorganismos y bioeconomía en el sector alimentario
Campus de excelencia internacional agroalimentaria ceiA3 (2019)

Sostenibilidad ambiental: Nuestra responsabilidad
Universidad de Jaén (2019)

Calidad y seguridad alimentaria en un contexto globalizado
Universidad de Jaén (2019)

Voluntariado ambiental: Ecohuerto universitario
Universidad de Jaén (2018)

Andalucía Ecocampus
Universidad de Jaén (2016 - 2018)

Curso de inmersión lingüística inglesa
Universidad Internacional Menéndez Pelayo (2018)