

Pedro José López-Bellido Garrido

Directores:

Luis López Bellido

Rafael Jesús López-Bellido Garrido



UNIVERSIDAD
DE
CÓRDOBA



Tesis Doctoral
Córdoba 2017

*Balance y huella de carbono en
plantaciones de olivar en el sur de España*

TITULO: *BALANCE Y HUELLA DE CARBONO EN PLANTACIONES DE OLIVAR EN EL SUR DE ESPAÑA*

AUTOR: *Pedro José López-Bellido Garrido*

© Edita: UCOPress. 2017
Campus de Rabanales
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A
14071 Córdoba

www.uco.es/publicaciones
publicaciones@uco.es



TESIS DOCTORAL

BALANCE Y HUELLA DE CARBONO EN PLANTACIONES DE OLIVAR EN EL SUR DE ESPAÑA

DOCTORANDO: PEDRO JOSÉ LÓPEZ-BELLIDO GARRIDO

DIRECTORES: LUIS LÓPEZ BELLIDO - RAFAEL JESÚS LÓPEZ-BELLIDO GARRIDO

JUNIO, 2017



TÍTULO DE LA TESIS:

Balance y huella de carbono en plantaciones de olivar en el sur de España

DOCTORANDO/A:

Pedro José López-Bellido Garrido

INFORME RAZONADO DEL/DE LOS DIRECTOR/ES DE LA TESIS

El objetivo de la presente Tesis ha sido evaluar el secuestro de carbono y determinar su huella en un conjunto de diversas plantaciones de olivar del sur de España. La investigación ha sido realizada en una superficie total de 1232 ha localizadas en las provincias de Sevilla, Córdoba, Cádiz y Jaén. En concreto fueron elegidas 24 Unidades Homogéneas de Cultivo (UHC), correspondientes a parcelas de olivar de un mismo agricultor y que tenían similares características agronómicas y de cultivo: suelos, variedad, edad y marco de plantación, sistema de cultivo (secano o regadío) y prácticas de cultivo. En dichas UHC estaban incluidas las variedades Picual, Arbequina, Hojiblanca y Picudo; plantaciones intensivas, superintensivas y tradicionales; y cultivo de regadío y secano. Sin duda, el resultado más relevante del estudio es el papel que el balance claramente positivo de C del olivar puede representar en la valoración del ciclo de vida y de la huella de C del aceite de oliva como producto final. Este estudio ha dado lugar a una publicación en una revista de impacto (Carbon Management) situada en el segundo cuartil de epígrafe “Environmental Sciences” del ISI Web of Knowledge. Además la revista Vida Rural de difusión nacional publicó en el año 2014 un suplemento especial de 14 páginas dedicado a los resultados del trabajo de la tesis.

Por todo ello, se autoriza la presentación de la tesis doctoral.

Córdoba, junio de 2017

Firma del/de los director/es

Fdo.: Luis López Bellido

Fdo.: Rafael Jesús López-Bellido Garrido

AGRADECIMIENTOS

Quiero dar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que de una u otra forma me han ayudado a elaborar esta Tesis Doctoral, especialmente:

A los Prof.^{es} D. Luis López Bellido y Rafael J. López-Bellido Garrido, por su orientación y colaboración, así como por su paciencia durante la realización de la Tesis Doctoral

A las Dras. Purificación Fernández García y Verónica Muñoz Romero por su inestimable ayuda, apoyo constante e ilusión en el trabajo diario.

A M^a Auxiliadora López-Bellido por su inestimable ayuda en la elaboración de la Memoria de Tesis Doctoral

Por último, quería agradecer a mi familia el apoyo que me ha brindado en estos años.

RESUMEN

Las plantaciones arbóreas se caracterizan porque pueden remover el CO₂ de la atmósfera almacenándolo de forma estable en los órganos estructurales de los árboles (troncos, raíces y ramas) y en el suelo. Una metodología para el cálculo del balance y huella de carbono (C) asociada a la producción agrícola primaria del olivar ha sido utilizada, considerando, por un lado, la captura de C estable de la biomasa de olivar y el secuestro de C por el suelo, y por otro, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) producidas por las prácticas del cultivo. El estudio fue realizado en el sur de España en una superficie de 1121 ha, donde fueron seleccionadas 24 unidades homogéneas de cultivo, correspondientes a parcelas de olivar de un mismo agricultor y de similares características de suelo, variedad, edad, marco de plantación, sistema de cultivo (secano o regadío) y prácticas de cultivo. Fueron evaluadas las variedades Picual y Arbequina en plantaciones convencionales, intensivas y superintensivas o en seto y bajo cultivo de secano y regadío. Mediante el arranque de olivos y medidas dasométricas de árboles representativos de cada parcela fue determinado el volumen y el peso de la biomasa de los árboles y analizado el contenido de C y un modelo alométrico fue estimado para predecir la acumulación de C en la biomasa. Las emisiones de GEI de las operaciones de cultivo de cada parcela fueron estimadas, determinándose el flujo neto de C expresado como tasa anual de secuestro de C por ha, o huella de C. En conjunto las plantaciones de olivar mostraron un balance neto de C claramente positivo, especialmente las de tipo intensivo y superintensivo (2.05 y 4.10 t C/ha/año como promedio del conjunto de parcelas estudiadas). Estos resultados son un componente de suma importancia en la valoración del ciclo de vida y en el cálculo de la huella de C del aceite de oliva, como producto final. Por el contrario, el reservorio de C orgánico del suelo, exhibió un comportamiento irregular en las parcelas estudiadas, con tasas negativas de acumulación de C algunas de ellas, debido a las prácticas de manejo inadecuadas (laboreo intensivo, erosión, retirada y/o quema de residuos). La prácticas mejoradas de manejo del suelo, tales como el laboreo de conservación y la utilización de cubiertas vegetales y la incorporación de los residuos de poda al suelo, pueden incrementar notablemente el balance neto de C del olivar, llegando incluso a duplicar sus valores. En consecuencia, la inclusión de la tasa de secuestro de C del las plantaciones de olivar en el cálculo de la huella de C del aceite de oliva, representa una estimación más real de la misma y constituye un factor clave para la promoción comercial del producto final desde el punto de vista ambiental.

SUMMARY

Tree plantations are characterized by their ability to remove CO₂ from the atmosphere and store it in a stable manner in tree structures (trunks, roots and branches) as well as in the soil. The study was conducted in Southern Spain in olive groves and covering an area of 1121 ha, where 24 homogenous plantation units were selected. The Picual and Arbequina varieties were assessed in intensive, super-intensive and conventional plantations as well as in rainfed and irrigated plantations. The net carbon (C) balance in the olive tree plantations was clearly positive, especially in intensive and super-intensive plantations (2.05 and 4.10 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹ on average for all plantations studied). These results are significant for life-cycle evaluations of olive oil and for obtaining the C footprint of olive oil as a final product. Improved practices for soil management, such as the use of conservation tillage and cover crops and reincorporating pruning residues into the soil, can notably increase the net C balance in tree plantations and may even double it in amount. Thus, including the C sequestration rate of olive tree plantations can increase the accuracy of C footprint estimations for olive oil and represents a key factor in marketing the final product according to its environmental benefits.

ÍNDICE

RESUMEN	ii
SUMMARY	iii
ÍNDICE	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	vii
1.- INTRODUCCIÓN	1
1.1.- Carbono y agricultura	5
1.2.- Medición del balance de carbono en un sistema agrícola	10
<i>Metodologías para la determinación del efecto sumidero</i>	10
<i>Emissiones de las operaciones agrícolas (EOA)</i>	14
1.3.- El secuestro de carbono en el cultivo del olivar	15
1.4.- El ciclo real de carbono en una explotación agrícola	18
2.- OBJETIVOS	20
3.- MATERIAL Y MÉTODOS	21
3.1.- Áreas de estudio	21
3.2.- Estudio de campo	23
<u>Arranque de olivos</u>	23
<i>Medida del volumen de la biomasa de las UHC de olivar</i>	24
<i>Toma de muestras de suelo</i>	25
<u>Análisis de laboratorio</u>	25
<u>Cálculo de la biomasa y del contenido de C de los olivos</u>	26
<u>Cálculo del C orgánico del suelo</u>	26
<u>Estimación de modelos alométricos para predecir la acumulación de C en la biomasa del olivo</u>	26

<u>Cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de las operaciones agrícolas</u>	27
<u>Determinación del balance y tasa de secuestro de C en las UHC de Olivar</u>	27
4.- RESULTADOS	28
4.1.- Biomasa y contenido de C de las plantaciones de olivar	28
4.2.- Contenido de C orgánico del suelo de las plantaciones de olivar	31
4.3.- Almacenamiento de C en la biomasa y el suelo de las parcelas de olivar	34
4.4.- Tasa anual de C almacenado en las parcelas de olivar	36
4.5.- Estimación de un modelo de predicción para la acumulación de C en la biomasa de los olivos	37
4.6.- Cálculo de las emisiones de GEI de las plantaciones de olivar	39
4.7.- Balance y huella de carbono de las plantaciones de olivar	40
5.- DISCUSIÓN	43
6.- CONCLUSIONES	46
7.- REFERENCIAS	48
ANEJO I: Fichas de Unidades Homogéneas de Cultivo (UHC) de olivar	51
ANEJO II: Factores de emisión (FE) de gases de efecto invernadero (GEI) expresados en C equivalente (CE)	75
ARTÍCULOS	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características generales de las Unidades Homogéneas de Cultivo (UHC) del olivar

Tabla 2. Biomasa y contenido de C de las Unidades Homogéneas de Cultivo (UHC) de olivar.

Tabla 3. Contenido de carbono orgánico en el suelo según distintas profundidades en las Unidades Homogéneas de Cultivo UHC de olivar.

Tabla 4. Carbono orgánico almacenado en el suelo en el horizonte 0-30 cm según Unidades Homogéneas de Cultivo (UHC) de olivar.

Tabla 5. Carbono almacenado en la biomasa y el suelo de la Unidades Homogéneas de Cultivo (UHC) de olivar.

Tabla 6. Tasa anual de carbono almacenado (t/ha/año) en las plantaciones de olivar de las Unidades Homogéneas de Cultivo (UHC)

Tabla 7. Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) derivadas de las operaciones de cultivo en las Unidades Homogéneas de Cultivo (UHC) de olivar, expresadas como C equivalente (CE).

Tabla 8. Balance y huella de carbono de las Unidades Homogéneas de Cultivo (UHC) de olivar.

Tabla 9. Tasa anual de secuestro de C en la parte aérea, raíz y el suelo, según las diferentes densidades de plantación

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo predictivo de la tasa anual de acumulación de carbono en olivar, en función del número de árboles/ha

1. INTRODUCCIÓN

1.- INTRODUCCIÓN

El papel de los sistemas alimentarios en el cambio ambiental antropogénico es una fuente de preocupación para los responsables políticos, legisladores, la industria alimentaria, grupos de promoción ambiental y de la sociedad en general. La contribución acumulativa de los actuales modelos de consumo al agotamiento de los recursos y a los residuos de las emisiones (lluvia ácida, agotamiento del ozono, eutrofización, y cambio climático) requiere una atención cada vez más creciente. En definitiva, se trata, de garantizar a largo plazo la sostenibilidad de los sistemas alimentarios a escala local, regional y global, lo que requiere atención para cada nivel además de un uso eficiente de los recursos.

La evaluación o Análisis del Ciclo de Vida (“Life Cycle Assessment”, en adelante ACV) es un marco contable de medidas biofísicas estandarizadas utilizadas para, por un lado, caracterizar los flujos de material y/o energía que soportan actividades específicas y, por otro, cuantificar su contribución al agotamiento de los recursos y emisiones relacionadas con los aspectos ambientales (Pelletier et al., 2010; Brãndao et al., 2011).

La valoración del impacto en el ACV implica calcular las contribuciones realizadas por los inputs y outputs de material y energía tabulados en la fase de inventario para un conjunto determinado de categorías de impacto ambiental. Normalmente se consideran dos categorías de impacto en la utilización de los recursos (uso de energía y huella ecológica) y dos categorías de emisiones relacionadas (emisiones de gases invernadero y emisiones eutrofizantes) (Pelletier et al., 2010; Bessou et al., 2011).

La huella ecológica cuantifica el área de un ecosistema productivo global requerida para el suministro de recursos de material y energía y el secuestro de las emisiones de gases invernadero asociadas con un producto o servicio (en m² de ecosistema productivo) (Pelletier et al., 2010).

El objetivo del análisis del ACV es evaluar el impacto ambiental de la producción, el uso y los residuos de un producto. El concepto central del ACV es combinar, en un pequeño número de indicadores, las emisiones contaminantes y los recursos utilizados durante el curso de la vida de un producto. Este método ha sido objeto de considerables esfuerzos para la estandarización del cálculo de impactos y la interpretación de resultados. Originalmente, el análisis del ciclo de vida fue desarrollado por la industria de procesos, y más recientemente está siendo usado para evaluar el impacto ambiental de las actividades agrícolas, tanto para producción de plantas como de animales (Payraudeau y Van der Wert, 2005; Cowie, et al., 2012).

El término huella de C (“carbon footprint”) es relativamente nuevo, aunque las herramientas y métodos que lo soportan están bien establecidas, habiendo sido previamente desarrolladas para una gran variedad de cuestiones ambientales. La huella de C es difícil de definir, pues requiere un claro establecimiento de los supuestos asumidos y frecuentemente la existencia de un enfoque metodológico. Conceptualmente, la huella de C debería considerar todas las emisiones de un producto, tanto hacia atrás en el tiempo, -desde el punto de consumo a las fuentes de emisión-, como hacia adelante en el tiempo, para incluir el uso y la fase de residuo de los productos (Peters, 2010).

No existe una aceptación amplia y una definición concreta de la huella de C, aunque sí existe la noción de lo que es y de su realidad. Una definición

abierta que intente ser aceptada para todas las posibles aplicaciones podría ser, según Peters (2010), la siguiente: “la huella de C de una unidad funcional es el impacto climático bajo una medida especificada, que considera todas las fuentes relevantes de emisiones, sumideros y almacenamiento, tanto en el consumo como en la producción, dentro de un sistema limitado espacial y temporal”.

La huella de C puede ser analizada para muy diferentes unidades funcionales, a diferentes escalas y usando diferentes métodos. En definitiva, la huella de C es un subconjunto del análisis total del ACV (Peters, 2010; Bessou et al., 2011).

En la actualidad, la huella de C es uno de los indicadores que ha alcanzado mayor difusión para identificar, sintetizar y comunicar de forma comprensible los posibles impactos ambientales de un proceso o actividad. Mediante la huella se pretende cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero que son liberadas a la atmósfera debido a la producción y comercialización de un producto, desde la adquisición de las materias primas hasta su gestión como residuos, permitiendo a los consumidores decidir que alimentos comprar según las emisiones generadas.

Por otro lado, el concepto de huella de C suscita el interés de las empresas, consumidores y políticos. Los inversores ven en la huella de C un indicador de los riesgos de inversión. Los gerentes de compras están interesados en la huella de C de las cadenas de suministros, y los consumidores están cada vez más preocupados por las ofertas de productos que estén etiquetados con la huella de C (Peters, 2010; Panday y Agraval, 2014). Ésta ha llegado a ser popular a pesar de que es un término de nombre equivocado, ya

que se refiere a la masa acumulada de emisiones de dióxido de carbono (CO₂), por ejemplo, a través de una cadena de suministro, o a través del ciclo de vida de un producto, y no a algún tipo de medida de superficie. Por ello el cálculo es más apropiado usando la evaluación o análisis del ciclo de vida o el análisis input-output (Hertwich y Peters, 2009).

La huella de C, que se relaciona con el cambio climático, representa un elemento fundamental de la responsabilidad social corporativa de las empresas. Numerosos países como Francia, EEUU, Canadá, Reino Unido, Suiza, Japón, Australia, Alemania, etc... ha legislado y establecido normas sobre la huella de C de los productos y servicios. También cada vez más cadenas alimenticias incluyen en sus productos la huella de C. Según una encuesta reciente, el 72% de los europeos se muestran a favor de que sea obligatorio expresar la huella de C en los productos.

Para la aplicación del concepto de huella de C en la agricultura, se debe tener en cuenta que este sector, junto al forestal, son los únicos que tienen capacidad de absorber o remover CO₂ de la atmósfera, lo cual lleva a considerar más bien el término “balance de C” en vez de “huella de C”, puesto que en muchos de los cultivos agrícolas, dependiendo de las técnicas de producción, se obtendrá un balance positivo comportándose como sumideros netos de CO₂. En este sentido algunos autores utilizan el término “huella parcial de C” e incluso “huella de C negativa” (Gan et al., 2012).

Existen numerosas metodologías normalizadas a escala internacional para el cálculo de la huella de C. Ellas se aplica a productos y servicios y tienen en cuenta únicamente las emisiones de GEI de los procesos. Cuando tales métodos se aplican a la industria agroalimentaria, la huella de C se calcula

teniendo en cuenta las emisiones de GEI de la materia prima recepcionada (sea trigo, aceituna, naranjas, etc...), a las que se suman las emisiones generadas en el proceso de fabricación correspondiente (pan o pastelería, aceite, zumo, etc...). Se prescinde del posible secuestro de C que tales cultivos han podido generar al producir la materia prima. Es decir, el sector agroalimentario recibe el mismo tratamiento en el cálculo de la huella de C que una fábrica de cemento, una compañía aérea o una fábrica de automóviles, donde evidentemente no hay secuestro de C alguno en las materias primas que se emplean. En consecuencia, las metodologías normalizadas de cálculo de la huella de C no han sido especialmente diseñadas para ser aplicadas a la agricultura y a la industria agroalimentaria que de ella se deriva.

1.1.- Carbono y agricultura

La agricultura, a diferencia de los sectores de la industria y el transporte, es capaz, bajo un manejo apropiado, no sólo de compensar las emisiones de CO₂ a la atmósfera, sino de capturar éste y almacenarlo como C en la biomasa de las plantas y en el suelo. El secuestro de C se produce cuando un conjunto de prácticas de cultivo incrementan el almacenamiento de C en el suelo. El impacto producido por estas prácticas, tales como el sistema de laboreo, las rotaciones de cultivo, las plantaciones arbóreas o la fertilización, difiere según el tipo de suelo, el sistema de cultivo, el manejo de los residuos y el clima (Eagle y Olander, 2012; Lal, 2012; Olson et al., 2014).

El CO₂ es el principal gas de efecto invernadero. A escala mundial, las causas más importantes del incremento de su concentración en la atmósfera han sido, hasta 1970, la práctica de una agricultura intensiva y los cambios en el uso de la tierra (Lal, 2002). Hoy en día, sin embargo, la principal fuente de

emisión de CO₂ a la atmósfera viene dada por el consumo de combustibles fósiles por parte de la industria y el transporte (IPCC, 2007). En este sentido, la agricultura, además de representar un sector estratégico para la economía de cualquier país cualquiera que sea su nivel de desarrollo, es capaz, bajo un manejo adecuado, y a diferencia de otros sectores como la industria o el transporte, no sólo de reducir a cero las emisiones de CO₂ a la atmósfera, sino de capturar éste y almacenarlo como C en el suelo.

Los suelos representan a medio y largo plazo un sumidero para el almacenamiento de C y tienen potencial para compensar las emisiones antropogénicas (Swift, 2001). La causa de esta compensación de las emisiones de CO₂ se fundamenta en su captura por los cultivos (raíz, paja y grano en el caso de los cereales añadiéndose en el caso del olivar el tronco y las ramas principales) y su almacenamiento (secuestro) bajo forma orgánica en el suelo, siendo el tiempo que el C permanece en el mismo un factor clave.

Por esta razón, se habla de tiempo de residencia medio, que es el tiempo que el C reside en alguno de los tres sumideros o reservorios de su ciclo global antes de pasar a otro. Por ejemplo, y mientras que una molécula de CO₂ permanece un promedio de cinco años en la atmósfera antes de incorporarse a la biosfera terrestre o a los océanos, un átomo de C perdura una media de diez años en la vegetación y 35 años en la materia orgánica del suelo antes de regresar a la atmósfera como CO₂ (Schlesinger, 2005).

El incremento del CO₂ atmosférico y el gran potencial de los suelos agrícolas para secuestrar el C han estimulado el desarrollo de prácticas de manejo que incrementen su secuestro. La ganancia neta o pérdida de C orgánico del suelo depende de la cantidad de éste que se añada con los

residuos de las plantas y la biomasa radicular frente a las pérdidas por la retirada de residuos, la respiración microbiana y la erosión.

El secuestro de C se produce cuando un conjunto de prácticas de manejo incrementan el almacenamiento de C en el suelo. El impacto producido por estas prácticas, tales como el sistema de laboreo, las rotaciones de cultivo o la fertilización, ha sido bien estudiado de manera independiente y difiere según el tipo de suelo, sistema de cultivo, manejo de los residuos y el clima. Por esta razón, es de gran interés el estudio del secuestro de C según las prácticas de manejo en diferentes tipos de suelo, cultivos y climas.

En la actualidad existen numerosas formas de evaluar la sostenibilidad de un sistema de producción agrícola. Los economistas utilizan la productividad o productividad total de los factores, los científicos del suelo usan la calidad de éste, los ecologistas aplican coeficientes de energía y los ingenieros valoran el uso eficiente de la energía. En el contexto del cambio climático global y de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero en la atmósfera, sin embargo, la sostenibilidad de un sistema puede ser valorada, según Lal (2004), evaluando el cambio temporal en los ratios output/input ó (output-input)/input de C aplicando un enfoque holístico:

$$I_s = (C_o/C_i)_t$$

$$I_s = ((C_o - C_i$$

I_s = Índice de sostenibilidad.

C_o = Suma de todos los outputs expresada en C equivalente (incluye grano, paja, biomasa radicular y exudados).

C_i = Suma de todos los inputs expresada en C equivalente (incluye inputs directos, pérdidas indirectas de C y fuentes de emisiones terciarias, tales como maquinaria agrícola, fabricación, etc).

t = Tiempo en años.

La sostenibilidad de un sistema de producción puede, por tanto, ser valorada por la evaluación de los cambios temporales en la ratio $C_{\text{output}}/C_{\text{input}}$, o por la ratio output neto de C/C_{input} pues en definitiva, el objetivo de un manejo sostenible es mejorar el 'pool' de C del ecosistema mediante el incremento de los outputs, mejorando el uso eficiente del C de los inputs y disminuyendo las pérdidas (Lal, 2004).

Por otro lado, la productividad primaria neta (PPN) proporciona los inputs de C en los ecosistemas y determina la cantidad de C fijado fotosintéticamente que puede ser potencialmente secuestrado en la materia orgánica del suelo. El método para estimar la PPN y los inputs anuales de C en el suelo utiliza coeficientes de asignación de C en la planta para cada cultivo. El C derivado de la raíz en estos coeficientes se estima por la relación parte aérea/raíz. La PPN debajo del suelo (principalmente la raíz), es uno de los parámetros más inciertos y variables, que también incluye el C extraradicular (Bolinder et al., 2007).

El C fijado en las plantas por la fotosíntesis y aportado al suelo como residuo, tanto encima como debajo del suelo, es la fuente primaria de C en los ecosistemas. La predicción de los cambios en los stocks de C (en particular en los suelos), depende por ello de la estimación fiable de la PPN y de la proporción de ésta retornada al suelo. El concepto y definición de PPN se expresa como el incremento en la biomasa más las pérdidas, sumando tanto las partes aéreas como subterráneas por unidad de área de terreno y por unidad de tiempo.

La PPN en los agrosistemas y la distribución del C en las diferentes partes de la planta es normalmente calculada a partir de los rendimientos agrícolas y de los componentes de las plantas más frecuentemente medidos. En cereales, por ejemplo, se utiliza el índice de cosecha (HI) para estimar el input de C de la parte aérea a partir del rendimiento de grano. Para los inputs de C de la parte subterránea se utiliza la relación parte aérea/raíz. La mayor incertidumbre en la estimación de la PPN se origina en la determinación debajo del suelo, que incluye raíces, exudados y otros materiales orgánicos derivados de la raíz. Aunque una gran proporción de la PPN está localizada en las partes subterráneas de la planta, la cantidad de la PPN debajo del suelo es uno de los atributos más pobremente entendidos de los ecosistemas terrestres. La dificultad de cuantificar los inputs de C debajo del suelo constituye por tanto una prioridad actual para la investigación (Bolinder, et al., 2007). Para los cultivos, la productividad neta de C puede ser valorada a largo plazo sobre la base del análisis de cambios en los stocks de C del suelo. También puede ser estimada a corto plazo, por ejemplo anualmente, combinando medidas de productividad neta de C con la estimación de los inputs de C (semillas, fertilizantes orgánicos, tubérculos) y los outputs de C (cosecha). Esta evaluación anual es útil debido a que permite valorar los efectos de los cultivos anuales, o de un clima particular, o los eventos de manejo sobre la productividad neta de C (Ceschia et al., 2010). En el caso del olivar como cultivo perenne, sería lo mismo que para los cultivos anuales además de considerar su estructura aérea y radicular más o menos permanente (tronco, grandes ramas, raíces principales), donde hay que valorar su contenido de C.

1.2.- Medición del balance de carbono en un sistema agrícola

Metodologías para la determinación del efecto sumidero

Para la determinación del balance de C de un ecosistema agrícola o un cultivo determinado, existen variadas metodologías que presentan ventajas e inconvenientes, y cuya utilización depende de la finalidad perseguida y sobre todo de la disponibilidad de datos para su evaluación.

El Método de la “Eddy Covarianza” ha sido y es un método clásico utilizado para medir el intercambio neto de CO₂ de un ecosistema o la producción neta del ecosistema. Es lo mismo que determinar el flujo o balance de todo el C que entra y sale en un ecosistema y en un período determinado, normalmente un año (Chapin et al., 2006). Este método resultaría de escasa utilidad para el objetivo de nuestro estudio, puesto que requiere de equipos e instrumentos específicos, costosos y complejos de manejar y la instrumentación necesaria para una región tan amplia como Andalucía exigiría una inversión muy elevada.

El Método de la productividad primaria neta (PPN) anual, cuota de C e inputs de C aportados al suelo, ha sido desarrollado y aplicado por Smith et al. (2010) para evaluar el presupuesto neto de C en sistemas agrícolas de las regiones europeas. También Bolinder et al. (2007) han utilizado un método similar en los cultivos agrícolas de Canadá, estimando la productividad primaria neta y los inputs de C anual.

Este método incluye todas las fracciones de C de la planta (producto recolectado, residuos por encima del suelo, raíces y exudados subterráneos),

suponiendo que la suma de ellas será una aproximación razonable a la PPN de un agrosistema. También permite una estimación directa y fácil de los inputs anuales de C aportado al suelo. La PPN de C se calcula a partir de dichas 4 fracciones distintas de C en las plantas, que se expresan en unidades de masa de C por unidad de área y por unidad de tiempo ($\text{g C/m}^2/\text{año}$):

$$\text{PPN} = C_P + C_S + C_R + C_E$$

La cantidad de C en cada una de estas 4 fracciones es estimada por los rendimientos, utilizando el HI, la relación parte aérea/raíz y la rizodeposición, y teniendo en cuenta la concentración de C en las diferentes partes de la planta. Si se asume que en el cultivo de cereales la concentración de C de todas las partes de la planta es 0.45 g/g. En consecuencia:

$$C_P = Y_P \cdot 0,45$$

$$C_P = Y_P (1 - \text{HI}) / \text{HI} \cdot 0,45$$

$$C_R = Y_P (S : R \cdot \text{HI}) \cdot 0,45$$

$$C_E = C_R \cdot Y_E$$

Y_P = rendimiento de materia seca de la producción por encima del suelo ($\text{g/m}^2/\text{yr}$)

Y_E = C extra-raíces (rizodeposición de C)

S:R = relación parte aérea/raíz

Para cultivos perennes, el C de la raíz persiste de año en año y, por tanto, C_R es definido como el incremento de C en la raíz en el año que fue establecido. La cuota o asignación de C de cada parte diferente de la planta puede expresarse usando coeficientes de asignación relativa de C (indica el % de C que hay en cada parte).

Para estimar el input de C anual aportado al suelo, en el caso más simple, si sólo la cosecha es recolectada, la cantidad anual de C añadida al suelo es estimada como PPN - CP. Sin embargo, frecuentemente sólo una porción de algunas fracciones es retornada al suelo. Para tener en cuenta esto, se introduce un parámetro adicional, S, que describe la proporción de C en la fracción dada que es retornada al suelo. Normalmente, por defecto, SP = 0; SS = 1; SR = 1 y SE = 1 (donde SP, SS, SR, y SE son las proporciones de C en la cosecha, residuos por encima del suelo, raíces y C extra-raíces, respectivamente, que son retornados al suelo). Si una porción de una fracción es removida (por ejemplo, paja de trigo destinada para alimentación animal o cama de ganado), entonces SS < 1; por ello:

$$C_i = (C_R \cdot S_P) + (C_S \cdot S_C) + (C_R \cdot S_R) + (C_E \cdot S_E)$$

Donde Ci es el input anual de C aportado al suelo y el input relativo de C (Ri) expresa el input de C aportado al suelo como una proporción de PPN, y es calculado como:

$$R_i = C_i / (C_P + C_S + C_R + C_E)$$

El método de Análisis del Ciclo de C, propuesto por West y Marland (2002) y aplicado en la agricultura de EEUU, analiza la influencia de las prácticas agrícolas en el ciclo de C de los cultivos, con el objetivo de reducir el pool de CO₂ atmosférico y mitigar las emisiones de C de la combustión de energía fósil.

El método trata de contabilizar o estimar el flujo neto de C a la atmósfera. Para alcanzar un valor del flujo neto de C, que representa el verdadero impacto sobre el pool de CO₂ atmosférico, se considera tanto el C secuestrado en el ecosistema como las emisiones de C de los inputs agrícolas.

En agricultura, el CO₂ puede ser liberado por:

- La descomposición de los residuos del cultivo y por el C orgánico del suelo (ambos se ven aumentados por las prácticas de laboreo intensivas)
- La producción y aplicación de inputs a los cultivos
- El uso directo de combustibles fósiles en la maquinaria de la explotación
- La quema u otras oxidaciones de biomasa.

El único proceso de absorción de CO₂ es la fotosíntesis y el único pool en el cual el C puede ser secuestrado es el suelo. La cantidad de C perdido vía cultivos cosechados se considera es reemplazada por el C absorbido en el siguiente cultivo y no hay acumulación de C significativa a largo plazo en los cultivos o en los productos del cultivo.

El análisis del ciclo completo de C incluye, pues, la fase de secuestro de C en el suelo y la tasa de emisiones de C atribuida a las actividades de manejo. Ello puede ser utilizado para derivar el intercambio neto de C con la atmósfera, la ruta temporal de cambios de C, es decir, seguir los cambios en el flujo neto de C con el tiempo, y una comparación del flujo relativo de C, es decir, clarificar las diferencias entre dos o más prácticas de manejo.

La contabilización de las emisiones de C asociadas con las operaciones agrícolas, en adición a los cambios en el C del suelo, resulta en un valor de flujo neto de C absoluto:

$$\text{Flujo neto de C} = \text{Emisiones de C} - \text{Secuestro}$$

El flujo neto de C indica, por tanto, si un sistema es un sumidero neto (valores negativos) o una fuente neta (valores positivos) para el CO₂ de la atmósfera.

Emisiones de las operaciones agrícolas (EOA)

En los estudios para cuantificar el potencial de secuestro de C en los ecosistemas agrícolas, el cambio en las emisiones de C asociadas con las prácticas agrícolas ha sido en gran medida poco valorado. Mientras que se han realizado algunos esfuerzos para incluir las emisiones como una parte de los análisis a gran escala del secuestro de C, la dificultad para obtener datos de emisiones por el uso de combustibles en la agricultura y otras actividades ha hecho tales esfuerzos difíciles. Adicionalmente, la falta de un enfoque consistente para contabilizar las emisiones de la agricultura, ha causado desacuerdos en cuanto a si el cambio en las emisiones de C resultantes de un cambio en las prácticas de laboreo influirá o no en la cantidad de C secuestrado por el suelo (IPPC, 2006; AENOR, 2012).

Las emisiones de C o de gases de efecto invernadero (GEI) han sido clasificadas en fuentes primarias, secundarias y terciarias. Las fuentes primarias de emisiones de C son las operaciones móviles, tales como el laboreo, siembra, recolección y transporte, o bien las operaciones estacionarias, tal como el

bombeo del agua para el riego. Las fuentes secundarias de GEI, convertidas a emisiones equivalentes de C, comprenden la fabricación, envasado y almacenamiento de fertilizantes (mineral y orgánicos) y pesticidas y emisiones de N₂O causadas por los fertilizantes y residuos en el campo. Las fuentes terciarias de emisiones de C incluyen la fabricación y el mantenimiento de los equipos (tractor y demás maquinaria y aperos)(Lal, 2004).

Para el cálculo de emisiones, a cada operación, producto o equipo se le asigna un factor de emisiones (FE), utilizándose unidades de C equivalente mediante el coeficiente 0,2727 de transformación de C a CO₂. La suma de todas las emisiones de las operaciones de campo (primarias, secundarias y terciarias) constituye el factor para determinar el flujo neto de C del agrosistema o sistema de cultivo.

Lal (2004), ADEME (2010) y Ceschia et al. (2010), entre otros, han elaborado una relación exhaustiva del uso energético de las operaciones agrícolas y su conversión en C equivalente (CE). La principal ventaja de expresar el uso de energía en términos de emisiones de C, como kg CE/ha, se encuentra en su relación directa con la tasa de enriquecimiento de concentración de CO₂ atmosférico. Ambos autores incluyen en tablas los kg CE/ha de las operaciones de laboreo, siembra, aplicación de fertilizantes, tratamientos, recolección, instalaciones y sistemas de riego, fertilizantes y de una larga relación de pesticidas (herbicidas, insecticidas y fungicidas), y de otras operaciones varias.

1.3.- El secuestro de carbono en el cultivo del olivar

A escala de una región agrícola, es frecuentemente asumido que el conjunto del impacto ambiental sea igual a la suma de los impactos de cada

explotación o finca. En la práctica, el sistema de clasificación frecuentemente utilizado es extrapolar los resultados obtenidos a escala de finca al nivel de región agrícola, asumiendo la uniformidad de las prácticas del agricultor y los sistemas de producción dentro de una clase. Sobre una escala regional, los impactos ambientales de un cultivo dado pueden ser evaluados relacionando las emisiones específicas, expresadas como cantidades por hectárea, al área total del cultivo considerado (Payraudeau y Van der Werf, 2005).

El sector agrícola, como ya se ha dicho, se caracteriza porque puede remover CO₂ de la atmósfera almacenándolo temporalmente en los árboles y plantas (troncos, raíces, ramas, hojas y frutos) y de forma muy duradera en el suelo. Sin embargo, se requiere un proceso previo de investigación para conocer la capacidad de captura de CO₂ de un cultivo o sistema agrícola y la de secuestro de C del suelo.

Muchos estudios han valorado la producción y el presupuesto neto de C de los ecosistemas forestales y de pastos, pero pocos trabajos han sido realizados con los cultivos agrícolas, en parte debido a las dificultades e incertidumbres asociadas con la estimación del cómputo de C de las tierras de cultivo. Ceschia et al. (2010) mencionan especialmente la rotación maíz-soja en EEUU, que ha sido objeto de gran atención. También, aunque en menor grado, el arroz, la remolacha azucarera, el trigo de invierno, la colza y el girasol han sido investigados. Sin embargo, los mencionados autores afirman que estos estudios no suministran una evaluación integral que contabilice y represente las diferencias regionales del impacto de los cultivos, sistemas de cultivo o las prácticas de manejo.

La agricultura mediterránea en su conjunto, por tener un clima que permite un reducido gasto energético, tiene la característica de ser un potente sumidero de CO₂, generando, de esta forma, además de alimentos, empleo y desarrollo rural, un importante beneficio ambiental.

En la región Mediterránea, tanto bajo condiciones de secano como de regadío, prácticamente no han sido realizados estudios a largo plazo que determinen la capacidad de la tasa de secuestro de C de los suelos agrícolas. En menor grado aún se han llevado a cabo investigaciones encaminadas para establecer el análisis del ciclo de vida y la huella de C, especialmente en los cultivos de trigo, algodón y olivar.

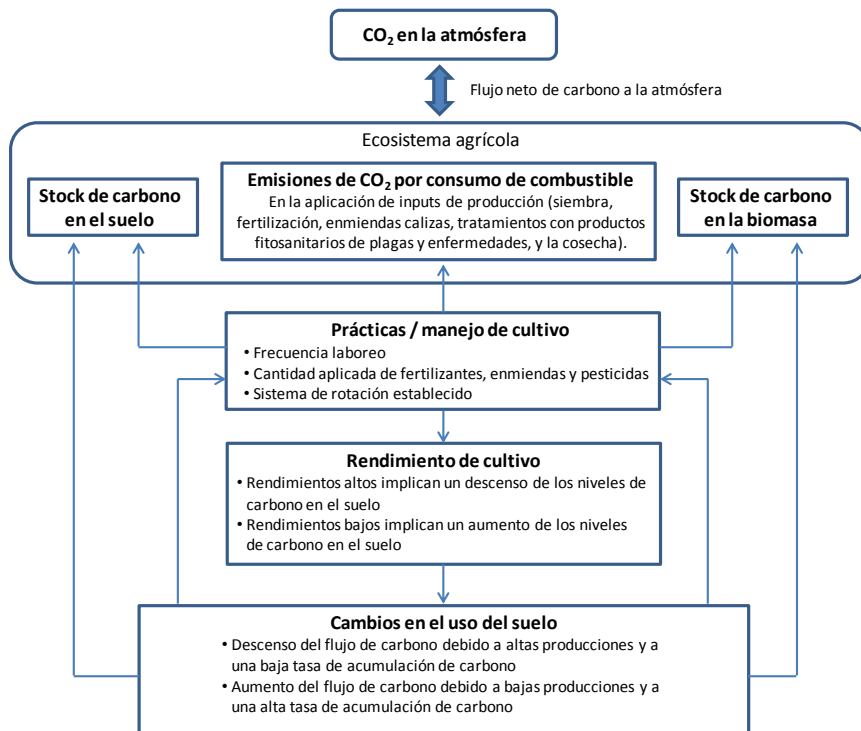
Las plantaciones arbóreas, especialmente, se caracterizan porque puede remover el CO₂ de la atmósfera almacenándolo temporalmente en los árboles (troncos, raíces, ramas, hojas y frutos) y de forma muy duradera en el suelo. Por esta razón, los cultivos arbóreos tienen por lo general un mayor potencial de secuestro de C que los cultivos anuales, ampliamente reconocido, que puede incluso llegar a superar a las plantaciones forestales. El C que es almacenado en troncos, ramas y raíces tiene asimismo un marcado carácter estable. Sin embargo, se requiere un proceso previo de investigación para conocer la capacidad de captura de CO₂ de un sistema arbóreo y la de secuestro de C del suelo. Muchos estudios han valorado la producción y el presupuesto neto de C de los ecosistemas forestales, pero pocos trabajos han sido realizados con los cultivos agrícolas, en parte debido a las dificultades e incertidumbres asociadas con la estimación del cómputo de C de las tierras de cultivo (Ramachandran Nari et al., 2010).

En relación con el olivar, algunos trabajos han aportado información sobre el almacenamiento neto de C (Sofo et al., 2005), el intercambio de C y la eficiencia en el uso del agua en el olivar de regadío (Testi, et al., 2008) así como en el diseño de modelos para establecer el potencial de crecimiento de la masa aérea de olivo, como herramienta para estimar el secuestro de C (Villalobos et al., 2006). Sofo et al. (2005), en el sur de Italia, han establecido los valores de CO₂ atmosférico fijado según la edad y densidad del olivar y según las diferentes estructuras aéreas y la raíz, con valores medios de 2,74 y 9,54 t/ha/año de CO₂ fijado, en plantaciones jóvenes y adultas, respectivamente. Testi et al. (2008), utilizando la metodología de la ‘Eddy Covarianza’, ha medido el flujo de CO₂ en un olivar de regadío en Córdoba, en diferentes períodos de índice de área foliar (LAI), sugiriendo que el olivar de riego por goteo requiere estudios específicos de intercambio y cómputo de C y no puede incluirse fácilmente en otros biomas. Villalobos et al. (2006) por último, han calibrado y validado un modelo simple para estudiar el crecimiento y el rendimiento de diferentes variedades de olivar en el sur de España, basado en la eficiencia de uso de la radiación (RUE), estimando el potencial de secuestro de C para un olivar intensivo de regadío en 7 t CO₂ /ha/año.

1.4.- El ciclo real de carbono en una explotación agrícola

El balance de C de un agrosistema se define como la diferencia existente entre aquellas operaciones agrícolas llevadas a cabo dentro del ciclo de cultivo y que conllevan una emisión de C (efecto “fuente” del cultivo) y el propio efecto fijador del agrosistema (efecto “sumidero” o capacidad de captación de C por parte del cultivo y posterior secuestro mismo en el suelo).

La metodología que se pretende definir para el análisis del balance de C será una modificación de la propuesta por West y Marland, 2002 (Net carbon flux from agricultural ecosystems: methodology for full carbon cycle analices. Environmental Pollution, 116, 439-444), que consiste en analizar la influencia de las prácticas agrícolas en el ciclo del C de los cultivos, contabilizando o estimando el flujo neto de C a la atmósfera. Para ello se considera tanto el C secuestrado por el ecosistema, el C capturado por la biomasa, como las emisiones de C asociadas a los inputs agrícolas de producción.



2. OBJETIVOS

2.- OBJETIVO

El objetivo de la tesis fue valorar el secuestro de C y determinar su huella en un conjunto de plantaciones de olivar del sur de España, con diferentes densidades de plantación y sistemas de cultivo, de las variedades Picual y Arbequina. Así como establecer un modelo de predicción que estime la acumulación de C en la biomasa de las plantaciones de olivar.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.- MATERIAL Y MÉTODOS

3.1.- Áreas de estudio

La investigación ha sido realizada en una superficie total de 1121 ha localizadas en las provincias de Sevilla, Córdoba, Cádiz y Jaén (Sur de España). En concreto fueron elegidas 22 Unidades Homogéneas de Cultivo (UHC), correspondientes a parcelas de olivar de un mismo agricultor y que tenían similares características de suelo, variedad, edad y marco de plantación, sistema de cultivo (secano o regadío) y prácticas de cultivo. En dichas UHC estaban incluidas las variedades Picual y Arbequina; plantaciones intensivas, superintensivas y tradicionales; y cultivo de regadío y secano (Tabla 1).

La gran diversidad existente entre las diferentes HUOG de olivar estudiadas, en localización (clima), variedad, edad y marco de plantación y sistema de cultivo, ha sido muy valiosa para obtener un amplio rango de datos, que ha sido de gran utilidad para constatar la amplitud de valores relacionados con el secuestro y balance de C del cultivo de olivar.

Las unidades de plantaciones de olivar fueron agrupadas en función de la densidad de plantación (nº de árboles/ha) en: (1) convencionales, que son plantaciones tradicionales de elevada edad y que actualmente ya no se realizan, y que tienen de 80 a 100 árboles/ha; (2) intensivas, que tienen una densidad comprendida entre 200 y 300 árboles/ha, con diferentes marcos de plantación; (3) superintensivas o en seto, que tienen una densidad comprendida entre 500 y 2000 árboles/ha. Los diferentes marcos de plantación y densidad de árboles/ha de las distintas unidades de estudio se muestran en la Tabla 1.

En el anejo I se incluye las fichas de cada UHC, con las características descriptivas más importantes, y el detalle de las prácticas de cultivo aplicadas.

Tabla 1. Características generales de las Unidades Homogéneas de Cultivo (UHC) del olivar

UHC	Superficie (ha)	Término Municipal*	Variedad	Año de Plantación	Marco (m)	Número olivos /ha	Sistema cultivo
1	35	Aguilar de la Frontera (Co)	Picual	1994	7x7	204	Riego
2	27	Aguilar de la Frontera (Co)	Hojiblanca	1996	7x7	204	Riego
3	84	Luque (Co)	Picudo	1938	11x11	83	Secano
4	45	Luque (Co)	Picual	1970	11x11	83	Secano
5	54	Arahal (Se)	Arbequina	2009	5x1.5	1333	Riego
6	46	Carmona (Se)	Arbequina	2007	3.75x1.35	1975	Riego
7	14	Écija (Se)	Arbequina	2007	3.75x1.35	1975	Riego
8	60	Écija (Se)	Arbequina	2007	3.75x1.35	1975	Riego
9	17	Écija (Se)	Arbequina	2005	7x5	286	Riego
10	245	Santaella (Co)	Picual	2007	8x6	208	Secano
11	154	Santaella (Co)	Arbequina	2007	7x5	286	Secano
12	22	La Rambla (Co)	Arbequina	2006	4x1.35	1852	Riego
13	45	La Rambla (Co)	Picual	2006	8x6	208	Riego
14	7	La Rambla (Co)	Picual	2006	7x7.5	190	Riego
15	51	La Carlota (Co)	Picual	1995	9x4.5	247	Riego
16	25	Écija (Se)	Picual	1995	8x6	208	Riego
17	53	La Carlota (Co)	Picual	1994	8x6	208	Riego
18	25	Baeza (Ja)	Arbequina	2001	8x2.5	500	Riego
19	99	Baeza (Ja)	Picual	1955	10x10	100	Riego
20	23	Jerez de la Frontera (Ca)	Arbequina	2005	7x6	238	Secano
21	21	Jerez de la Frontera (Ca)	Arbequina	2007	7x6	238	Riego
22	17	Jerez de la Frontera (Ca)	Arbequina	2009	7x6	238	Secano
23	35	Jerez de la Frontera (Ca)	Picual	1995	8x7	179	Secano
24	28	Jerez de la Frontera (Ca)	Arbequina	2006	7x6	238	Riego

* Córdoba (Co); Sevilla(Se); Jaén (Ja)M; Cádiz (Ca)

3.2.- Estudio de campo

Arranque de olivos

Los olivos arrancados fueron de las variedades Picual y Arbequina (3 ejemplares de cada una). Esta operación fue realizada en la Finca La Reina, situada en la vega del Guadalquivir (margen izquierda) del t.m. de Córdoba, en una plantación intensiva de 15 años de edad sobre un suelo franco-limoso. El arranque fue realizado en el mes de marzo con el suelo húmedo. Previamente en dichos olivos enteros se calculó el volumen de la biomasa mediante dasometría, en la forma como se explica más adelante, con el fin de establecer la relación entre las medidas dasométricas y los datos reales de peso y volumen obtenidos directamente de los olivos arrancados y constatar la fiabilidad del método dendrométrico utilizado.

Antes del arranque, los árboles fueron desprovistos de toda la masa foliar y de las ramas secundarias y desmochados a la altura de las ramas principales. Para el arranque se utilizó una manipuladora telescópica New Holland acoplada a un tractor, que mediante unas potentes correas arrancó cada árbol de cuajo, raíces incluidas. Las raíces fueron separadas del tronco y pesadas. La parte aérea de cada árbol fue cubicada y pesada, de forma separada el tronco y las ramas de distintos órdenes (hasta 2 cm de diámetro). La relación en peso parte aérea/raíz fue determinada. También se tomaron muestras con la barrena Pressler en las raíces y los distintos órdenes de ramas para determinar la densidad de la madera de cada componente. Una porción de las diversas partes del material vegetal fue secada en estufa a 70°C para determinar la materia seca. Finalmente, todo el material fue triturado

separadamente para determinar analíticamente el contenido de C mediante el método de combustión seca de Dumas.

Asimismo, también fue arrancado en la Finca Las Rozas (t.m. de Luque), un olivo de plantación convencional con 3 pies, de la variedad Picudo, de 75 años de edad de plantación; con la finalidad de establecer en este tipo de olivos la misma relación antes mencionada entre la dasometría y la cubicación y peso real; teniendo en cuenta la importancia de la peana de los distintos pies, que contribuye de forma considerable al peso de la biomasa del árbol y el C capturado. Las operaciones practicadas fueron las mismas que en el caso anterior de los olivos jóvenes de un pie en plantación intensiva.

Medida del volumen de la biomasa de las UHC de olivar

En cada UHC fueron elegidos 3 árboles representativos, donde se midieron la altura y diámetro de la copa y la longitud y diámetro mayor y menor del tronco y de las ramas principales y secundarias hasta un grosor mínimo de 2 cm de diámetro. Para ello se utilizó una forcípula forestal y una cinta métrica metálica rígida. Los datos para cada uno de los 3 olivos de la UHC fueron registrados en una tabla especialmente diseñada, para facilitar los cálculos volumétricos posteriores.

Asimismo se tomaron con la sonda Pressler cilindros del tronco de los árboles de las distintas variedades para contrastar la densidad de la madera.

Toma de muestras de suelo

En cada UHC se tomaron 5 muestras de suelo, distribuidas aleatoriamente en la parcela, con una sonda manual Eijkelkamp de 4 cm de diámetro a las profundidades de 0-30, 30-60 y 60-90 cm. Para cada profundidad se mezclaron las muestras de suelo.

Asimismo, también fueron tomadas muestras de suelo inalteradas para determinar la densidad aparente de las tres profundidades referidas, utilizándose una sonda Eijkelkamp con soporte de anillo cerrado (método “core cutter”).

Las muestras de suelos fueron llevadas al laboratorio y almacenadas a -30°C en congelador-frigorífico hasta su preparación para análisis.

Análisis de laboratorio

Las distintas muestras de madera para determinar la biomasa y la densidad fueron secadas en estufa hasta peso constante y posteriormente molidas. Las muestras de suelo fueron secadas al aire, trituradas, homogeneizadas y tamizadas.

En las muestras de madera fue determinado el contenido de C y en las de suelo el de C orgánico. En ambos casos mediante espectrometría de infrarrojo cercano (NIR), previa calibración por el método de combustión seca de Dumas, utilizando un equipo EA3000 Eurovector.

Cálculo de la biomasa y del contenido de C de los olivos

Mediante un programa informático especialmente diseñado, se calculó el volumen de la madera de cada árbol seleccionado considerando las medidas biométricas realizadas (longitud y diámetro del tronco y los distintos órdenes de ramificación). Las medidas de los 3 árboles de cada UHC fueron promediadas en un solo valor.

Los cilindros de madera obtenidos con la barrena Pressler, una vez secos, permitieron el cálculo de la densidad.

De esta forma, fue calculado el contenido de C de la biomasa de cada árbol y para cada UHC.

Cálculo del C orgánico del suelo

A partir de la densidad aparente del suelo determinada y de los resultados porcentuales obtenidos de C orgánico, se calculó el contenido en peso de C orgánico en las tres profundidades muestreadas: 0-30, 30-60 y 60-90 cm.

Estimación de modelos alométricos para predecir la acumulación de C en la biomasa del olivo

Fueron ensayadas distintas ecuaciones alométricas para determinar la tasa de acumulación de C por ha y año, en función de las distintas variables biométricas medidas en el conjunto de las UHC de las distintas APIs estudiadas.

Cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de las operaciones agrícolas

La determinación de los GEI, expresados en kg de C equivalente (CE) para cada UHC, fue realizada a partir de la ficha de cultivo elaborada por CITAGRO, utilizando los factores de emisión (FE) establecidos en la literatura científica, especialmente por Lal (2004. Carbon emission from farm operations. Environment International, 30: 981-990) y completada por la Guía de los Factores de Emisión Versión 6.1 (Bilan Carbone, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie). Los FE específicos del olivar fueron calculados de acuerdo con los datos energéticos y el estudio de rendimiento horarios de las diversas operaciones. En el anejo III se relacionan los FE utilizados para distintas operaciones de cultivo.

Determinación del balance y tasa de secuestro de C en las UHC de olivar

A partir de los datos de captura de C por la biomasa del olivar, el C almacenado en el suelo y las emisiones de GEI (expresadas en CE) de las operaciones de cultivo; se ha obtenido el Flujo Neto de C (FNC), expresado como tasa anual de secuestro de C por ha para cada UHC o también denominada huella de C (HC), mediante la fórmula:

$$FNC = C \text{ acumulado en biomasa aérea y radicular} + \text{Secuestro de C por el suelo} - \text{emisiones de C (CE) de las operaciones de cultivo}$$

4. RESULTADOS

4.- RESULTADOS

4.1.- Biomasa y contenido de C de las plantaciones de olivar

El estudio comparativo entre el peso de la biomasa aérea de los olivos arrancados y el determinado por la cubicación, a partir de las medidas dasométricas realizadas previamente en los mismos, mostró un buen grado de similitud, con diferencias no superiores al 10% en el conjunto. Los resultados del peso real de los olivos arrancados fueron siempre inferiores a los obtenidos a partir de la cubicación dasométrica.

La relación parte aérea/raíz, obtenida a partir de los olivos arrancados, prescindiendo de las hojas y ramas de diámetro inferior a 2 cm (material que no ha sido computado para el cálculo de la captura de C de la biomasa de olivar, al considerarse que en su mayoría se retira con la poda y recolección y es incorporado al suelo, donde puede transformarse en C estable con el tiempo) ha sido muy similar en las variedades Picual y Arbequina: 4.2 y 4.3, respectivamente. Dicha relación en los olivares viejos tradicionales con 3 pies fue muy superior (≈ 6), debido al importante papel que juegan las peanas, que por otro lado es muy difícil su cubicación; debido por un lado a su forma muy irregular y por otro a que con frecuencia parte de las mismas están bajo la superficie del suelo.

El contenido porcentual de C de la madera ha sido prácticamente similar en el tronco y los distintos tipos de ramas y la raíz, así como en las variedades. Este ha sido como promedio $45.7 \pm 0.6\%$.

La tabla 2 muestra para cada UHC el peso de la biomasa y el contenido de C de la parte aérea y de las raíces, por árbol y por ha de plantación.

El contenido medio de C por ha almacenado en la biomasa en el conjunto de las 24 UHC del estudio ha sido 6.3 ± 4.5 t/ha. La elevada desviación estándar constata la gran variabilidad de los valores de C capturado, que es función de la edad de la plantación, el marco de las mismas, la variedad y el tipo de suelo y el manejo del cultivo. Las plantaciones más antiguas, generalmente de tipo convencional, son las que ha acumulado mayor C por ha. Igual ocurre en las plantaciones más jóvenes de tipo intensivo y superintensivo, donde también la edad de plantación juega un papel importante (Tabla 2).

En las plantaciones intensivas de fechas de plantación similares, la acumulación de C en la variedad Picual es muy superior al de la variedad Arbequina: 5.4 y 3.1 t/ha, respectivamente (Tabla 2).

Las plantaciones superintensivas en seto, todas de la variedad Arbequina, superan en almacenamiento promedio de C por ha a las plantaciones intensivas de la misma variedad en más del doble: 6.7 t/ha frente 3.1 t/ha. Respecto a la variedad Picual la diferencia entre ambos sistemas de plantación es ligeramente superior al 20%, favorable a la plantación en seto de Arbequina.

En conjunto, las diferencias entre secano y regadío no han sido apreciadas debido a las diferencias de edad de las plantaciones, que al ser más antiguas en secano han enmascarado la comparación de resultados.

En síntesis, las plantaciones convencionales con más de 60 años y una densidad de plantación de 80 a 100 árboles/ha superan las 15 t/ha de C almacenado en su biomasa. Las plantaciones intensivas con una densidad en torno a los 200 árboles/ha pueden alcanzar dichos niveles a los 18 años de edad, sobre todo con la variedad Picual. En las plantaciones superintensivas en seto de la variedad Arbequina, con una edad media de plantación de 6 años, la captura media de C alcanza niveles medios comprendidos entre 7 y 8 t/ha. Es evidente, que dichas plantaciones tienen un gran potencial de secuestro de C en el tiempo, y son por tanto ambientalmente más favorables como sumidero de C y en la mitigación de los GEI.

Tabla 2. Biomasa y contenido de C de las Unidades Homogéneas de Cultivo (UHC) de olivar.

UHC	Variedad	Número olivos /ha	Sistema cultivo	Peso / olivo (kg)			Peso olivo /ha (t / ha)			Contenido de C (t / ha)		
				P. aérea	Raíz	Total	P. aérea	raíz	Total	P. aérea	raíz	Total
1	Picual	204	Riego	76	18	95	15.6	3.7	19.3	7.1	1.7	8.9
2	Hojiblanca	204	Riego	48	11	59	9.8	2.3	12.1	4.5	1.1	5.6
3	Picudo	83	Secano	298	99	397	24.6	8.2	32.8	11.3	3.8	15.1
4	Picual	83	Secano	218	73	291	18.0	6.0	24.0	8.3	2.8	11.0
5	Arbequina	1333	Riego	4	1	5	5.5	1.3	6.8	2.5	0.6	3.1
6	Arbequina	1975	Riego	5	1	7	10.6	2.5	13.1	4.8	1.1	6.0
7	Arbequina	1975	Riego	8	2	10	16.3	3.8	20.2	7.4	1.7	9.2
8	Arbequina	1975	Riego	8	2	10	15.6	3.7	19.3	7.1	1.7	8.8
9	Arbequina	286	Riego	8	2	10	2.3	0.5	2.8	1.0	0.2	1.3
10	Picual	208	Secano	8	2	10	1.6	0.4	2.0	0.7	0.2	0.9
11	Arbequina	286	Secano	9	2	12	2.7	0.6	3.3	1.2	0.3	1.5
12	Arbequina	1852	Riego	7	2	9	13.7	3.2	16.9	6.2	1.5	7.7
13	Picual	208	Riego	13	3	16	2.7	0.6	3.3	1.2	0.3	1.5
14	Picual	190	Riego	37	9	46	7.1	1.7	8.8	3.2	0.8	4.0
15	Picual	247	Riego	36	8	44	8.8	2.1	10.9	4.0	1.0	5.0
16	Picual	208	Riego	123	29	152	25.6	6.1	31.6	11.7	2.8	14.5
17	Picual	208	Riego	22	5	27	4.5	1.1	5.5	2.1	0.5	2.5
18	Arbequina	500	Riego	14	3	18	7.1	1.7	8.8	3.2	0.8	4.0
19	Picual	100	Riego	265	88	354	26.5	8.8	35.4	12.2	4.1	16.3
20	Arbequina	238	Secano	55	13	68	13.2	3.1	16.3	6.0	1.4	7.4
21	Arbequina	238	Riego	15	3	18	3.5	0.8	4.3	1.6	0.4	1.9
22	Arbequina	238	Secano	12	3	15	2.8	0.7	3.5	1.3	0.3	1.6
23	Picual	179	Secano	83	20	103	14.9	3.5	18.4	6.8	1.6	8.5
24	Arbequina	238	Riego	35	8	43	8.2	1.9	10.1	3.7	0.9	4.6

4.2.- Contenido de C orgánico del suelo de las plantaciones de olivar

La tabla 3 muestra el contenido de C orgánico del suelo analizado en el estudio, expresado como porcentaje y en peso (t/ha), de los horizontes 0-30, 30-60 y 60-90 cm y del conjunto del perfil del suelo (0-90 cm). Para el cálculo fue utilizada la densidad aparente de cada tipo de suelo, determinada en la toma de muestra en campo.

El porcentaje medio de C orgánico en el horizonte superficial del suelo (0-30 cm) fue 0.7%, más del doble que en el horizonte intermedio de 30-60 cm (0.32%). En el horizonte inferior (60-90 cm) el promedio fue 0.21%. En conjunto, los suelos de las unidades de olivar del estudio, con algunas excepciones, tuvieron un contenido bajo de materia orgánica: 1.2% en el horizonte superior de 0-30 cm, 0.55% en el nivel 30-60 cm y 0.36% en 60-90 cm.

Los valores medios de C orgánico de los suelos, expresados en t/ha, fueron 26.1 ± 11 , 12.2 ± 7.5 y 8.1 ± 8.9 t/ha para los horizontes 0-30, 30-60 y 60-90 cm, respectivamente. El horizonte superficial tuvo como promedio el 56% del C orgánico del perfil del suelo, el 26.3% el horizonte intermedio y el 18.0% el inferior.

El perfil completo (0-90 cm) del conjunto de los suelos estudiados tuvo un contenido medio de C orgánico de 46.4 ± 20.5 t/ha. Hay que valorar que el C orgánico almacenado en los dos horizontes inferiores (30-60 y 60-90 cm) es más valioso desde el punto de vista del secuestro de C por el suelo, al no estar sometido a las labores y ser menor la acción de los microorganismos que en el horizonte superficial (0-30 cm); es decir es un C menos lábil, más estable.

Tabla 3. Contenido de carbono orgánico en el suelo según distintas profundidades en las Unidades Homogéneas de Cultivo (UHC) de olivar.

UHC	Variedad	Número olivos /ha	Sistema cultivo	Manejo del suelo		Contenido de C (%)			Contenido de C (t/ ha)			
				cubierta vegetal	residuos poda	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-90 cm
1	Picual	204	Riego	Silvestre	si	0.82	0.28	0.60	34.3	11.6	25.2	71.1
2	Hojiblanca	204	Riego	Silvestre	si	0.62	0.53	0.03	26.0	22.44	1.3	49.7
3	Picudo	83	Secano	no	no	0.32	0.32	0.00	13.5	13.4	0.04	26.9
4	Picual	83	Secano	no	no	0.52	0.59	0.57	21.8	24.9	24.1	70.7
5	Arbequina	1333	Riego	no	no	1.33	0.56	0.03	40.0	16.8	0.84	57.6
6	Arbequina	1975	Riego	Silvestre	no	0.76	0.25	0.11	32.0	10.5	4.4	47.0
7	Arbequina	1975	Riego	no	no	0.29	0.12	0.12	12.3	5.2	5.12	22.6
8	Arbequina	1975	Riego	no	no	0.79	0.29	0.10	33.2	12.3	4.1	49.6
9	Arbequina	286	Riego	no	no	0.41	0.30	0.30	17.35	12.8	12.7	42.8
10	Picual	208	Secano	Silvestre	no	1.01	0.59	0.26	30.2	17.7	7.7	55.7
11	Arbequina	286	Secano	Silvestre	no	0.97	0.11	0.07	29.0	3.4	2.0	34.5
12	Arbequina	1852	Riego	Silvestre	no	0.76	0.39	0.71	32.1	16.2	29.9	78.2
13	Picual	208	Riego	Silvestre	no	0.86	0.43	0.40	36.0	18.0	16.9	70.8
14	Picual	190	Riego	Silvestre	no	0.55	0.39	0.13	23.1	16.5	5.3	44.9
15	Picual	247	Riego	no	no	0.35	0.14	0.21	14.7	5.8	8.6	29.1
16	Picual	208	Riego	no	no	0.80	0.19	0.00	33.6	8.1	0.04	41.8
17	Picual	208	Riego	no	no	0.56	0.12	0.16	23.4	5.04	6.8	35.2
18	Arbequina	500	Riego	Silvestre	si	0.51	0.48	0.49	15.4	14.5	14.8	44.7
19	Picual	100	Riego	Silvestre	si	0.14	0.00	0.07	4.23	0.03	2.0	6.2
20	Arbequina	238	Secano	Silvestre	no	0.95	0.13	0.00	39.7	5.6	0.04	45.4
21	Arbequina	238	Riego	Silvestre	no	0.96	0.70	0.42	40.1	29.4	17.6	87.1
22	Arbequina	238	Secano	Silvestre	no	1.11	0.29	0.20	33.3	8.7	6.0	47.9
23	Picual	179	Secano	Silvestre	no	1.22	0.47	0.00	36.7	14.0	0.03	50.6
24	Arbequina	238	Riego	Silvestre	no	0.09	0.00	0.00	3.8	0.04	0.04	3.9

En la tabla 4, se incluye el contenido de C orgánico de los suelos de las UHC, según los análisis proporcionados por los agricultores y el año en que los mismos fueron realizados (denominándose C orgánico inicial). En otra columna se adjuntan los datos de los análisis de C orgánico realizados en el presente estudio, pero referidos sólo al horizonte superficial (0-30 cm) (denominándose C orgánico actual), a efectos de comparación con los análisis suministrados por los agricultores, que los laboratorios normalmente realizan sólo en muestras de suelo de capa arable (\approx 0-30 cm de profundidad). La última columna de la tabla registra la diferencia de los contenidos de C orgánico de ambos análisis para cada UHC ($C_a - C_i$).

Tabla 4. Carbono orgánico almacenado en el suelo en el horizonte 0-30 cm según Unidades Homogéneas de Cultivo (UHC) de olivar.

UHC	Variedad	Número olivos /ha	Sistema cultivo	Manejo del suelo		C. Orgánico inicial (Ci)			C. Orgánico actual		Ca-Ci (t/ha)	
				cubierta vegetal	residuos poda	año	(Ci)		(%)	(Ca)		
							(%)	(t/ha)		(%)		(t/ha)
1	Picual	204	Riego	Silvestre	si	2012	1.11	46.5	0.82	34.3	-12.3	
2	Hojiblanca	204	Riego	Silvestre	si	2012	1.11	46.5	0.62	26.0	-20.5	
3	Picudo	83	Secano	no	no	2010	0.81	34.1	0.32	13.5	-20.6	
4	Picual	83	Secano	no	no	1998	0.35	14.6	0.52	21.8	7.2	
5	Arbequina	1333	Riego	no	no	2011	0.57	17.1	1.33	40.0	22.9	
6	Arbequina	1975	Riego	Silvestre	no	2011	0.57	23.9	0.76	32.0	8.2	
7	Arbequina	1975	Riego	no	no	2011	0.52	21.9	0.29	12.3	-9.7	
8	Arbequina	1975	Riego	no	no	2011	0.52	21.9	0.79	33.2	11.3	
9	Arbequina	286	Riego	no	no	2011	0.52	21.9	0.41	17.3	-4.6	
10	Picual	208	Secano	Silvestre	no	2011	0.57	17.1	1.01	30.2	13.2	
11	Arbequina	286	Secano	Silvestre	no	2011	0.93	28.0	0.97	29.0	1.0	
12	Arbequina	1852	Riego	Silvestre	no	2011	0.57	23.9	0.76	32.1	8.2	
13	Picual	208	Riego	Silvestre	no	2011	0.57	23.9	0.86	36.0	12.1	
14	Picual	190	Riego	Silvestre	no	2011	0.57	23.9	0.55	23.1	-0.8	
15	Picual	247	Riego	no	no	2011	0.37	15.6	0.35	14.7	-0.8	
16	Picual	208	Riego	no	no	2011	0.57	23.9	0.80	33.6	9.8	
17	Picual	208	Riego	no	no	2011	0.57	23.9	0.56	23.4	-0.4	
18	Arbequina	500	Riego	Silvestre	si	2001	0.26	7.7	0.51	15.4	7.7	
19	Picual	100	Riego	Silvestre	si	2001	0.26	7.7	0.14	4.2	-3.4	
20	Arbequina	238	Secano	Silvestre	no	2009	0.59	24.6	0.95	39.7	15.1	
21	Arbequina	238	Riego	Silvestre	no	2009	0.59	24.6	0.96	40.1	15.5	
22	Arbequina	238	Secano	Silvestre	no	2009	0.78	23.3	1.11	33.3	9.9	
23	Picual	179	Secano	Silvestre	no	2009	0.78	23.3	1.22	36.7	13.3	
24	Arbequina	238	Riego	Silvestre	no	2009	0.30	12.4	0.09	3.8	-8.6	

Las diferencias entre el contenido de C orgánico del suelo procedente de los análisis históricos facilitados por los agricultores y de los valores determinados en el estudio fue negativa en muchas de las parcelas, lo que indica pérdidas en el tiempo de C orgánico del suelo. En otras, la diferencia fue positiva y en algún caso con valores importantes de incremento de las reservas de C orgánico. Este apartado del estudio es el que presenta menos fiabilidad para el cálculo del balance y huella de C de las plantaciones de olivar, debido a que los análisis proporcionados por los agricultores son de fecha relativamente reciente. El escaso diferencial de tiempo entre dichos análisis y los realizados en

el estudio, dificulta que se manifieste un incremento de la materia orgánica del suelo derivado de las mejoras en el manejo del mismo (cubiertas vegetales, no laboreo, enterrado de restos de poda, etc...). Además, con algunas excepciones, las prácticas de manejo del suelo de muchas parcelas no han sido muy favorables para incrementar progresivamente las reservas de C orgánico del suelo.

4.3.- Almacenamiento de C en la biomasa y el suelo de las parcelas de olivar

La Tabla 5 muestra el almacenamiento de C orgánico total de las UHC del estudio, integrado por el C contenido en la biomasa de los árboles y el C orgánico del suelo en el perfil 0-90 cm. El almacenamiento medio de C en las parcelas de olivar estudiadas ha sido 52.7 ± 19.7 t/ha, correspondiendo el 12% al C de la biomasa y el 88% al C orgánico del suelo en el perfil 0-90 cm. No obstante, esta diferencia a favor del suelo no debe inducir a infravalorar el contenido de C de la biomasa del árbol, pues de hecho su captura es más estable y mantienen una tasa de aumento más constante, relacionada con el crecimiento de la plantación. El C orgánico del suelo es menos estable y su acumulación es más lenta y requiere prácticas de manejo que la favorezcan; tales como laboreo de conservación y no laboreo, no retirar los residuos del cultivo, etc. Por el contrario, el laboreo intensivo y la retirada de residuos conducen a tasas negativas y por tanto a la reducción del C acumulado en el suelo. Por esta razón, las plantaciones arbóreas tienen potencialmente un secuestro de C superior y más estable que los cultivos herbáceos. Un número importante de las parcelas estudiadas han registrado altos niveles de almacenamiento de C, que superan los 80 t/ha, debido a la contribución de un suelo de calidad bien manejado y a plantaciones convencionales adultas bien

desarrolladas o plantaciones intensivas jóvenes bajo riego que generan un rápido crecimiento de la biomasa.

Tabla 5. Carbono almacenado en la biomasa y el suelo de la Unidades Homogéneas de Cultivo (UHC) de olivar.

UHC	Variedad	Número olivos /ha	Sistema cultivo	Año de Plantación	Almacenamiento de C (t / ha)		
					Biomasa	Suelo (0-90 cm)	Total
1	Picual	204	Riego	1994	8.9	71.1	80.0
2	Hojiblanca	204	Riego	1996	5.6	49.7	55.3
3	Picudo	83	Secano	1938	15.1	26.89	42.0
4	Picual	83	Secano	1970	11.0	70.7	81.8
5	Arbequina	1333	Riego	2009	3.1	57.6	60.7
6	Arbequina	1975	Riego	2007	6.0	47.0	52.9
7	Arbequina	1975	Riego	2007	9.2	22.6	31.8
8	Arbequina	1975	Riego	2007	8.8	49.6	58.4
9	Arbequina	286	Riego	2005	1.3	42.8	44.1
10	Picual	208	Secano	2007	0.9	55.7	56.6
11	Arbequina	286	Secano	2007	1.5	34.5	36.0
12	Arbequina	1852	Riego	2006	7.7	78.2	85.9
13	Picual	208	Riego	2006	1.5	70.8	72.3
14	Picual	190	Riego	2006	4.0	44.9	49.0
15	Picual	247	Riego	1995	5.0	29.1	34.1
16	Picual	208	Riego	1995	14.5	41.8	56.4
17	Picual	208	Riego	1994	2.5	35.2	37.8
18	Arbequina	500	Riego	2001	4.0	44.7	48.7
19	Picual	100	Riego	1955	16.3	6.2	22.5
20	Arbequina	238	Secano	2005	7.4	45.4	52.8
21	Arbequina	238	Riego	2007	1.9	87.1	89.1
22	Arbequina	238	Secano	2009	1.6	47.9	49.5
23	Picual	179	Secano	1995	8.5	50.6	59.1
24	Arbequina	238	Riego	2006	4.6	3.9	8.5

4.4.- Tasa anual de C almacenado en las parcelas de olivar

La tasa anual de C almacenado en la biomasa de las plantaciones y en el suelo de las mismas a la profundidad de 0-30 cm, es un parámetro necesario para estimar el balance neto de C o huella de C de cada parcela, una vez descontadas las emisiones de GEI derivadas de las operaciones de cultivo en la plantación.

Dicha tasa anual de C fue calculada dividiendo las cantidades de C acumuladas en la biomasa y el suelo por los años de edad de la plantación en el primer caso, y por los años transcurridos entre la realización de los análisis de suelo en el segundo caso. La tasa anual de C almacenado es un indicador imprescindible para el cálculo de la huella de C, de gran valor para evaluar el efecto que tienen las prácticas de manejo del olivar en el secuestro de C y las emisiones de GEI, y para establecer pautas de actuación que permitan mejorar el secuestro de C y mitigar la contaminación de GEI del agrosistema.

La tasa anual media de C acumulado en las parcelas estudiadas (biomasa y suelo) registró un promedio de 2.24 ± 2.2 t/ha/año, con alta variabilidad entre las mismas. Según la intensidad de plantación (Tabla 6) la plantaciones superintensivas registraron un valor medio notablemente más alto que el de las plantaciones intensivas (casi dos veces superior); siendo la tasa anual media de las plantaciones convencionales muy reducida en comparación con las anteriores. La tasa anual media de C acumulado en las parcelas de olivar estudiadas es muy superior exceptuando las plantaciones convencionales, si se compara con los sistemas de cultivos herbáceos de secano bajo no laboreo y sin retirada de la paja, con la determinada por López-Bellido et al. (2010) en la

misma área que sólo alcanzó una tasa media de secuestro de C en las condiciones más favorables de 1.3 t/ha/año.

Tabla 6. Tasa anual de carbono almacenado (t/ha/año) en las plantaciones de olivar de las Unidades Homogéneas de Cultivo (UHC)

UHC	Variedad	Número olivos /ha	Sistema cultivo	Año de Plantación	Carbono (kg/ha/año)					Tasa de C almacenado (t/ha/año)
					Biomasa			Suelo (0-30 cm)	Total	
					P aérea	raíz	Total			
1	Picual	204	Riego	1994	376	91	467	0	467	0.47
2	Hojiblanca	204	Riego	1996	264	64	328	0	328	0.33
3	Picudo	83	Secano	1938	150	51	201	0	201	0.20
4	Picual	83	Secano	1970	192	65	257	449	706	0.71
5	Arbequina	1333	Riego	2009	630	148	778	7636	8413	8.41
6	Arbequina	1975	Riego	2007	804	188	992	2724	3716	3.72
7	Arbequina	1975	Riego	2007	1238	290	1528	0	1528	1.53
8	Arbequina	1975	Riego	2007	1182	277	1459	3765	5225	5.22
9	Arbequina	286	Riego	2005	129	30	159	0	159	0.16
10	Picual	208	Secano	2007	125	30	155	4386	4540	4.54
11	Arbequina	286	Secano	2007	202	47	249	321	571	0.57
12	Arbequina	1852	Riego	2006	888	208	1096	2738	3833	3.83
13	Picual	208	Riego	2006	175	42	217	4026	4243	4.24
14	Picual	190	Riego	2006	464	112	575	0	575	0.58
15	Picual	247	Riego	1995	225	54	279	0	279	0.28
16	Picual	208	Riego	1995	651	157	808	3256	4063	4.06
17	Picual	208	Riego	1994	108	26	134	0	134	0.13
18	Arbequina	500	Riego	2001	270	63	333	593	926	0.93
19	Picual	100	Riego	1955	210	71	281	0	281	0.28
20	Arbequina	238	Secano	2005	751	176	927	3029	3956	3.96
21	Arbequina	238	Riego	2007	263	62	324	3105	3429	3.43
22	Arbequina	238	Secano	2009	319	75	393	1988	2382	2.38
23	Picual	179	Secano	1995	379	91	470	2668	3139	3.14
24	Arbequina	238	Riego	2006	534	125	659	0	659	0.66

4.5.- Estimación de un modelo de predicción para la acumulación de C en la biomasa de los olivos

Con los datos de las diferentes medidas dasométricas realizadas en las 22 HUOG de olivar estudiadas y los correspondientes al tipo de variedad y fechas y marcos de plantación, se ensayaron diferentes modelos predictivos

para estimar la tasa anual de acumulación de C en la biomasa de olivar. Sólo el número de árboles por ha, o marco de plantación, permitió ajustar un modelo lineal altamente significativo con la ecuación $y = 0.49x + 216$ ($R^2 = 0.87^{***}$) (Fig.1). Con este modelo puede calcularse la tasa anual de secuestro de C a partir de la variable y (expresada en kg/ha), introduciendo el número de olivo/ha de la plantación en la variable independiente x.

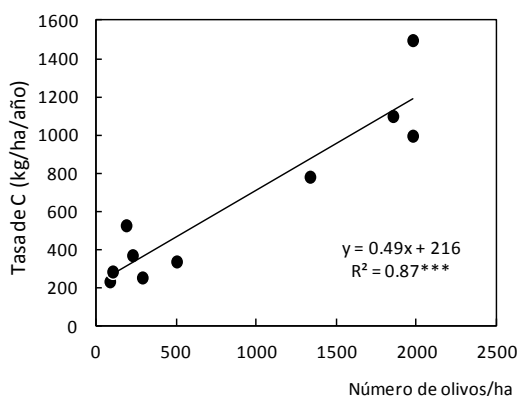


Figura 1. Modelo predictivo de la tasa anual de acumulación de carbono en olivar, en función del número de árboles/ha

El análisis de los datos según las variedades mostró diferencias entre Picual y Arbequina. En concreto, en las plantaciones intensivas del estudio el promedio de la tasa anual de secuestro de C fue 0.401 t/ha en la variedad Picual y 0.374 t/ha en Arbequina. Ello permitió estimar un coeficiente o factor de corrección de 1.1 para aplicar en el modelo, en el caso de tratarse de variedad Picual. De esta forma, el valor obtenido de la tasa anual de secuestro de C en la ecuación habrá que multiplicarlo por dicho factor (1.1) si la variedad considerada es Picual.

Similarmente, fueron analizados los datos según los sistemas de regadío y seco. El promedio de la tasa anual de secuestro de C en seco fue 0.303 t/ha y en regadío 0.374 t/ha. En consecuencia, el coeficiente o factor de corrección a aplicar al modelo para el olivar de seco es 0.8. Por tanto, como en el caso anterior, el valor obtenido de la tasa anual de secuestro de C en la ecuación habrá que multiplicarlo por el factor 0.8 si el olivar es de seco.

4.6.- Cálculo de las emisiones de GEI de las plantaciones de olivar

Como ha sido explicado en la metodología, se han aplicado los factores de emisión de GEI expresados como C equivalente (kg CE/ha), de las operaciones de cultivo, incluidos los fertilizantes y productos fitosanitarios utilizados en cada parcela estudiada (Tabla 7). La media de emisiones totales de las operaciones de cultivo de las parcelas del estudio ha sido 113 ± 54 kg CE/ha; con importantes diferencias entre las mismas. Estos valores de emisión se consideran relativamente bajos en comparación con otros cultivos arbóreos e incluso en relación con algunos sistemas herbáceos. El apartado de emisiones de GEI más relevante es el riego y en algunos casos el de los fertilizantes. Estos bajos niveles de emisiones de C derivados de las operaciones de cultivo son consecuencia de los bajos inputs requeridos por el cultivo de olivar, incluso en plantaciones intensivas bajo riego. Ello es un factor muy favorable para el balance y huella de C, que se verá favorecido con un mayor flujo neto y secuestro de C.

Tabla 7. Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) derivadas de las operaciones de cultivo en las Unidades Homogéneas de Cultivo (UHC) de olivar, expresadas como C equivalente (CE).

UHC	Variedad	(Kg CE /ha)								Total
		Labores	Riego	Fertilizantes	Herbicidas	Fungicidas	Insecticidas	Aplicación	Cosechadora	
1	Picual	32.9	84.9	1.7	0	17.4	0.4	3.6	9.4	150
2	Hojiblanca	32.9	84.9	1.7	0	17.4	0.4	3.6	9.4	150
3	Picudo	13.8	0	20.2	25.0	8.6	4.9	5.5	9.4	87
4	Picual	13.8	0	2.5	0	1.7	0.0	0.9	9.4	28
5	Arbequina	9.5	84.9	29.0	6.8	10.9	2.4	11.7	14.1	169
6	Arbequina	9.5	84.9	0.1	18.7	11.0	2.7	9.6	14.1	151
7	Arbequina	13.5	84.9	29.0	13.1	11.7	5.5	11.7	14.1	184
8	Arbequina	9.5	84.9	7.9	10.1	10.9	2.7	12.6	14.1	153
9	Arbequina	9.5	84.9	7.9	10.1	10.9	2.7	12.6	9.4	148
10	Picual	9.5	0	0.1	12.4	0.2	2.4	5.5	9.4	39
11	Arbequina	9.5	0	0.1	12.4	0.2	2.4	5.5	9.4	39
12	Arbequina	9.5	84.9	7.9	10.1	10.9	2.4	11.7	14.1	152
13	Picual	9.5	84.9	7.9	10.1	5.5	2.4	10.8	9.4	140
14	Picual	9.5	84.9	7.9	10.1	10.9	2.4	11.7	9.4	147
15	Picual	9.5	84.9	0.3	0	6.7	4.7	9.4	9.4	125
16	Picual	9.5	84.9	0.3	0	1.0	1.7	8.5	9.4	115
17	Picual	9.5	84.9	0.3	0	1.0	1.7	8.5	9.4	115
18	Arbequina	2.2	84.9	4.6	18.6	2.3	0.0	6.4	9.4	128
19	Picual	2.2	84.9	4.6	18.6	2.3	0.0	6.4	9.4	128
20	Arbequina	5.8	0	0	7.3	0	0.5	3.2	9.4	26
21	Arbequina	5.8	84.9	0	7.3	0	0.5	3.2	9.4	111
22	Arbequina	5.8	0	0	0	0	2.0	1.8	9.4	19
23	Picual	5.8	0	0	0	0	2.0	1.8	9.4	19
24	Arbequina	0	84.9	62.0	13.2	0.7	2.0	6.9	9.4	179

4.7.- Balance y huella de carbono de las plantaciones de olivar

La Tabla 8 muestra el balance y huella de C de las UHC de olivar estudiadas. El promedio del balance y huella de C de las parcelas estudiadas ha sido 2.13 ± 2.18 t/ha/año de C, con gran variabilidad entre parcelas, algunas de las cuales tuvieron valores de C superiores a 4 t/ha/año y en un caso se alcanzaron las 8 t/ha/año. Según la intensidad de plantación (Tabla 9) las plantaciones superintensivas registraron valores notablemente superiores a las intensivas y por supuesto a las convencionales. En concreto el balance de C fue

positivo y en consecuencia la huella de C negativa, en las tres intensidades de plantación, pero con valores 9 veces y casi 5 veces superiores en las plantaciones superintensivas e intensiva, respectivamente, respecto a las convencionales.

Tabla 8. Balance y huella de carbono de las Unidades Homogéneas de Cultivo (UHC) de olivar.

UHC	Variedad	Número olivos /ha	Sistema cultivo	Año de Plantación	Flujo Neto de C			Huella de C (t/ha/año)
					Secuestro C (kg/ha/año)	Emisiones (kg CE)	Balance (kg/ha/año)	
1	Picual	204	Riego	1994	467	150	316	0.32
2	Hojiblanca	204	Riego	1996	328	150	178	0.18
3	Picudo	83	Secano	1938	201	87	114	0.11
4	Picual	83	Secano	1970	706	28	677	0.68
5	Arbequina	1333	Riego	2009	8413	169	8244	8.24
6	Arbequina	1975	Riego	2007	3716	151	3566	3.57
7	Arbequina	1975	Riego	2007	1528	184	1345	1.34
8	Arbequina	1975	Riego	2007	5225	153	5072	5.07
9	Arbequina	286	Riego	2005	159	148	11	0.01
10	Picual	208	Secano	2007	4540	39	4501	4.50
11	Arbequina	286	Secano	2007	571	39	531	0.53
12	Arbequina	1852	Riego	2006	3833	152	3682	3.68
13	Picual	208	Riego	2006	4243	140	4103	4.10
14	Picual	190	Riego	2006	575	147	428	0.43
15	Picual	247	Riego	1995	279	125	154	0.15
16	Picual	208	Riego	1995	4063	115	3948	3.95
17	Picual	208	Riego	1994	134	115	19	0.02
18	Arbequina	500	Riego	2001	926	128	798	0.80
19	Picual	100	Riego	1955	281	128	152	0.15
20	Arbequina	238	Secano	2005	3956	26	3930	3.93
21	Arbequina	238	Riego	2007	3429	111	3318	3.32
22	Arbequina	238	Secano	2009	2382	19	2363	2.36
23	Picual	179	Secano	1995	3139	19	3120	3.12
24	Arbequina	238	Riego	2006	659	179	480	0.48

Tabla 9. Tasa anual de secuestro de C en la parte aérea, raíz y el suelo, según las diferentes densidades de plantación

Densidad de plantación	Tasa de secuestro de C (kg/ha/año)				
	Biomasa			Suelo (0-30 cm)	Total
	Parte aérea	Raíz	Total		
Convencional	178c	60b	238c	224c	462c
Intensiva	438b	104b	542b	1596b	2138b
Superintensiva	958a	224a	1182a	3076a	4258a

5. DISCUSIÓN

5.- DISCUSIÓN

Pocos estudios han sido realizados para valorar el secuestro y huella de C de plantaciones de olivar, que en su mayoría se han llevado a cabo principalmente en el sur de España y en menor grado en Italia. Además tales estudios han diferido notablemente en las metodologías usadas y en los resultados obtenidos. Villalobos et al. (2006) en plantaciones de olivar intensivo bajo riego en el sur de España ha estimado un secuestro potencial de C de 1.91 t C/ha/año utilizando un modelo basado en la Radiation Use Efficiency (RUE). Dicho valor es ligeramente inferior al promedio global de conjunto de parcelas de nuestro estudio (2.24 ± 22.2 t C/ha/año), aunque muy similar a la tasa anual de secuestro de C obtenida específicamente para las plantaciones de olivar intensivas (2.07 t C/ha/año).

También Morales y Villalobos (2010), con medidas de flujo de CO₂ y H₂O por covarianza de torbellinos y medidas de crecimiento y producción en una plantación intensiva de la variedad Arbequina y la aplicación del modelo funcional OLIVE-CW obtuvieron una capacidad máxima de secuestro de C con un valor medio de 5.4 t C/ha/año, que representa prácticamente el doble del promedio de nuestros resultados (2.24 ± 2.2 t C/ha/año); aunque los valores máximos, fueron más próximos, sin superarlos. Con independencia de la metodología aplicada, dichos valores máximos fueron obtenidos por estos autores considerando en el modelo una poda ligera y el picado e incorporación de los residuos de poda al suelo. En nuestro estudio de los suelos, de las diferentes plantaciones de olivar, como se ha mencionado en los resultados, la tasa anual de acumulación de C orgánico en el suelo fue negativa en muchas parcelas indicando pérdidas de C orgánico del suelo en el tiempo, como consecuencia de un deficiente manejo de los suelos.

Por el contrario, Nieto et al. (2010), utilizando el modelo Roth C, de fuentes y sumideros de C, han reportado valores de secuestro potencial entre 0.5 y 0.6 t C/ha/año según el tipo de suelo, notablemente más bajos que los resultados medios obtenidos en nuestro estudio para las plantaciones intensivas y superintensivas, pero similares a los alcanzados en las plantaciones convencionales.

Con independencia del importante papel de la biomasa en las plantaciones de olivar en la tasa anual de secuestro de C, y que está directamente relacionada con la densidad de plantación, según nuestros resultados, y que también han sido constatados por Sofo et al. (2005) en el sur de Italia; la tasa de secuestro de C por el suelo puede jugar un papel relevante con un manejo adecuado. Según Ramachandra Nair et al. (2010), los sistemas agrícolas basados en árboles, comparados con los sistemas sin árboles, almacenan más C en las capas más profundas del suelo cerca del árbol que lejos de éste, siendo los contenidos más altos de C orgánico del suelo con la mayor densidad de árboles y los suelos con más partículas de limo + arcilla, en los que el C es más estable. Aunque la cantidad total de C secuestrado, tanto por encima como en el interior del suelo, depende de numerosos factores como la región, tipo y edad de la plantaciones, características del suelo, etc, según Lal (2008), en promedio el suelo y las partes aéreas se estima contienen aproximadamente el 60% y 30% respectivamente del C total almacenado en los sistemas de uso de la tierra basado en árboles.

Numerosos estudios realizados en el manejo de los suelos de plantaciones de olivar, tales como el no laboreo, la utilización de cubiertas vegetales (cultivos de cobertura o vegetación nativa) la incorporación de los residuos de poda, demuestran que son más unas prácticas eficientes y una

estrategia adecuada que pueden mejorar las propiedades del suelo, disminuir las emisiones de CO₂ e incrementar la capacidad de suelo para almacenar C (Castro et al., 2008; Nieto et al., 2010 y 2012; Repullo et al., 2012). Esta influencia ha sido constatada en nuestros estudios, donde las parcelas de olivar con un adecuado manejo, bien mediante el no laboreo o el uso de cubiertas vegetales y/o incorporación de residuos de poda, fueron las que mostraron una tasa de secuestro de C por el suelo positiva y contribuyeron a generar los valores más altos de la tasa global de C secuestrado por el olivar.

En definitiva, las plantaciones de olivar muestran un alto potencial de secuestro de C, aunque existen numerosas cuestiones que necesitan ser clarificadas para valorar de forma realista el impacto de las plantaciones arbóreas y las prácticas de manejo en el secuestro de C. Es necesaria más investigación para evaluar todos los componentes del flujo de C y su dependencia de los factores ambientales y el manejo del cultivo.

6. CONCLUSIONES

6.- CONCLUSIONES

Se ha constatado el gran potencial de captura de C estable de las plantaciones de olivar, especialmente las de tipo intensivo, lo cual pone de manifiesto su relevante papel como sumidero de CO₂ y en la mitigación de GEI. El balance neto de C claramente positivo de las plantaciones de olivar constituye un factor muy positivo en la valoración del ciclo de vida y el cálculo de la huella de C del aceite de oliva como producto final.

Las medidas dasométricas realizadas en las parcelas de olivar estudiadas han permitido ajustar un modelo lineal altamente significativo en función del número de árboles por ha, para estimar la tasa anual de acumulación de C en la biomasa del olivar.

Las medidas dasométricas realizadas en las parcelas de olivar estudiado han permitido ajustar un modelo lineal altamente significativo en función del número de árboles por ha, para estimar la tasa anual de acumulación de C en la biomasa del olivar.

Aunque los suelos agrícolas pueden representar un relevante reservorio de C orgánico, y por tanto un importante sumidero de éste, no siempre las labores y las prácticas de manejo contribuyen a que esto sea posible. Por el contrario, el laboreo intensivo y la retirada y/o quema de los residuos pueden generar una pérdida progresiva de la materia orgánica del suelo, el deterioro de su fertilidad y de su calidad como reservorio de C. Esta situación ocurre en gran parte de las plantaciones de olivar estudiadas, donde el deficiente manejo del suelo ha generado una tasa negativa de acumulación de C orgánico en el tiempo. En este sentido, es recomendable llevar a cabo

mejoras en el manejo del suelo, tales como laboreo de conservación, manejo e incorporación de residuos, uso de cubiertas vegetales, etc., con el fin de incrementar progresivamente la acumulación de C en el suelo y que éste contribuya de forma consistente a medio y largo plazo a mejorar el balance de C del agrosistema del olivar.

No considerar el secuestro de C que potencialmente puede realizar la biomasa y el suelo de las plantaciones de olivar en el cálculo de la huella de C del aceite de oliva, supone un grave error metodológico que vulnera los fundamentos en que se basan los estudios del ciclo de vida y del balance de C de las materias primas agrícolas. Con la inclusión de la tasa de secuestro de C de las plantaciones de olivar, la huella de la C de elaboración y comercialización del aceite de oliva podría ser reducida notablemente, incluso ser negativa, al superar la captura de C de olivar (biomasa + suelo) a las emisiones derivadas de las operaciones de cultivo y de los procesos de fabricación del aceite.

Del presente estudio se infiere a escala global, dada la gran importancia de la superficie de las plantaciones de olivar del área Mediterránea, especialmente en España, con más de 2.5 millones de ha, la importancia que éstas pueden representar como importante sumidero de CO₂ y contribuir a mitigar de forma notable las emisiones de GEI de la actividad agrícola.

7. REFERENCIAS

7.- REFERENCIAS

- ADEME. 2010. Bilan Carbone: Guía de factores de emisión. Version 6.1. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, Paris.
- AENOR. 2012. Normas ISO 14064-1: 2006. Gases de efecto invernadero. Parte 1: especificaciones y orientaciones, a nivel de la organización, para la cuantificación y la declaración de las emisiones y reducciones de gases de efecto invernadero. Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid.
- Bessou, C., F. Ferchaud, B. Gabrielle, B. Mary, 2011. Biofuels, greenhouse gases and climate change. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 31, 1-79.
- Bolinder M.A., Janzen H.H., Gregorich E.G., Angers D.A. and VandenBygaart A.J. 2007. An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 118, 29-42.
- Brandão, M. Milá i Canals, Ll, Clift, R. 2011. Soil organic carbon changes in the cultivation of energy crops: implications for GHG balances and soil quality for use in LCA. *Biomass Bioenerg.* 35: 2323-2336.
- Castro J., Fernandez-Ondoño E., Rodriguez 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 Jaen (Spain). *Soil and Tillage Research*. 98, 56-67.
- Ceschia, E., P. Béziat, J. F. Dejoux, M. Aubinet, C. Bernhofer, B. Bodson, N. Buchmann, A. Carrara, P. Cellier, P. Di Tommasi, J. A. Elbers, W. Eugster, T. Grünwald, C. M. J. Jacobs, W. W. P. Jans, M. Jones, W. Kutsch, G. Lanigan, E. Magliulo, O. Marloie1, E. J. Moors, C. Moureaux, A. Olliso, B. Osborne, M. J. Sanz, M. Saunders, P. Smith, H. Soegaard and M. Wattenbach. 2010. Management effects on net ecosystem carbon and GHG budgets at European crop sites. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 139, 363-383.
- Cowie, A., Eckard, R., Eady S. 2012 Greenhouse gas accounting for inventory, emissions trading and life cycle assessment in the land-bases sector: a review. *Crop & Pasture Science*, 63, 284-296.
- Chapin, F.S. III; Woodwell, G.M; Randerson, J.T.; Lovett, G.M.; Rastetter, E.B.; Baldocchi, D.D.; Clark, D.A.; Harmon, M.E.; Schimel, D.S.; Valentini R.; Wirth C.; Aber J.D.; Cole J.J.; Goulden M.L.; Harden J.W.; Heimann M.; Howarth R.W.; Matson P.A.; McGuire A.D.; Melillo J.M.; Mooney, H.A.; Neff, J.C.; Houghton, R.A.; Pace, M.L.; Ryan, M.G.; Running, S.W.; Sala, O.E.; Schlesinger, W.H.; Schulze, E. D. (Eds.) 2006. Reconciling carbon-cycle concepts, terminology, and methodology. *Ecosystems* 9 (7), 1041-1050.

- Eagle A, Olander LP. 2012. Greenhouse gas mitigation with agricultural land management activities in the United States A side by side comparison of biophysical potential. *Advances in Agronomy*. 115, 79-179.
- Gan, Y., Liang, C., Campbell, C.A., Zentner, R.P., Lemke, R.L., Wang, H., Yang, C. 2012. Carbon footprint of spring wheat in response to fallow frequency and soil carbon changes over 25 years on the semiarid Canadian prairie. *European Journal of Agronomy*, 43, 175-184.
- Hertwich, E.G., Peters, G.P. 2009. Carbon footprint and nations: a global, trade-linked analysis. *Environmental Science Technology*, 43, 6414-6420.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The physical science basic*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.
- Lal, R. 2002. Why carbon sequestration in Agricultural soils?. En *Agricultural Policies and Practices for Carbon Sequestration in Soils*, pp: 21-30. Kimble, J., Lal, R. y Follett, R.F. (eds). CRC Press, Boca Raton, FL.
- Lal, R. 2004. Carbon emisión from farm operations. *Environment Internacional*, 30, 981-990.
- Lal R. 2008. Soil carbon stocks under present and future climate with specific reference to European ecoregions. *Nutrient Cycl. in Agroecosystem*. 81, 113-127.
- Lal R. 2012. Agronomic interactions with CO₂ sequestration. In: *Encyclopedia of Sustainability and Technology*. Meyers R, Christou P, Savin R (Eds). Springer, New York, 161-167.
- Morales A, Villalobos FJ. 2010. Modelización del balance de CO₂ en olivares. Final Project. University of Córdoba, Spain.
- Nieto OM, Castro J, Fernández E, Smith P. 2010. Simulation of soil carbon stocks in a Mediterranean olive grove under different soil-management systems using the RothC model. *Soil Use Manage*. 26, 118-125.
- Nieto OM, Castro J, Fernandez-Ondoño E. 2013. Conventional tillage versus cover corps in relation to carbon fixation in Mediterranean olive cultivation. *Plant Soil* 365, 321-335.
- Olson KR, Al-Kaisi MM, Lal R, Lowery B. 2014. Experimental consideration, treatments, and methods in determining soil organic carbon sequestration rates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 78, 348-360.
- Pandey D, Agrawal M. 2014. Carbon footprint estimation in the agriculture sector. In: *Assessment of carbon footprint in different industrial sectors Vol I*. Muthu SS (Ed). Springer, Singapore, 25-47.
- Payraudeau, S., Hayo, M.G., Van der Werf. 2005. Environmental impact assessment for a farming region: a review of methods. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 107, 1-19.
- Pelletier, N., P. Lammers, D. Stender, R. Pirog. 2010. Life cycle assessment of high-and low-profitability commodity and deep-bedded niche swine

- production systems in the Upeer Midwestern United States. *Agricultural Systems*, 103, 599-608.
- Peters, G.P. 2010. Carbon footprints and embodied carbon at multiple scales. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2 (4), 245-250.
- Ramachandran Nair PK, Nair VD, Mohan Kumar B, Showalter JM. 2010. Carbon sequestration in agroforestry systems. *Adv. Agron.* 108, 237-307.
- Repullo MA, Carbonell R, Hidalgo J, Rodriguez-Lizana A, Ordoñez R. 2012. Using olive pruning residues to cover soil and improve fertility. *Soil Tillage Res.* 124, 36-46.
- Schlesinger W.H. 2005. Inorganic carbon and the global C cycle. En "Encyclopedia or Soil Science" (ed. R. Lal). Taylor & Francis, Londres, 879-881.
- Smith, P., G. Lanigan, W. L. Kutsch, N. Buchmann, W. Eugster, M. Aubinet, E. Ceschia, P. Béziat, J. B. Yeluripati, B. Osborne, E. J. Moors, A. Brut, M. Wattenbach, M. Saunders, M. Jones. 2010. Measurements necessary for assessing the net ecosystem carbon budget of croplands. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 139, 302-315.
- Sofo, A., Nuzzo, V., Palese, A.M., Xiloyannis, C., Celano, G., Zukowskyj, P., Dichio, B. 2005. Net CO₂ storage in Mediterranean olive and peach orchards. *Scientia Horticulturae*, 107, 17-24.
- Swift, R.S. 2001. Sequestration of carbon by soil. *Soil Science* 166: 858-871.
- Testi, L., Orgaz, F., Villalobos, F. 2008. Carbon exchange and water use efficiency of a growing, irrigated olive orchard. *Environmental and Experimental Botany*, 63, 168-177.
- Villalobos, F.J., Testi, L., Hidalgo, J., Pastor, M., Orgaz, F. 2006. Modelling potential growth and yield of olive (*Olea europaea* L.) canopies. *European Journal of Agronomy*, 24, 296-303.
- West, T.O., Marland, G. 2002. Net carbon flux from agricultural ecosystems: methodology for full carbon cycle analyses. *Environmental Pollution*, 116, 439-444.

ANEJO I:

Fichas de Unidades Homogéneas de Cultivo (UHC) de olivar

		UHC
NOMBRE DE LA FINCA:	RACIONEROS 1	1
SITUACIÓN:	Baeza (Jaén)	
SUPERFICIE:	25.25 ha	
VARIEDAD:	Arbequina	
FECHA DE PLANTACIÓN:	2001	
MARCO DE PLANTACIÓN:	8x2.5 m	
SISTEMA DE CULTIVO:	Riego por goteo	
COBERTURA VEGETAL:	Silvestre	
ANÁLISIS DE SUELO (2001):	Textura: Franco-arcilloso-arenoso PH: 7.8 MO: 0.44 % C/N: 3 N: 0.08 % P: 92 ppm K: 212 ppm	
OPERACIONES DE CULTIVO:	Labores: <hr/> Fertilización: Cloruro potásico 60 %: 0.08 l/ha 5-0-51 + MICRO : 3.48 l/ha 20-5-30 + MICRO: 0.5 l/ha 11-5-37 +2Boro: 3.83 l/ha Urea 46 %:0.5 l/ha 3.5-0-42 +MgO+ Aminoácidos (aa): 3.48 l/ha Estesan 7-5-40 + 2B: 8.33 kg /ha 6.67 kg/ha Cloruro potásico 60 %: 6.67 kg/ha Amisan Revitalizador 7.4+33.9 MO+8.4 aa: 0.46 l/ha <hr/> Herbicidas: Glifosato 36 %: 4.5 l/ha MCPA 60 %: 1 l/ha Oxifluorfen 24 %: 1.5 l/ha <hr/> Fungicidas: 1.13 l/ha Oxicloruro de cobre 52 %: 1.13 l/ha <hr/> Insecticidas :	

NOMBRE DE LA FINCA:	RACIONEROS 2	UHC 2
SITUACIÓN:	Baeza (Jaén)	
SUPERFICIE:	98.86 ha	
VARIEDAD:	Picual	
FECHA DE PLANTACIÓN:	1955	
MARCO DE PLANTACIÓN:	10x10 m	
SISTEMA DE CULTIVO:	Riego por goteo	
COBERTURA VEGETAL:	Silvestre	
ANÁLISIS DE SUELO (2001):	Textura: Franco-arcilloso-arenoso PH: 7.8 MO: 0.44 % C/N: 3 N: 0.08 % P: 92 ppm K: 212 ppm	
OPERACIONES DE CULTIVO:	Labores: Fertilización: Cloruro potásico 60 %: 0.08 l/ha 5-0-51 + MICRO : 3.48 l/ha 20-5-30 + MICRO: 0.5 l/ha 11-5-37 +2Boro: 3.83 l/ha Urea 46 %:0.5 l/ha 3.5-0-42 +MgO+ Aminoácidos (aa): 3.48 l/ha Estesan 7-5-40 + 2B: 8.33 kg /ha 6.67 kg/ha Cloruro potásico 60 %: 6.67 kg/ha Amisan Revitalizador 7.4+33.9 MO+8.4 aa: 0.46 l/ha Herbicidas: Glifosato 36 %: 4.5 l/ha MCPA 60 %: 1 l/ha Oxifluorfen 24 %: 1.5 l/ha Fungicidas: 1.13 l/ha Oxicloruro de cobre 52 %: 1.13 l/ha Insecticidas :	

		UHC
NOMBRE DE LA FINCA:	DON PEDRO 1.1	3
SITUACIÓN:	Aguilar de la frontera (Córdoba)	
SUPERFICIE:	35 ha	
VARIEDAD:	Picual	
FECHA DE PLANTACIÓN:	1994	
MARCO DE PLANTACIÓN:	7x7 m	
SISTEMA DE CULTIVO:	Riego por goteo	
COBERTURA VEGETAL:	Silvestre	
ANÁLISIS DE SUELO (2012):	Textura: Franco PH: 8.51 MO: 1.91 % C/N: No determinada N: 0.11 % P: 7.9 ppm K: 180 ppm	
OPERACIONES DE CULTIVO:	Labores: Grada: 5 aplicaciones Rastrillado: 1 aplicación Fertilización: Phytohermes foliar verde 16-30-14: 5 l/ha Bikafos 0-25-23: 3.33 l/ha Herbicidas: Fungicidas: Oxiclورو de cobre 50 %: 6.13 kg/ha Insecticidas : Cipermetrin 10 %: 100 g/ha Dimetoato 40 %: 150 g/ha	

		UHC
NOMBRE DE LA FINCA:	DON PEDRO 1.2	4
SITUACIÓN:	Aguilar de la frontera (Córdoba)	
SUPERFICIE:	27.03 ha	
VARIEDAD:	Hojiblanca	
FECHA DE PLANTACIÓN:	1996	
MARCO DE PLANTACIÓN:	7x7 m	
SISTEMA DE CULTIVO:	Riego por goteo	
COBERTURA VEGETAL:	Silvestre	
ANÁLISIS DE SUELO (2012):	Textura: Franco PH: 8.51 MO: 1.91 % C/N: No determinada N: 0.11 % P: 7.9 ppm K: 180 ppm	
OPERACIONES DE CULTIVO:	Labores: Grada: 5 aplicaciones Rastrillado: 1 aplicación Fertilización: Phytohermes foliar verde 16-30-14: 5 l/ha Bikafos 0-25-23: 3.33 l/ha Herbicidas: Fungicidas: Oxiclورو de cobre 50 %: 6.13 kg/ha Insecticidas : Cipermetrin 10 %: 100 g/ha Dimetoato 40 %: 150 g/ha	

		UHC
NOMBRE DE LA FINCA:	LAS ROZAS	5
SITUACIÓN:	Luque (Córdoba)	
SUPERFICIE:	83.68 ha	
VARIEDAD:	Picudo	
FECHA DE PLANTACIÓN:	1938	
MARCO DE PLANTACIÓN:	11x11	
SISTEMA DE CULTIVO:	Secano	
COBERTURA VEGETAL:	No	
ANÁLISIS DE SUELO (2010):	Textura: Franco-limoso PH: 8.7 MO: 1.4 % C/N: No determinada N: 750 mg/kg P: 55 ppm K: 0.55 meq/100 g	
OPERACIONES DE CULTIVO:	Labores: Cultivador: 2 aplicaciones Rulo:1 aplicación <hr/> Fertilización: Phytohermes Foliar Plus 22-18-15: 2 l/ha Boro Phytohermes 20.8 %: 1.5 l/ha Suminol 7.5-0-0+24aa+40MO: 2 l/ha Rendi 8.2-0-0+13aa+48+MO: 3.5 l/ha Phytohermes foliar rojo 11-15-33: 2 l/ha Nitrofoska foliar fruit 7-8-34: 3.35 l/ha Potasa 50 plus 4.5-0-49: 1.68 l/ha <hr/> Herbicidas: Glifosato 36 %: 6 l/ha MCPA 60 %: 0.5 kg/ha Oxiflourfen 24 %: 1.25 g/l <hr/> Fungicidas: Mancozeb 17.5 %+Oxicloruro de Cu 22 %: 250 g/100l Oxicloruro de Cobre 50%: 5 g/l <hr/> Insecticidas : Dimetoato 40 %: 2.4 kg/ha	

NOMBRE DE LA FINCA: VENTARIQUE		UHC
		6
SITUACIÓN:	Luque (Córdoba)	
SUPERFICIE:	44.62 ha	
VARIEDAD:	Picual	
FECHA DE PLANTACIÓN:	1970	
MARCO DE PLANTACIÓN:	11x11	
SISTEMA DE CULTIVO:	Secano	
COBERTURA VEGETAL:	Silvestre	
ANÁLISIS DE SUELO (1998):	Textura: Arcillo-limoso PH: 7.9 MO: 0.60 % C/N: No determinada N: 0.05 % P: 1.6 ppm K: 0.39 meq/100 g	
OPERACIONES DE CULTIVO:	Labores: Cultivador: 2 aplicaciones Rulo: 1 aplicación Fertilización: Phytohermes Foliar Plus 22-18-15: 2 l/ha Boro Phytohermes 20.8 %: 1.5 l/ha Suminol 7.5-0-0+24aa+40MO: 2 l/ha Herbicidas: Fungicidas: Mancozeb 17.5 %+Oxicloruro de Cu 22 %: 250 g/100l Insecticidas :	

		UHC
NOMBRE DE LA FINCA:	SUSILLA	7
SITUACIÓN:	Arahal (Sevilla)	
SUPERFICIE:	53.58	
VARIEDAD:	Arbequina	
FECHA DE PLANTACIÓN:	2009	
MARCO DE PLANTACIÓN:	5x1.5 m	
SISTEMA DE CULTIVO:	Riego por goteo	
COBERTURA VEGETAL:	No	
ANÁLISIS DE SUELO (2011):	Textura: Arcilloso PH: 8.33 MO: 0.98 % C/N: No determinada N: 0.06 % P: 52.7 ppm K: 198 ppm	
OPERACIONES DE CULTIVO:	Labores: Cultivador: 1 aplicación Desbrozadora: 1 aplicación Fertilización: 10-3-6: 200 kg/ha Herbicidas: Glifosato 36 %: 2 kg/ha Flazasulfuron 25 %: 0.15 kg/ha Fungicidas: Oxiclورو de cobre 50 %: 5.6 kg/ha Insecticidas : Dimetoato 40 %: 1.2 kg/ha	

		UHC
NOMBRE DE LA FINCA:	SANTA CLARA	8
SITUACIÓN:	Carmona (Sevilla)	
SUPERFICIE:	45.76 ha	
VARIEDAD:	Arbequina	
FECHA DE PLANTACIÓN:	2007	
MARCO DE PLANTACIÓN:	3.75x1.35	
SISTEMA DE CULTIVO:	Riego x goteo	
COBERTURA VEGETAL:	Silvestre	
ANÁLISIS DE SUELO (2011):	Textura: Franco-arcilloso-arenoso PH: 8.33 MO: 0.98 % C/N: No determinada N: 0.06 % P: 52.7 ppm K: 198 ppm	
OPERACIONES DE CULTIVO:	Labores: Cultivador: 1 aplicación Desbrozadora: 1 aplicación Fertilización: Isabion 8-7-0: 0.5 l/ha Herbicidas: Glifosato 36 %: 3 kg/ha Flazasulfuron 25 %: 0.15 kg/ha Fungicidas: Oxiclورو de cobre 50 %: 5.6 kg/ha Difenoconazol 25%: 0.06 % Insecticidas : Dimetoato 40 %: 1.2 kg/ha Fosmet 20 %: 0.24 kg/ha	

		UHC
NOMBRE DE LA FINCA:	LA CAPELLANÍA (3.1)	9
SITUACIÓN:	Écija (Sevilla)	
SUPERFICIE:	14.16 ha	
VARIEDAD:	Arbequina	
FECHA DE PLANTACIÓN:	2007	
MARCO DE PLANTACIÓN:	3.75x1.35 m	
SISTEMA DE CULTIVO:	Riego x goteo	
COBERTURA VEGETAL:	No	
ANÁLISIS DE SUELO (2011):	Textura: Franco-arcilloso-arenoso PH: 8.12 MO: 0.9 C/N: No determinada N: 0.06 % P: 33.8 ppm K: 250 ppm	
OPERACIONES DE CULTIVO:	Labores: Cultivador: 2 aplicación Desbrozadora: 1 aplicación Fertilización: 10-3-6: 200 kg/ha Herbicidas: Glifosato 36 %: 4 kg/ha Fungicidas: Hidróxido cúprico 50 %: 2.8 kg/ha Dodina 40 %: 4 kg/ha Insecticidas : Dimetoato 40 %: 1.5 kg/ha Fosmet 20 %: 2.4 kg/ha	

		UHC
NOMBRE DE LA FINCA:	LA CAPELLANÍA (3.2)	10
SITUACIÓN:	Écija (Sevilla)	
SUPERFICIE:	59.86 ha	
VARIEDAD:	Arbequina	
FECHA DE PLANTACIÓN:	2007	
MARCO DE PLANTACIÓN:	3.75x1.35 m	
SISTEMA DE CULTIVO:	Riego x goteo	
COBERTURA VEGETAL:	No	
ANÁLISIS DE SUELO (2011):	Textura: Franco-arcilloso-arenoso PH: 8.12 MO: 0.9 C/N: No determinada N: 0.06 % P: 33.8 ppm K: 250 ppm	
OPERACIONES DE CULTIVO:	Labores: Cultivador: 1 aplicación Desbrozadora: 1 aplicación Fertilización: 2-0-9: 200 kg/ha Herbicidas: Glifosato 36 %: 3 kg/ha Flazasulfuron 25 %: 0.15 kg/ha Fungicidas: Hidróxido cúprico 50 %: 5.6 kg/ha Insecticidas : Dimetoato 40 %: 1.5 g/l Fosmet 20 %: 3 %	

		UHC
NOMBRE DE LA FINCA:	LA CAPELLANÍA	11
SITUACIÓN:	Santaella (Córdoba)	
SUPERFICIE:	37.20 ha	
VARIEDAD:	Arbequina	
FECHA DE PLANTACIÓN:	2005	
MARCO DE PLANTACIÓN:	7x5 m	
SISTEMA DE CULTIVO:	Riego por goteo	
COBERTURA VEGETAL:	No	
ANÁLISIS DE SUELO (2011):	Textura: Franco-arcilloso-arenoso PH: 8.12 MO: 0.9 C/N: No determinada N: 0.06 % P: 33.8 ppm K: 250 ppm	
OPERACIONES DE CULTIVO:	Labores: Cultivador: 1 aplicación Desbrozadora: 1 aplicación Fertilización: 2-0-9: 200 kg/ha Herbicidas: Glifosato 36 %: 3 kg/ha Flazasulfuron 25 %: 0.15 kg/ha Fungicidas: Hidróxido cúprico 50 %: 5.6 kg/ha Insecticidas : Dimetoato 40 %: 1.5 g/l Fosmet 20 %: 3 %	

		UHC
NOMBRE DE LA FINCA:	CULEBRILLA (4.1)	12
SITUACIÓN:	Santaella (Córdoba)	
SUPERFICIE:	244.89 ha	
VARIEDAD:	Picual	
FECHA DE PLANTACIÓN:	2007	
MARCO DE PLANTACIÓN:	8x6 m	
SISTEMA DE CULTIVO:	Secano	
COBERTURA VEGETAL:	Silvestre	
ANÁLISIS DE SUELO (2011):	Textura: Arcilloso PH: 8.33 MO: 0.98 C/N: No determinada N: 0.06 % P: 52.7 ppm K: 198 ppm	
OPERACIONES DE CULTIVO:	Labores: Cultivador: 1 aplicación Desbrozadora: 1 aplicación Fertilización: Isabion 8-7-0: 0.5 l/ha Herbicidas: Oxifluorfen 48 %: 1 kg/ha Glifosato 36 %: 2 kg/ha Glufosinatamonico 15 %: 3 kg/ha Fungicidas: Difenconazol 25 %: 0.06% Insecticidas : Dimetoato 40 %: 1.5 g/l	

		UHC
NOMBRE DE LA FINCA:	CULEBRILLA (4.2)	13
SITUACIÓN:	Santaella (Córdoba)	
SUPERFICIE:	153.78 ha	
VARIEDAD:	Arbequina	
FECHA DE PLANTACIÓN:	2007	
MARCO DE PLANTACIÓN:	7x5 m	
SISTEMA DE CULTIVO:	Secano	
COBERTURA VEGETAL:	Silvestre	
ANÁLISIS DE SUELO (2011):	Textura: Arcilloso PH: 8.08 MO: 1.61 C/N: No determinada N: 0.11 % P: 57.5 ppm K: 200 ppm	
OPERACIONES DE CULTIVO:	Labores: Cultivador: 1 aplicación Desbrozadora: 1 aplicación Fertilización: Isabion 8-7-0: 0.5 l/ha Herbicidas: Oxifluorfen 48 %: 1 kg/ha Glifosato 36 %: 2 kg/ha Glufosinatamonico 15 %: 3 kg/ha Fungicidas: Difenconazol 25 %: 0.06% Insecticidas : Dimetoato 40 %: 1.5 g/l	

		UHC
NOMBRE DE LA FINCA:	OCHAVILLOS (5.1)	14
SITUACIÓN:	La Rambla (Córdoba)	
SUPERFICIE:	22.21 ha	
VARIEDAD:	Arbequina	
FECHA DE PLANTACIÓN:	2006	
MARCO DE PLANTACIÓN:	4x1.35 m	
SISTEMA DE CULTIVO:	Riego por goteo	
COBERTURA VEGETAL:	Silvestre	
ANÁLISIS DE SUELO (2011):	Textura: Franco-arcilloso-arenoso PH: 8.33 MO: 0.98 C/N: No determinada N: 0.06 % P: 52.7 ppm K: 198 ppm	
OPERACIONES DE CULTIVO:	Labores: Cultivador: 1 aplicación Desbrozadora: 1 aplicación Fertilización: 2-0-9: 200 kg/ha Herbicidas: Glifosato 36 %: 3 kg/ha Flazasulfuron 25 %: 0.15 kg/ha Fungicidas: Hidróxido cúprico 50 %: 4 % Oxicloruro de cobre 50 %: 4% Insecticidas : Dimetoato 40 %: 1.5 g/l	

		UHC
NOMBRE DE LA FINCA:	OCHAVILLOS (5.2)	15
SITUACIÓN:	La Rambla (Córdoba)	
SUPERFICIE:	45.41 ha	
VARIEDAD:	Picual	
FECHA DE PLANTACIÓN:	2006	
MARCO DE PLANTACIÓN:	8*6 m	
SISTEMA DE CULTIVO:	Riego por goteo	
COBERTURA VEGETAL:	Silvestre	
ANÁLISIS DE SUELO (2011):	Textura: Franco-arcilloso-arenoso PH: 8.33 MO: 0.98 C/N: No determinada N: 0.06 % P: 52.7 ppm K: 198 ppm	
OPERACIONES DE CULTIVO:	Labores: Cultivador: 1 aplicación Desbrozadora: 1 aplicación Fertilización: 2-0-9: 200 kg/ha Herbicidas: Glifosato 36 %: 3 kg/ha Flazasulfuron 25 %: 0.15 kg/ha Fungicidas: Oxiclورو de cobre 50 %: 4% Insecticidas : Dimetoato 40 %: 1.5 g/l	

		UHC
NOMBRE DE LA FINCA:	OCHAVILLOS (5.3)	16
SITUACIÓN:	La Rambla (Córdoba)	
SUPERFICIE:	7.08 ha	
VARIEDAD:	Picual	
FECHA DE PLANTACIÓN:	2006	
MARCO DE PLANTACIÓN:	7x7.5 m	
SISTEMA DE CULTIVO:	Riego por goteo	
COBERTURA VEGETAL:	Silvestre	
ANÁLISIS DE SUELO (2011):	Textura: Franco-arcilloso-arenoso PH: 8.33 MO: 0.98 C/N: No determinada N: 0.06 % P: 52.7 ppm K: 198 ppm	
OPERACIONES DE CULTIVO:	Labores: Cultivador: 1 aplicación Desbrozadora: 1 aplicación Fertilización: 2-0-9: 200 kg/ha Herbicidas: Glifosato 36 %: 3 kg/ha Flazasulfuron 25 %: 0.15 kg/ha Fungicidas: Hidróxido cúprico 50 %: 4 % Oxicloruro de cobre 50 %: 4% Insecticidas : Dimetoato 40 %: 1.5 g/l	

		UHC
NOMBRE DE LA FINCA:	SAN JOSE	17
SITUACIÓN:	La Carlota (Córdoba)	
SUPERFICIE:	51.25 ha	
VARIEDAD:	Picual	
FECHA DE PLANTACIÓN:	1995	
MARCO DE PLANTACIÓN:	9x4.5 m	
SISTEMA DE CULTIVO:	Riego por goteo	
COBERTURA VEGETAL:	No	
ANÁLISIS DE SUELO (2011):	Textura: Franco-arenoso-arcilloso PH: 8.06 MO: 0.64 C/N: No determinada N: 0.04 % P: 58.2 ppm K: 120 ppm	
OPERACIONES DE CULTIVO:	Labores: Cultivador: 1 aplicación Desbrozadora: 1 aplicación Fertilización: 5-5-41: 2 kg/ha Herbicidas: Fungicidas: Mancozeb 17.5 % + oxiclورو de cobre 22 %: 1 kg /ha Oxicloruro de cobre 52 %: 4% Insecticidas : Alfa cipermetrin 10 %: 0.1 kg/ha Dimetoato 40 %: 0.8 kg/ha Clorpirifos 48 %: 1.5 %	

		UHC
NOMBRE DE LA FINCA:	LAS MESAS	18
SITUACIÓN:	Écija (Sevilla)	
SUPERFICIE:	25.43 ha	
VARIEDAD:	Picual	
FECHA DE PLANTACIÓN:	1995	
MARCO DE PLANTACIÓN:	8x6 m	
SISTEMA DE CULTIVO:	Riego por goteo	
COBERTURA VEGETAL:	No	
ANÁLISIS DE SUELO (2011):	Textura: Franco-arenoso-arcilloso PH: 8.33 MO: 0.98 C/N: No determinada N: 0.06 % P: 52.7 ppm K: 198 ppm	
OPERACIONES DE CULTIVO:	Labores: Cultivador: 1 aplicación Desbrozadora: 1 aplicación Fertilización: 5-5-41: 2 kg/ha Herbicidas: Fungicidas: Mancozeb 17.5 % + oxiclورو de cobre 22 %: 1 kg /ha Insecticidas : Alfa cipermetrin 10 %: 0.1 kg/ha Dimetoato 40 %: 0.8 kg/ha	

		UHC
NOMBRE DE LA FINCA:	GALLARDO	19
SITUACIÓN:	Córdoba (La Carlota)	
SUPERFICIE:	53.17 ha	
VARIEDAD:	Picual	
FECHA DE PLANTACIÓN:	1994	
MARCO DE PLANTACIÓN:	8x6 m	
SISTEMA DE CULTIVO:	Riego por goteo	
COBERTURA VEGETAL:	No	
ANÁLISIS DE SUELO (2001):	Textura: Franco-arenoso-arcilloso PH: 8.33 MO: 0.98 C/N: No determinada N: 0.06 % P: 52.7 ppm K: 198 ppm	
OPERACIONES DE CULTIVO:	Labores: Cultivador: 1 aplicación Desbrozadora: 1 aplicación Fertilización: 5-5-41: 2 kg/ha Herbicidas: Fungicidas: Mancozeb 17.5 % + oxiclورو de cobre 22 %: 1 kg /ha Insecticidas : Alfa cipermetrin 10 %: 0.1 kg/ha Dimetoato 40 %: 0.8 kg/ha	

		UHC
NOMBRE DE LA FINCA:	LAS CABALLERIAS 1.1	20
SITUACIÓN:	Jerez de la Frontera (Cádiz)	
SUPERFICIE:	22.59 ha	
VARIEDAD:	Arbequina	
FECHA DE PLANTACIÓN:	2005	
MARCO DE PLANTACIÓN:	7x6 m	
SISTEMA DE CULTIVO:	Secano	
COBERTURA VEGETAL:	Silvestre	
ANÁLISIS DE SUELO (2009):	Textura: Franco-arcilloso PH: 8.3 MO: 1.34 % C/N: 5.18 N: 0.15 % P: 21.8 ppm K: 546.72 ppm	
OPERACIONES DE CULTIVO:	Labores: Grada de discos: 1 aplicación Fertilización: Herbicidas: Glifosato 36 %: 2 kg/ha Fluroxipir 20 %: 0.6 l/ha Fungicidas: Insecticidas : Fosmet 20 %: 0.3 % Dimetoato 40 %: 0.15 %	

		UHC
NOMBRE DE LA FINCA:	LAS CABALLERIAS 1.2	21
SITUACIÓN:	Jerez de la Frontera (Cádiz)	
SUPERFICIE:	21.17 ha	
VARIEDAD:	Arbequina	
FECHA DE PLANTACIÓN:	2007	
MARCO DE PLANTACIÓN:	7x6 m	
SISTEMA DE CULTIVO:	Riego por goteo	
COBERTURA VEGETAL:	Silvestre	
ANÁLISIS DE SUELO (2009):	Textura: Franco-arcilloso PH: 8.3 MO: 1.34 % C/N: 5.18 N: 0.15 % P: 21.8 ppm K: 546.72 ppm	
OPERACIONES DE CULTIVO:	Labores: Grada de discos: 1 aplicación Fertilización: Herbicidas: Glifosato 36 %: 2 kg/ha Fluroxipir 20 %: 0.6 l/ha Fungicidas: Insecticidas : Fosmet 20 %: 0.3 % Dimetoato 40 %: 0.15 %	

		UHC
NOMBRE DE LA FINCA:	PLATA MAZMORRA 2.1	22
SITUACIÓN:	Jerez de la Frontera (Cádiz)	
SUPERFICIE:	16.76 ha	
VARIEDAD:	Arbequina	
FECHA DE PLANTACIÓN:	2009	
MARCO DE PLANTACIÓN:	7x6 m	
SISTEMA DE CULTIVO:	Secano	
COBERTURA VEGETAL:	Silvestre	
ANÁLISIS DE SUELO (2009):	Textura: Arcilloso PH: 8.25 MO: 1.01 % C/N: 5.33 N: 0.11 % P: 28.88 ppm K: 512.95 ppm	
OPERACIONES DE CULTIVO:	Labores: Grada de discos: 1 aplicación Fertilización: Herbicidas: Fungicidas: Insecticidas : Dimetoato 40 %: 0.96 kg/ha	

		UHC
NOMBRE DE LA FINCA:	PLATA MAZMORRA 2.2	23
SITUACIÓN:	Jerez de la Frontera (Cádiz)	
SUPERFICIE:	34.91 ha	
VARIEDAD:	Picual	
FECHA DE PLANTACIÓN:	1995	
MARCO DE PLANTACIÓN:	8x7 m	
SISTEMA DE CULTIVO:	Secano	
COBERTURA VEGETAL:	Silvestre	
ANÁLISIS DE SUELO (2009):	Textura: Arcilloso PH: 8.25 MO: 1.01 % C/N: 5.33 N: 0.11 % P: 28.88 ppm K: 512.95 ppm	
OPERACIONES DE CULTIVO:	Labores: Grada de discos: 1 aplicación Fertilización: Herbicidas: Fungicidas: Insecticidas : Dimetoato 40 %: 0.96 kg/ha	

		UHC
NOMBRE DE LA FINCA:	ARROYO DULCE	24
SITUACIÓN:	Jerez de la Frontera (Cádiz)	
SUPERFICIE:	28.21 ha	
VARIEDAD:	Arbequina	
FECHA DE PLANTACIÓN:	2006	
MARCO DE PLANTACIÓN:	7x6 m	
SISTEMA DE CULTIVO:	Riego por goteo	
COBERTURA VEGETAL:	Silvestre	
ANÁLISIS DE SUELO (2009):	Textura: Franco-arcilloso PH: 8.3 MO: 0.51 % C/N: 2.69 N: 0.11 % P: 13.8 ppm K: 390 ppm	
OPERACIONES DE CULTIVO:	Labores: <hr/> Fertilización: 10-5-5: 420 kg/ha <hr/> Herbicidas: Tribenuron-Metil 50 %: 0.025 l/ha Glifosato 36 %: 4l/ha <hr/> Fungicidas: Tebuconazol 25%: 0.05 % Oxicloruro de cobre 50 %: 0.3 % <hr/> Insecticidas : Dimetoato 40 %: 0.6 %	

ANEJO II:

Factores de emisión (FE) de gases de efecto
invernadero (GEI) expresados en C equivalente (CE)

Factores de emisión (FE) de gases de efecto invernadero (expresado en carbono equivalente CE) de labores

Labores	Kg CE/ha
Vertedera	15.2
Chisel	7.9
Grada discos pesada	8.3
Grada discos ligera	5.8
Subsolador	11.3
Cultivador	4.0
Rotovator (fresadora)	2.0
Caballones	2.7
Rulo	5.8

Factores de emisión (FE) de gases de efecto invernadero (expresado en carbono equivalente CE) de riego

Riego	Kg CE/ha/año
Superficie	5.4
Aspersión	35.5
Pivot	21.6
Goteo	84.9

Factores de emisión (FE) de gases de efecto invernadero (expresado en carbono equivalente CE) de fertilizantes minerales y orgánicos

Fertilizantes minerales y orgánicos	kg CE/kg
Nitrógeno (N)	1.3
Fósforo (P ₂ O ₅)	0.2
Potasio (K ₂ O)	0.15
Calcio (Ca)	1.35
Magnesio (Mg)	0.15
Azufre (S)	0.15
Boro (B)	1.11
Estiércol sólido	0.9 kg CE/t
Estiércol líquido	0.9 kg CE/m ³

Factores de emisión (FE) de gases de efecto invernadero (expresado en carbono equivalente CE) de insecticidas

Insecticidas	kg CE/kg a.i.
Cipermetrina	11.7
Clordimeform	5.0
Metoxicloro	1.4
Otros (media)	5.1

Factores de emisión (FE) de gases de efecto invernadero (expresado en carbono equivalente CE) de fungicidas

Fungicidas	Kg CE/kg a.i.
Maneb	2.0
Captan	2.3
Benomilo	8.0
Carbendazima	4.2
Clortalonil	1.0
Mancoceb	0.8
Procloraz	1.7
Otros (media)	3.9

Factores de emisión (FE) de gases de efecto invernadero (expresado en carbono equivalente CE) de herbicidas

Herbicidas	kg CE/kg a.i.
Glifosato	9.1
2,4 D	1.7
MCPA	2.6
Alacloro	5.6
Metalacloro	2.7
Isoproturon	2.9
Fluazifop-butil	10.4
Linuron	5.8
Carbetamida	2.5
Clortoluron	2.9
Ioxinil	2.6
Pendimetalina	1.1
Otros (media)	6.3

Factores de emisión (FE) de gases de efecto invernadero (expresado en carbono equivalente CE) de reguladores de crecimiento

Reguladores de crecimiento	kg CE/kg a.i.
Reguladores de crecimiento	2.3

Factores de emisión (FE) de gases de efecto invernadero (expresado en carbono equivalente CE) de otras operaciones de cultivo

Otras operaciones de cultivo	Kg CE/ha
Inyectar amoníaco	10.1
Aplicación herbicida	1.4
Siembra	3.2
Siembra no laboreo	3.8
Pulverización fertilizante	0.9
Distribución de fertilizantes	7.6
Aplicación fertilizante orgánico	3.1
Incorporación abonos y pesticidas	5.7
Siega forraje	5.5
Hileradora	4.8
Rastrillado	1.7
Hemificación	5.5
Empacado estándar	3.3
Empacado circular	5.8
Ensilado maíz	19.6
Triturada caña maíz	4.4
Cosechadora cereal	7.4
Cosechadora forrajes	13.6
Cosechadora olivar	14.1
Vibradora olivar	9.4
Transporte (tractor-camión)	0.26 kg CE/km

ARTÍCULOS

Assessment of carbon sequestration and the carbon footprint in olive groves in Southern Spain

Pedro J. Lopez-Bellido^a, Luis Lopez-Bellido^a, Purificacion Fernandez-Garcia^a, Veronica Muñoz-Romero^a and Francisco J. Lopez-Bellido^b

^aDepartamento de Ciencias y Recursos Agrícolas y Forestales, University of Córdoba, Campus de Rabanales, Edificio C-4 "Celestino Mutis," Ctra. Madrid km 396, 14071 Córdoba, Spain; ^bDepartamento de Producción Vegetal y Tecnología Agraria, University of Castilla-La Mancha, Ciudad Real, Spain

ABSTRACT

Tree plantations are characterized by their ability to remove CO₂ from the atmosphere and store it in a stable manner in tree structures (trunks, roots and branches) as well as in the soil. The study was conducted in Southern Spain in olive groves and covering an area of 1121 ha, where 22 homogenous plantation units were selected. The Picual and Arbequina varieties were assessed in intensive, super-intensive and conventional plantations as well as in rainfed and irrigated plantations. The net carbon (C) balance in the olive tree plantations was clearly positive, especially in intensive and super-intensive plantations (2.05 and 4.10 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹ on average for all plantations studied). These results are significant for life-cycle evaluations of olive oil and for obtaining the C footprint of olive oil as a final product. Improved practices for soil management, such as the use of conservation tillage and cover crops and reincorporating pruning residues into the soil, can notably increase the net C balance in tree plantations and may even double it in amount. Thus, including the C sequestration rate of olive tree plantations can increase the accuracy of C footprint estimations for olive oil and represents a key factor in marketing the final product according to its environmental benefits.

ARTICLE HISTORY

Received 24 February 2016
Accepted 8 June 2016

KEYWORDS

Olea europaea; carbon sequestration rate; greenhouse gas emissions; soil organic carbon; biomass carbon

Introduction

Compared with the conventional industrial and transportation sectors, when the agricultural sector is properly managed, it can balance CO₂ emissions to the atmosphere and store it as carbon (C) in plant biomass and in the soil. C sequestration occurs when a combination of farming practices increases the C stored in soils [1,2]. The effect of practices such as tillage system, crop rotation, tree plantation and fertilization management differs depending on the soil type, farming system, residue management and climate [3–7].

Tree plantations are characterized by their ability to remove CO₂ from the atmosphere and store it temporarily within the tree parts (trunks, roots, branches, leaves and fruits) and soil over long time periods. Therefore, tree plantations are known to have a higher potential for C sequestration than annual crops have. The C stored in trunks, branches and roots is quite stable. However, previous research must be applied to determine the CO₂ removal capacity by a tree system and C sequestration in the soil. A number of studies have assessed the production and net C budget in forest ecosystems, although few studies have focused on crops, which is partly because of the difficulties and uncertainties related to estimating the amount of C in farmlands [8–12].

The term "carbon footprint" is relatively new, although the methods supporting it are well established because they were previously developed for a wide variety of environmental issues. There is no widely accepted or concrete definition for C footprint in use, although there is a general notion of its meaning and status. An inclusive definition that attempts to incorporate all possible applications has been proposed by Peters [13]: "the C footprint of a functional unit is the climatic impact expressed as a specific measurement when all relevant emission sources, sinks and storage within a system limited spatially and temporarily are considered" (p. 245).

The C footprint is one of the most widely used indicators for identifying, synthesizing and communicating the potential environmental impacts caused by a process or activity. Therefore, a product's C footprint is intended to quantify the greenhouse gases (GHG) emitted to the atmosphere during the manufacture and sale of a product, from the raw material acquisition to residue management, allowing consumers to decide which food to buy based on the emissions produced. The concept of a C footprint is important for companies, consumers and politicians. Investors analyze the C footprint as an indicator of investment risks, purchasing managers are interested in the C footprint associated with supply chains and consumers are

increasingly interested in products with labels showing the C footprint [13,14].

The C footprint is related to climate change and represents a key component of the corporate social responsibility of companies. Numerous countries, including France, the USA, Canada, the United Kingdom, Switzerland, Japan, Australia and Germany, have passed laws and implemented rules regarding the C footprint of products and services. In addition, an increasing number of food companies are disclosing information on the C footprint of their products. According to a recent survey, 72% of Europeans are in favor of requiring companies to show the C footprint of their products.

The agriculture and forestry sectors are the only sectors that can remove CO₂ from the atmosphere; thus, the term “C balance” may be more appropriate than “C footprint” with regards to agriculture because many crops can produce a positive balance by acting as net CO₂ sinks (depending on production technique). Thus, Clay et al. [15] have used the term “partial C footprint” and even “negative C footprint.”

A number of methods [14] have been standardized internationally for the calculation of C footprints, and they are applied to products as well as services and only consider GHG emissions associated with processes. When these methods are applied to the agri-food industry, the C footprint is obtained by considering the GHG emissions associated with the raw materials (wheat, olives, oranges, etc.) as well as those produced during the manufacturing process (bread, baked goods, oil, juice, etc.). The amount of potentially sequestered C generated when producing raw materials is omitted. Thus, the standardized methodologies for obtaining the C footprint have not been developed specifically for agriculture or the agri-food industry.

Previous studies of olive tree plantations have provided information on the net C sequestration [7,16], C exchange and water use efficiency in irrigated olive groves [17], and models have been developed to determine the growth potential of an olive tree’s aboveground structures as a tool to estimate C sequestration [18]. In Southern Italy, Sofo et al. [16] obtained the average values for the amount of CO₂ captured as a function of age, olive tree density, and aboveground and belowground structure differences, and mean values of 2.74 and 9.54 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ have been observed in young and mature plantations, respectively. Testi et al. [17] used eddy covariance to measure the CO₂ flux in an irrigated olive grove in Córdoba during different leaf area index (LAI) periods. The results of the study suggest that olive groves watered by drip irrigation must be investigated regarding their C exchange and appropriate calculations, and such results cannot be easily applied to other biomes. Finally, Villalobos et al. [18] have calibrated and validated a simple model based on radiation-use efficiency (RUE) to study the growth and yield of different olive tree varieties in

Southern Spain, and they estimated the C sequestration potential in an intensive olive tree plantation under irrigation at 7 Mg CO₂ ha⁻¹ yr⁻¹. However, there are no studies on the sequestering and footprint of C that integrate different plots located in a large area of cultivation with different soil types, cultivars, planting densities and irrigation systems.

The objective of this study was to assess C sequestration and determine the C footprint for a set of olive tree plantations in Southern Spain with different plantation densities and cultivation systems for Picual and Arbequina varieties. The aim was to develop a predictive model capable of estimating the amount of C stored in the biomass of olive tree plantations.

Materials and methods

Study sites

The study was conducted over an area of 1121 ha located in the provinces of Seville, Córdoba, Cadiz and Jaen (Southern Spain) (Figure 1) and investigated 22 homogeneous unit olive groves (HUOGs), each owned by the same farmer. Each HUOG presents similar characteristics, including soil, variety, age, plantation density, cultivation system (rainfed or irrigated) and farming practice (Table 1). Tillage operations differ according to homogeneous units although minimum tillage (roller, disk harrowing and weeding machine) with the use of cover crops predominated in most cases (Table 1). The Picual and Arbequina varieties are cultivated in the studied HUOGs, which include intensive, super-intensive and traditional plantations, and rainfed and irrigated cultivation (Table 1).

The broad differences between the studied HUOGs in terms of location (weather), variety, age and plantation density are essential for obtaining a wide range of data, and have been useful for confirming variability in the values of C sequestration and balances in olive tree plantations.



Figure 1. Map with the study areas, indicating the homogeneous unit olive groves.

The olive tree plantation units were grouped by plantation density (number of trees ha⁻¹) as follows: conventional, including traditional mature plantations that are no longer developed, with 80 to 100 trees ha⁻¹; intensive, with densities between 200 and 300 trees ha⁻¹ and different plantation frames; and super-intensive or hedgerow, with densities ranging from 500 to 2000 trees ha⁻¹. The different plantation frames, density of trees per hectare and soil characteristics are shown in Table 1.

Field study

Olive tree uprooting

Previously, a control test was performed with three specimens each of the Picual and Arbequina varieties from 15-year-old intensive plantations. These specimens were uprooted, and their biomass volume was obtained by dasometric analysis before uprooting and compared with the real weight and volume measured directly from the uprooted olive trees to confirm the reliability of the dendrometric method. After uprooting the selected trees, the individual aboveground components (trunk, branches, twigs) were weighed in the field and samples of all parts were put in an oven at 105 °C until they reached a constant weight [19]. The dry weight of the tree was calculated by multiplying the percentage of dry weight of each individual component by their fresh weight. Multiplying the average amount of measured trees' dry weight by the number of trees per hectare, the dry weight per hectare was obtained.

The tree uprooting was performed with a New Holland telehandler on a sandy loam soil in wet conditions. Subsequently, an excavation was made recovering the roots remaining in the soil. These were generally of less than 0.5 cm in diameter, representing around 20% of the total weight of the roots of each tree. The roots were separated from the trunk and weighed. For the aboveground portions of the trees, trunks and branches of different sizes up to 2 cm in diameter were weighed, and their volume was measured separately. The shoot/root ratio was obtained. A Pressler borer [20] was used to collect samples from the roots and branches to determine the wood density of each part. Different portions of vegetable matter were dried in an oven at 70 °C to obtain the amount of dry matter. Finally, the material was shredded separately to analyze the C content.

Biomass volume measurements in olive tree plantations

Three representative trees were selected in each HUOG, and the height and the largest and smallest diameter of the trunk and main and secondary

Table 1. General and soil characteristics of homogeneous unit olive groves (HUOGs).

HUOGs	Location	Area (ha)	Variety	Plantation age	Plantation frames (m ²)	Number of olive trees ha ⁻¹	Cultivation system	Cover crops	Pruning residue incorporation	Texture	pH	Organic matter (%)	Carbonates (%)
1	Aguilar de la Frontera (Co)	35	Picual	1994	7 × 7	204	Irrigated	Native	Yes	Loam	8.51	1.63	66.1
2	Lúque (Co)	45	Picual	1970	11 × 11	83	Rainfall	Native	Yes	Loam	8.51	1.04	66.1
3	Aráhal (Se)	54	Arbequina	2009	5 × 1.5	1333	Irrigated	No	No	Sandy-clay-loam	8.33	2.66	5.4
4	Carmona (Se)	46	Arbequina	2007	3.75 × 1.35	1975	Irrigated	Native	No	Sandy-clay-loam	8.33	1.53	5.4
5	Écija (Se)	14	Arbequina	2007	3.75 × 1.35	1975	Irrigated	No	No	Sandy-clay-loam	8.12	0.98	7.7
6	Écija (Se)	60	Arbequina	2007	3.75 × 1.35	1975	Irrigated	No	No	Sandy-clay-loam	8.12	1.58	7.7
7	Écija (Se)	17	Arbequina	2005	7 × 5	286	Irrigated	No	No	Sandy-clay-loam	8.12	0.83	7.7
8	Santaella (Co)	245	Picual	2007	8 × 6	208	Rainfall	Native	No	Sandy-clay-loam	8.33	2.01	5.4
9	Santaella (Co)	154	Arbequina	2007	7 × 5	286	Rainfall	Native	No	Sandy-clay-loam	8.08	1.99	21.2
10	La Rambla (Co)	22	Arbequina	2006	4 × 1.35	1852	Irrigated	Native	No	Sandy-clay-loam	8.33	1.53	5.4
11	La Rambla (Co)	45	Picual	2006	8 × 6	208	Irrigated	Native	No	Sandy-clay-loam	8.33	1.71	5.4
12	La Rambla (Co)	7	Picual	2006	7 × 7.5	190	Irrigated	Native	No	Sandy-clay-loam	8.33	1.10	5.4
13	La Carlota (Co)	51	Picual	1995	9 × 4.5	247	Irrigated	No	No	Sandy-clay-loam	8.33	0.70	5.4
14	La Carlota (Co)	25	Picual	1995	8 × 6	208	Irrigated	No	No	Sandy-clay-loam	8.33	1.60	5.4
15	La Carlota (Co)	53	Picual	1994	8 × 6	208	Irrigated	No	No	Sandy-clay-loam	8.33	1.12	5.4
16	Baeza (J)	25	Arbequina	2001	8 × 2.5	500	Irrigated	Native	Yes	Sandy-clay-loam	7.77	1.02	40.0
17	Baeza (J)	99	Picual	1955	10 × 10	100	Irrigated	Native	Yes	Sandy-clay-loam	7.77	0.28	40.0
18	Jerez de la Frontera (Ca)	23	Arbequina	2005	7 × 6	238	Rainfall	Native	No	Silty-clay	8.3	1.89	27.9
19	Jerez de la Frontera (Ca)	21	Arbequina	2007	7 × 6	238	Irrigated	Native	No	Silty-clay	8.3	1.91	27.9
20	Jerez de la Frontera (Ca)	17	Arbequina	2009	7 × 6	238	Rainfall	Native	No	Clay	8.25	2.22	37.2
21	Jerez de la Frontera (Ca)	35	Picual	1995	8 × 7	179	Rainfall	Native	No	Clay	8.25	2.44	37.2
22	Jerez de la Frontera (Ca)	28	Arbequina	2006	7 × 6	238	Irrigated	Native	No	Clay-loam	8.3	0.18	4.0

branches (at least 2 cm diameter) were measured. The measurements were performed with a forestry calliper and rigid metallic metric tape. The biomass volume was calculated using the equation:

$$BV = 1/3 \times \Pi \times h \times (R^2 + r^2 + R \times r) \quad (1)$$

where BV: biomass volume; h: height (m); R: largest diameter (m); r: smallest diameter (m).

Additionally, cores were collected from the trunk and branches of each variety using the Pressler borer to determine the wood density.

Collection of soil samples

Five soil samples were collected manually in random locations of each HUOG using a 4-cm-diameter Eijkkamp core sampler to depths between 0 and 30 cm. The sample soil was mixed and homogenized, and five additional samples of unaltered soil were also collected to determine the bulk density using a special Eijkkamp probe with a closed ring holder. The soil samples were transported to the laboratory and stored in a refrigerator at -30°C until analysis.

Laboratory study and analysis

Laboratory analysis

Soil samples were air dried, shredded, homogenized and sieved. The C content in the wood samples and organic C content in the soil samples were determined by dry combustion using an elemental analyzer (EA 3000 Eurovector SpA Milán, Italy). The values thus obtained were multiplied by a factor of 2 to calculate the organic matter content [21]. Texture was determined using a Bouyoucos densimeter. Carbonates were quantified using a Bernard calcimeter. The pH of the soil was measured at a 1:2.5 soil: water ratio.

Calculation of biomass and C stock in olive trees

The wood volume of each selected tree was calculated according to the previously obtained biometric measurements (length and diameter of the trunk and different branching categories). The measurements from the three trees selected in each plantation were averaged. Thus, the olive tree C stock was obtained using the equation:

$$CS = C \text{ concentration} \times WD \times WV \quad (2)$$

where CS: olive tree carbon stock; C: olive tree carbon (g kg^{-1}); WD: wood density (Mg m^{-3}); V: wood volume (m^3).

Determination of soil organic C stock

The soil organic C (SOC) stock at the sampled depth (0–30 cm) was calculated using the equation:

$$SOCS = \text{SOC concentration} \times BD \times SD \quad (3)$$

where SOCS: soil organic carbon stock; SOC: soil organic carbon (g kg^{-1}); BD: bulk density (Mg m^{-3}); SD: soil depth (m). Bulk density was determined by the core method using a soil core for each plot and depth [22].

Determination of GHG emissions during farming operations in olive tree plantations

In the method used here, the applied GHG emission factors were expressed in terms of kg carbon equivalent (CE). The amount of GHG produced by each HUOG was determined from crop records for each plantation using the emission factors (EF) proposed in the scientific literature, particularly those by Lal [23] and extended by Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) [24]. The specific EFs for the olive tree plantations were calculated according to energy data and by studying the hourly output of the different farming operations [23].

Determination of C balance and C sequestration rate in olive tree plantations

The annual rate of C stored in the biomass and soil at a depth of 0–30 cm must be determined to estimate the net C balance or C footprint in each plantation after subtracting the GHG emissions produced during farming operations.

The net flux of C (NFC), which is expressed as the annual C sequestration rate per hectare for each HUOG and is also known as the C footprint, was determined from C sequestration data determined through the olive plantation biomass, soil C storage and GHG emissions during farming operations (expressed in CE) using the following formula:

$$NFC = C \text{ sequestration by the aboveground parts and roots} + C \text{ sequestration by soil} - C \text{ emissions(CE) during farming operations} \quad (4)$$

Statistical analysis

Annual data for each variable were subjected to analysis of variance (ANOVA), using a randomized complete block design combined with the error term according to McIntosh [25]. Means were compared using Fisher's protected least significant difference (LSD) test at $P < 0.05$. LSDs for the different main effects were calculated using the appropriate standard error terms. The Statistix v. 9.0 [26] package was used for this purpose. Using different dasometric measurements obtained

from the 22 olive HUOGs as well as information corresponding to the variety, date and plantation frame, different predictive models were tested to estimate the annual C sequestration rate by the olive tree plantation biomass.

Results

C content in olive tree plantations

C content in the biomass of olive tree plantations

The shoot/root biomass ratios obtained for the uprooted olive trees, once the leaves and branches below 2 cm in diameter were removed, were similar for Picual and Arbequina: 4.2 and 4.3, respectively (data not shown).

The percentages of C content in the trunk wood, different types of branches and roots in both varieties did not differ, recording an average percentage of $45.7 \pm 0.6\%$ (data not shown).

The average amount of C stored in the total biomass of the 22 HUOGs was $5.9 \pm 4.3 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Table 2). In intensive plantations of similar age, C accumulation by the Picual variety was much higher than C sequestration by the Arbequina variety, at 5.4 and 3.1 Mg ha^{-1} , respectively. In hedgerow super-intensive plantations, only the Arbequina variety was present. The amount of C stored per hectare in these plantations was greater than the amount stored per hectare in intensive plantations of the same variety, at 6.7 and 3.1 Mg ha^{-1} , respectively. The C sequestration by the Arbequina variety hedgerow plantations was 20% higher than the C sequestration by Picual variety plantations.

In summary, conventional plantations older than 60 years with densities between 80 and 100 trees ha^{-1} are capable of sequestering over $15 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ C}$ in their

biomass (Tables 1 and 2). This quantity can be attained by 18-year-old intensive plantations, especially plantations of the Picual variety, with densities of approximately 200 trees ha^{-1} . Moreover, super-intensive hedgerow plantations of the Arbequina variety with an average age of 6 years presented C sequestration values between 7 and 8 Mg ha^{-1} (Tables 1 and 2).

Organic C content in the soils of olive tree plantations

Mean organic C value in soils was $26.1 \pm 11 \text{ Mg ha}^{-1}$ for the 0–30-cm depth horizon (Table 2). The mean percentage of organic C of the soil was 0.7%. In most cases, the soils of the olive plantation units presented low organic matter content at 1.4% in the upper layer (0–30 cm).

Total organic C content of olive tree plantations

The mean amount of C sequestered in olive tree plantations was $31.5 \pm 11.4 \text{ Mg ha}^{-1}$; 17% of this amount corresponds to C stored in the biomass and 83% corresponds to organic C in the 0–30 cm soil depth (Table 2). However, although the amount of C in the soil was higher, the importance of C stored in the tree biomass should not be undervalued, because the C sequestration rate by trees is more stable and increases over time in relation to the growth of the plantation.

Annual C sequestration rate in olive tree plantations

The aforementioned annual C rates were calculated as follows: by dividing the amount of C accumulated in the biomass and soil by the age of the plantation (in years). The annual C sequestration rate is a key indicator used to obtain the C footprint, and it is required to assess the different farming practices conducted in the olive tree plantation and determine their effect on C sequestration and GHG emissions as well as to implement guidelines to improve C sequestration and mitigate GHG pollution by the agroecosystem.

The annual C sequestration rate in the olive tree plantations (biomass and soil) was recorded at $2.24 \pm 2.2 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ on average, and showed a high degree of variability. Regarding plantation system intensity (Table 3), the mean value obtained for the super-intensive plantations was significantly higher

Table 2. Organic carbon stock in shoot, root, soil (0–30 cm) and total according to variety and number of olive trees ha^{-1} .

HUOGs	Variety	Number of olive trees ha^{-1}	Carbon stock (Mg ha^{-1})			
			Shoot	Root	Soil	Total
1	Picual	204	7.1	1.7	34.25	43.1
2	Picual	83	8.3	2.8	21.80	32.8
3	Arbequina	1333	2.5	0.6	39.96	43.1
4	Arbequina	1975	4.8	1.1	32.05	38.0
5	Arbequina	1975	7.4	1.7	12.26	21.4
6	Arbequina	1975	7.1	1.7	33.22	42.0
7	Arbequina	286	1.0	0.2	17.35	18.6
8	Picual	208	0.7	0.2	30.21	31.1
9	Arbequina	286	1.2	0.3	28.98	30.5
10	Arbequina	1852	6.2	1.5	32.09	39.8
11	Picual	208	1.2	0.3	35.95	37.5
12	Picual	190	3.2	0.8	23.10	27.1
13	Picual	247	4.0	1.0	14.74	19.8
14	Picual	208	11.7	2.8	33.64	48.2
15	Picual	208	2.1	0.5	23.44	26.0
16	Arbequina	500	3.2	0.8	15.37	19.4
17	Picual	100	12.2	4.1	4.23	20.5
18	Arbequina	238	6.0	1.4	39.75	47.2
19	Arbequina	238	1.6	0.4	40.13	42.1
20	Arbequina	238	1.3	0.3	33.26	34.8
21	Picual	179	6.8	1.6	36.66	45.1
22	Arbequina	238	3.7	0.9	3.78	8.4

Note: HUOGs: Homogeneous unit olive groves.

Table 3. Annual C sequestration rate in shoot, root and soil according to olive tree plantations.

Olive tree plantations	Carbon sequestration rate ($\text{kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)				
	Biomass			Soil	
	Shoot	Root	Total	(0–30 cm)	
Conventional	178 c	60 b	238 c	224 c	462 c
Intensive	438 b	104 b	542 b	1596 b	2138 b
Super-intensive	958 a	224 a	1182 a	3076 a	4258 a

Note: Within-treatment means followed by the same letter are not significantly different at $P \leq 0.05$ according to least significant difference.

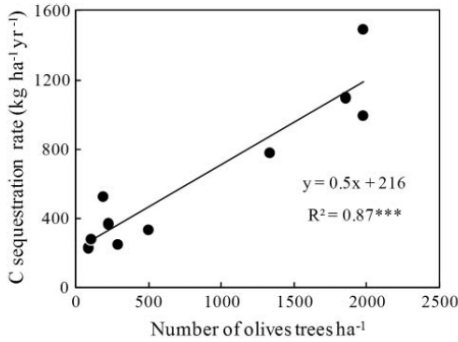


Figure 2. Predictive model for determining the annual C sequestration rate as a function of the number of olive trees in the grove olives (traditional, intensive and super-

(by nearly 2 times) compared with the intensive plantations, and the conventional plantations presented the lowest mean annual rates.

Estimation of a predictive model for determining C sequestration in olive tree biomass

Only the number of trees per ha, or plantation frame, fit a highly significant linear model defined by the equation (Figure 2):

$$y = 0.49x + 216 (R^2 = 0.87^{***}) \quad (5)$$

This model can calculate the annual C sequestration rates from the variable y (expressed in terms of kg ha^{-1}) as a function of the number of olive trees per hectare in the plantation (independent variable x).

In addition, the data analysis showed differences in terms of C sequestration between the Picual and Arbequina varieties. In particular, the average annual C sequestration rate was 0.401 Mg ha^{-1} in intensive plantations of Picual and 0.374 Mg ha^{-1} in intensive plantations of Arbequina. As a result, a correction factor or coefficient of 1.1 was used in the model when analyzing the Picual variety, and the results obtained for the annual C sequestration rate in the equation must be multiplied by this factor (1.1) if the variety corresponds to Picual.

Similarly, data regarding the cultivation system and whether the plantations were irrigated or rainfed were analyzed. The average annual C sequestration rate was 0.303 Mg ha^{-1} in rainfed plantations and 0.374 Mg ha^{-1} in irrigated plantations. Thus, a correction factor or coefficient of 0.8 must be applied to the model when considering rainfed olive tree plantations, and the value obtained for the annual C sequestration rate in the equation must be multiplied by 0.8 when the model is applied to rainfed olive tree plantations.

Determination of GHG emissions from olive tree plantations

The mean total GHG value emitted during farming operations conducted in the studied plantations was $113 \pm 54 \text{ kg CE ha}^{-1}$, with notable differences among plantations (Table 4).

Balance and carbon footprint in olive tree plantations

The average C balance and footprint for the studied plantations was $2.13 \pm 2.18 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, and high variability occurred between plantations, with values over $4 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ and, in one case, over $8 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ (data not shown). Regarding plantation intensity (Table 5), super-intensive plantations presented significant higher values compared with that of intensive and conventional plantations. In particular, the C balance was positive and C footprint negative in the three plantation systems, but the values obtained for super-intensive and intensive plantations were 9 and 5 times higher, respectively, compared with the values observed in conventional plantations.

Discussion

The average amount of C stored in the total biomass (1.35 Mg ha^{-1}) of the Arbequina variety in intensive plantations (286 number olive tree ha^{-1}) was lower than those obtained by Proietti et al [7]. These authors obtained an average of $1.473 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ of C stored in the total biomass because the pruning and fruit yield were included.

The carbon storage may be increasing with the management practices as tillage system, use of organic residues, etc. [1,4]. The mean soil organic C stock (26.1 Mg ha^{-1}) was very similar to those obtained by Parras-Alcantara et al. [27] under long-term organic farming.

Few studies have assessed C sequestration rates and the C footprint of olive tree plantations, and most of these studies refer to plantations in Southern Spain and, to a lesser extent, Italy. Moreover, these works differ notably in their methods and results. Villalobos et al. [18] applied a model based on radiation use efficiency (RUE) to intensive olive tree plantations under irrigation in Southern Spain and obtained a potential C sequestration rate of $1.91 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$. This value is slightly lower than the average result obtained for the plantations included in this study ($2.24 \pm 2.22 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) but similar to the annual C sequestration rate for intensive olive tree plantations ($2.07 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) (Table 3). The heterogeneity of the studied plantations (variety, planting age, etc.) makes it difficult to compare some factors between them. For this reason, these records are preliminary until the model is fed with the progressive incorporation of data. Carbon

Table 4. Determination of GHG emissions expressed in equivalent carbon emission (kg CE) during farming operation according to homogeneous unit olive groves (HUOGs).

HUOGs	(kg CE ha ⁻¹)							Total
	Tillage	Irrigation	Fertilizers	Herbicides	Fungicides	Insecticides	Harvest	
1	32.9	84.9	3.5	0.0	19.2	0.4	9.4	150.4
2	13.8	0	3.4	0.0	1.7	0.0	9.4	28.3
3	9.5	84.9	36.6	8.2	12.7	3.3	14.1	169.4
4	9.5	84.9	1.0	22.9	13.7	4.5	14.1	150.6
5	13.5	84.9	36.6	14.5	13.5	6.4	14.1	183.5
6	9.5	84.9	15.5	11.5	12.7	4.5	14.1	152.7
7	9.5	84.9	15.5	11.5	12.7	4.5	9.4	148.0
8	9.5	0	1.0	15.2	1.1	3.3	9.4	39.5
9	9.5	0	1.0	15.2	1.1	3.3	9.4	39.5
10	9.5	84.9	15.5	11.5	12.7	3.3	14.1	151.5
11	9.5	84.9	15.5	11.5	6.4	3.3	9.4	140.5
12	9.5	84.9	15.5	11.5	12.7	3.3	9.4	146.8
13	9.5	84.9	7.9	0.0	7.6	5.6	9.4	124.8
14	9.5	84.9	7.9	0.0	1.9	1.7	9.4	115.3
15	9.5	84.9	7.9	0.0	1.9	1.7	9.4	115.3
16	2.2	84.9	8.2	21.4	2.3	0.0	9.4	128.4
17	2.2	84.9	8.2	21.4	2.3	0.0	9.4	128.4
18	5.8	0	0.0	8.7	0.0	2.3	9.4	26.2
19	5.8	84.9	0.0	8.7	0.0	2.3	9.4	111.1
20	5.8	0	0.0	0.0	0.0	3.8	9.4	19.0
21	5.8	0	0.0	0.0	0.0	3.8	9.4	19.0
22	0	84.9	62.0	17.4	1.6	3.8	9.4	179.0

sequestration is based on an average annual rate of carbon storage of all the plantations. This model, certainly very general, has been included by the International Olive Council as a software tool for the design of a model to calculate the carbon footprint in the olive groves of the Mediterranean area [101].

Morales and Villalobos [28] applied the OLIVE-CW functional model to an intensive olive tree plantation of Arbequina by using growth and production rates along with CO₂ and H₂O flux measurements obtained by eddy covariance. The maximum C sequestration rate obtained in that study was 5.4 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹, which is twice the average value of the current results (2.24 ± 2.2 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹); however, the maximum values were closer, and their values did not surpass the current results. Regardless of the methodology used, the model used by these authors obtained maximum values by incorporating the shredded residues from light pruning into the soil. Olive grove cover-crop systems must be considered an efficient agronomic practice for soil carbon fixation [29,30]. In this paper, the soils belonging to many olive tree plantations presented negative annual accumulation rates of organic C in the soil, which indicates a loss of organic C in the soil over time as a result of poor soil management.

The authors' model is designed for two varieties (Picual and Arbequina), and an age range of planting

between 7 and 58 years. The model includes traditional, intensive and super-intensive plantations and it has been established for the soil and climatic conditions of southern Spain. In this regard, it is clear that the model is limited although the progressive incorporation of data will allow the model to acquire a more and more general character, considering the importance of the two varieties and the studied area.

The high standard deviation confirms the marked variability in the C sequestration results and is a function of plantation age, plantation frame, variety, soil type and crop management. The oldest plantations, which were generally included in the traditional category, have accumulated higher quantities of C per hectare. In addition, in more recent plantations corresponding to intensive and super-intensive categories, plantation age also represents a key factor.

However, Nieto et al. [31] obtained values of potential C sequestration ranging from 0.5 to 0.6 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹, depending on soil properties by applying the RothC model, which considers C sinks and sources. These estimations are notably lower than the average results obtained in the current study for intensive and super-intensive plantations, but are similar to the values obtained in conventional plantations.

Table 5. Balance and C footprint according to olive tree plantations.

Olive tree plantations	Net C flux			
	C sequestration (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	GHG emissions (kg CE)	Balance (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	C footprint (Mg ha ⁻¹ yr ⁻¹)
Conventional	462 c	78 b	384 c	0.38 c
Intensive	2138 b	90 b	2048 b	2.05 b
Super-intensive	4258 a	152 a	4107 a	4.10 a

Note: Within-treatment means followed by the same letter are not significantly different at $P \leq 0.05$ according to least significant difference.

Compared with the organic C content in soil from historical data provided by farmers, the values obtained in this study were negative in many of the plantations and consistent with a steady decrease over time of organic C in the soil. A positive difference was observed in other locations where the amount of organic C has increased significantly over time. This section of the study provides the least reliable values for the C balance and C footprint in olive tree plantations because the analysis provided by the farmers is relatively recent. The small time difference between the farmers' analysis and analysis conducted in this study makes it difficult to observe an increase in organic matter in soil resulting from improvements to soil management (cover crops, non-tillage, burial of pruning residues, etc.). Moreover, the soil management practices that are usually conducted in olive tree plantations have not been very favorable to increasing the amount of organic C stored in the soil.

The organic C in the soil is less stable, lower accumulation rates are observed and proper farming operations, including conservation tillage or retaining crop residue, increase C sequestration. However, intensive tillage and crop residue removal lead to negative rates and decreased amounts of organic C sequestered in the soil. Therefore, tree plantations present higher and more stable potential for C sequestration over time compared with plantations of herbaceous crops. A significant number of the studied plantations are capable of sequestering high amounts of C (over 80 Mg ha⁻¹) because they include good-quality and well-managed soil, they are well-developed and mature conventional plantations, or they are newer intensive plantations under irrigation with rapid biomass growth.

Regardless of the role of olive tree biomass for the annual C sequestration rate, which is directly related to the plantation density according to the authors' results and consistent with the results of Sofo et al. [16] in Southern Italy, the rate of C sequestration by the soil may play a significant role under proper management. According to Ramachandra Nair et al. [12], compared with systems without trees, agricultural systems based on trees sequester more C in the lower layers of the soil located near the trees, and higher organic C is observed in soils with greater tree density and increased lime and clay particles, which stabilize C. However, Lal [10] reported that the total amount of C sequestered in both the aboveground and under-ground parts of trees is affected by several factors, such as the region, plantation type and age, soil characteristics, etc. Overall, the difference between rainfed and irrigated agriculture in terms of C sequestration cannot be observed because its effect is masked by the age of the rainfed plantations, which are older. On average, the soil and aboveground portions are

estimated to contain 60% and 30% of the total amount of C stored in tree plantations, respectively. These plantations have a significant potential for C sequestration over time and are more environmentally efficient C sinks for use in mitigating GHG emissions. The emissions values of the current study are relatively low compared with those of other tree plantations, and even with those of certain herbaceous plantations. The main factors contributing to the GHG emissions are irrigation and, in some cases, the use of fertilizers. These low levels of C emissions from farming operations are a result of the low inputs required for olive plantation growth, even in intensely irrigated plantations, and represent a positive aspect for the C balance and footprint because this results in higher net C flux and sequestration.

Numerous studies have addressed olive plantation soil management, including non-tillage, cover crop use (cover crops or native vegetation) and pruning residue incorporation, and they have demonstrated that these are efficient practices that might improve soil properties, reduce CO₂ emissions and increase the soil's ability to sequester C [29,31–33]. This effect has been confirmed in this study, in which olive plantations under proper soil management, including non-tillage, cover crop use and/or pruning residue incorporation, demonstrated positive C sequestration rates in the soil and produced the highest global C sequestration rates of the studied plantations.

Thus, it is clear that olive tree plantations represent an important potential for C sequestration. However, several questions must be clarified to provide a more realistic assessment of the impact of tree plantations and management practices on C sequestration. The authors tried to analyze in a timely manner the annual rate of carbon sequestration of different types of planting. It is clear that the future impact on carbon sequestration of different types of plantations will be different. However, the authors believe that this is a complex issue that is not clearly resolved; first, because intensive plantations with proper management and certain varieties of smaller size are lasting more years than expected. Also, often many superintensive plants undergo a transformation to intensive, uprooting a large number of trees whose branches are incorporated into the soil while the trunks of larger diameter are removed. Moreover, the data reported are referred to a specific time when all plantation trees were in production. It must be considered that this study has made a preliminary point, despite the remarkable efforts made in the field work. Without doubt, the authors' future work is designed to track the evolution of carbon sequestration in different types of plantations. Therefore, further research must be performed to assess all of the components of the C flux and the effects of environmental factors and crop management practices.

Conclusions

In this study, the potential of olive tree plantations for storing C in a stable manner has been confirmed and was especially evident in intensive plantations, thus highlighting the importance of these plantations for mitigating GHGs, as well as their role as CO₂ sinks. The net C balance in olive tree plantations presents a clearly positive impact on the life-cycle assessment of the product and improves estimates of the C footprint of olive oil as a final product.

A steady decrease in the amount of organic matter in the soil was observed in a large number of the studied olive plantations because of poor soil management, which has caused a negative accumulation of organic C over time. Improvements to soil management, such as conservation tillage, residue management and incorporation, cover crop use, etc., are recommended to progressively increase the accumulation of C in the soil and improve the C balance of olive plantation agrosystems over medium- and long-term periods.

By including the amount of C sequestered by olive tree plantations, the C footprint value calculated for the production and sale of olive oil could be reduced or even negative because the C sequestration rate of an olive plantation (biomass + soil) could surpass the emissions caused from farming operations and oil manufacturing. Ignoring the potential contribution of sequestered C in olive plantation biomass and soil when calculating the C footprint of olive oil is a serious methodological error that threatens the foundations of the life cycle of the product and C balance studies related to agricultural primary materials.

Extrapolating from the results of this study, the significance of the total area of olive tree plantations in the Mediterranean area, especially in Spain, which has over 2.5 million ha, demonstrates the worldwide importance that such plantations could have as significant CO₂ sinks and mitigating factors for GHG emissions caused by farming activities.

Acknowledgements

The authors would like to thank to Joaquin Muñoz, Jose Muñoz and Auxiliadora Lopez-Bellido for their excellent assistance in the laboratory and fieldwork.

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the authors.

References

- Lopez-Bellido RJ, Fontan JM, Lopez-Bellido FJ, Lopez-Bellido L. Carbon Sequestration by Tillage, Rotation, and Nitrogen Fertilization in a Mediterranean Vertisol. *Agron. J.* 102, 310–318 (2010).
- Parras-Alcantara L, Martin-Carrillo M, Lozano-Garcia B. Impacts of land use change in soil carbon and nitrogen in a Mediterranean agricultural area (Southern Spain). *Solid Earth* 4, 167–177 (2013).
- Eagle A, Olander LP. Greenhouse gas mitigation with agricultural land management activities in the United States – A side – by – side comparison of biophysical potential. *Adv. Agron.* 115, 79–179 (2012).
- Fernandez-Romero ML, Parras-Alcantara L, Lozano-Garcia B, Clark JM, Collins CD. Soil quality assessment based on carbon stratification index in different olive grove management practices in Mediterranean areas. *Catena* 137, 449–458 (2016).
- Lal R. Agronomic interactions with CO₂ sequestration. In: *Encyclopedia of Sustainability and Technology*. Meyers R, Christou P, Savin R (Eds). Springer, New York, 161–167 (2012).
- Olson KR, Al-Kaisi MM, Lal R, Lowery B. Experimental consideration, treatments, and methods in determining soil organic carbon sequestration rates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 78, 348–360 (2014).
- Proietti S, Sdringola P, Desideri U *et al.* Carbon footprint of an olive tree grove. *Appl. Energy* 127, 115–124 (2014).
- Avraamides M, Fatta D. Resource consumption and emissions from olive oil production: a life cycle inventory case study in Cyprus. *J. Clean. Prod.* 16, 809–821 (2008).
- Goward J, Whitty M, Rizos Ch. *Estimating and predicting carbon sequestrated in a vineyard with soil surveys, spatial data and GIS management*. Thesis-Bachelor of Engineering University of New South Wales (2012).
- Lal R. Soil carbon stocks under present and future climate with specific reference to European ecoregions. *Nutr. Cycl. in Agroecosyst.* 81, 113–127 (2008).
- Proietti P, Sdringola P, Brunori A *et al.* Assessment of carbon balance in intensive and extensive tree cultivation systems for oak, olive, poplar and walnut plantation. *J. Clean. Prod.* 112, 2613–2624 (2016).
- Ramachandran Nair PK, Nair VD, Mohan Kumar B, Showalter JM. Carbon sequestration in agroforestry systems. *Adv. Agron.* 108, 237–307 (2010).
- Peters GP. Carbon footprints and embodied carbon at multiple scales. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 2, 245–250 (2010).
- Pandey D, Agrawal M. Carbon footprint estimation in the agriculture sector. In: *Assessment of carbon footprint in different industrial sectors Vol I*. Muthu SS (Ed). Springer, Singapore, 25–47 (2014).
- Clay DE, Chang J, Clay SA *et al.* Corn yields and no-tillage affects carbon sequestration and carbon footprints. *Agron. J.* 104, 763–770 (2012).
- Sofa A, Nuzzo V, Palese AM *et al.* Net CO₂ storage in Mediterranean olive and peach orchards. *Sci. Hortic.* 107, 17–24 (2005).
- Testi L, Orgaz F, Villalobos F. Carbon exchange and water use efficiency of a growing, irrigated olive orchard. *Environ. Exp. Bot.* 63, 168–177 (2008).
- Villalobos FJ, Test, L, Hidalgo J, Pastor M, Orgaz F. Modelling potential growth and yield of olive (*Olea europaea* L.) canopies. *Eur. J. Agron.* 24, 296–303 (2006).
- Hultnas M. 2011. Methods to determine the dry matter content of roundwood deliveries. *Tappi J.* 33–37 (2011).
- Grissino-Mayer HD. A manual and tutorial for the proper use of an increment borer. *Tree-Ring Res.* 59, 63–79 (2003).
- Pribyl, DW. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma* 156, 75–83 (2010).
- Grossman RB, Reinsch TG. Bulk density and linear extensibility. In: *Methods of soil analysis Part 4, SSSA Book Ser. 5*. Dane JH, Topp GC (Eds). SSSA, Madison, 201–254 (2002).

23. Lal R. Carbon emission from farm operations. *Environ. Int.* 30, 981–990 (2004).
24. ADEME. Bilan Carbone: *Guía de factores de emisión*. Version 6.1. Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie, Paris (2010).
25. McIntosh MS. Analysis of combined experiments. *Agron. J.* 75, 153–155 (1983).
26. Analytical Software. *Statistix 8.1 user's manual*. Analytical Software, Tallahassee, FL, USA (2005).
27. Parras-Alcantara L, Diaz-Jaimes L, Lozano-Garcia B. Organic farming affects C and N in soils under olive groves in Mediterranean areas. *Land Degrad. Develop.* 26, 800–806 (2015).
28. Morales A, Villalobos FJ. *Modelización del balance de CO₂ en olivares*. Final Project. University of Córdoba, Spain (2010).
29. Castro J, Fernandez-Ondoño E, Rodriguez C, Lallena AM, Sierra M, Aguilar J. Effects of different olive-grove management systems on the organic carbon and nitrogen content of the soil in Jaén (Spain). *Soil Tillage Res.* 98, 56–67 (2008).
30. Repullo-Ruiberriz MA, Carbonel-Bojollo R, Alcantara-Braña C, Rodriguez-Lizana A, Ordoñez-Fernandez R. Carbon sequestration potential of residues of different types of cover crops in olive groves under mediterranean climate. *Span. J. Agric. Res.* 10, 649–661 (2012).
31. Nieto OM, Castro J, Fernández E, Smith P. Simulation of soil carbon stocks in a Mediterranean olive grove under different soil-management systems using the RothC model. *Soil Use Manage.* 26, 118–125 (2010).
32. Nieto OM, Castro J, Fernandez-Ondoño E. Conventional tillage versus cover crops in relation to carbon fixation in Mediterranean olive cultivation. *Plant Soil* 365, 321–335 (2013).
33. Repullo MA, Carbonell R, Hidalgo J, Rodriguez-Lizana A, Ordoñez R. Using olive pruning residues to cover soil and improve fertility. *Soil Tillage Res.* 124, 36–46 (2012).

Website

101. International Olive Council (IOC). www.internationaloliveoil.org.

Suplemento de

Vida RURAL

El quincenal del campo

1 MARZO • Nº 375 • AÑO XXI • 3/2014

Balance y huella de carbono del olivar



Balance y huella de carbono del olivar



■ Luis López Bellido,
M^a Purificación Fernández García y
Pedro J. López-Bellido Garrido.

Departamento de Ciencias y
Recursos Agrícolas y Forestales
de la Universidad de Córdoba.

La huella de carbono está de moda. Todo el mundo habla de ella, pero no todos saben qué es exactamente y para qué sirve. Existe sobre ello mucho “ruido” en los medios de información y en los ámbitos comerciales. Asimismo, existe profusa y compleja normativa generalista para su cálculo que se aplica indistintamente a cualquier producto o servicio. También a los productos transformados agroalimentarios, cuya materia prima procede de los cultivos agrícolas. La singularidad de la agricultura, por su capacidad de capturar y secuestrar el CO₂ atmosférico, hace que sea inapropiada la aplicación de tales métodos generalistas de cálculo de la huella de carbono al sector de productos agroalimentarios, que debería beneficiarse de la capacidad de sumidero potencial de CO₂ que tienen los cultivos agrícolas que los producen.

El dióxido de carbono (CO₂) es el principal gas de efecto invernadero. Hoy día la principal fuente de emisión de CO₂ a la atmósfera es el consumo de combustibles fósiles por parte de la industria y el transporte. La agricultura, a diferencia de estos otros sectores, es capaz, bajo un manejo apropiado, no sólo de compensar las emisiones de CO₂ a la atmósfera, sino de capturar éste y almacenarlo como carbono (C) en la biomasa de las plantas y en el suelo.

El secuestro de C se produce cuando un conjunto de prácticas de cultivo incrementan el almacenamiento de C en el suelo. El impacto producido por estas prácticas, tales como el sistema de laboreo, las rotaciones de cultivo, las plantaciones arbóreas o la fertilización, difiere según el tipo de suelo, el sistema de cultivo, el manejo de los residuos y el clima.

El término huella de C (*carbon footprint*, en inglés) es relativamente nuevo, aunque los métodos que lo soportan están bien establecidos, habiendo sido previamente desarrollados para una gran variedad de cuestiones ambientales. No existe una aceptación amplia y una definición concreta de la huella de C, aunque sí existe la noción de lo que es y de su realidad. Una definición abierta que intente ser aceptada para todas las posibles aplicaciones podría ser la siguiente: "la huella de carbono de una unidad funcional es el impacto climático bajo una medida especificada, que considera todas las fuentes relevantes de emisiones, sumideros y almacenamiento, tanto en el consumo como en la producción, dentro de un sistema limitado espacial y temporal".

La huella de C es uno de los indicadores que han alcanzado mayor difusión para identificar, sintetizar y comunicar de forma comprensible los posibles impactos ambientales de un proceso o actividad. Con esto se pretenden cuantificar las emisiones de gases de efecto inver-



Arranque de olivo con manipuladora telescópica para determinar el peso de las raíces, tronco y ramas principales.

nadero que son liberadas a la atmósfera debido a la producción y comercialización de un producto, desde la adquisición de las materias primas hasta su gestión como residuos, permitiendo a los consumidores decidir qué alimentos comprar según las emisiones generadas. El concepto de huella de C suscita el interés de las empresas, consumidores y políticos.

Los inversores ven en la huella de C un indicador de los riesgos de inversión. Los gerentes de compras están interesados en la huella de C de las cadenas de suministros, y los consumidores están cada vez más preocupados por las ofer-



tas de productos que estén etiquetados con la huella de C.

La huella de C, que se relaciona con el cambio climático, representa un elemento fundamental de la responsabilidad social corporativa de las empresas. Numerosos países como Francia, EE.UU., Canadá, Reino Unido, Suiza, Japón, Australia, Alemania, etc., han legislado y establecido normas sobre la huella de C de los productos y servicios. También cada vez más cadenas alimenticias incluyen en sus productos la huella de C. Según una encuesta reciente, el 72% de los europeos se muestran a favor de que sea obligatorio expresar la huella de C en los productos.

Para la aplicación del concepto de huella de C en la agricultura, se debe tener en cuenta que este sector, junto al forestal, son los únicos que tienen capacidad de absorber o remover CO₂ de la atmósfera, lo cual lleva a considerar más bien el término "balance de carbono" en vez de "huella de carbono", puesto que en muchos de los cultivos agrícolas, dependiendo de las técnicas de producción, se obtendrá un balance positivo comportándose como sumideros netos de CO₂. En este sentido algunos autores utilizan el término "huella parcial de carbono" e

“ EL SECTOR AGROALIMENTARIO RECIBE EL MISMO TRATAMIENTO EN EL CÁLCULO DE LA HUELLA DE C QUE UNA FÁBRICA DE CEMENTO O UNA COMPAÑÍA AÉREA, DONDE NO HAY SECUESTRO DE C ALGUNO EN LAS MATERIAS PRIMAS QUE SE EMPLEAN.

incluso "huella de carbono negativa".

El sector agrícola, como ya se ha dicho, se caracteriza porque puede remover CO₂ de la atmósfera almacenándolo temporalmente en los árboles (troncos, raíces, ramas, hojas y frutos) y de forma muy duradera en el suelo. Sin embargo, se requiere un proceso previo de investigación para conocer la capacidad de captura de CO₂ de un cultivo o sistema agrícola y la de secuestro de C del suelo. Muchos estudios han valorado la producción y el presupuesto neto de C de los ecosistemas forestales, pero pocos trabajos han sido realizados con los cultivos agrícolas, en parte debido a las dificultades e incertidumbres asociadas con la estimación del cómputo de C de las tierras de cultivo.

Los cultivos arbóreos tienen un reconocido papel en el secuestro de C, que puede llegar a superar a las plantaciones

forestales, aunque ha sido poco estudiado. El C que es almacenado en troncos, ramas y raíces tiene un marcado carácter estable.

Existen numerosas metodologías normalizadas a escala internacional para el cálculo de la huella de C, que se aplican a productos y servicios y tienen en cuenta únicamente las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de los procesos. Cuando tales métodos se aplican a la industria agroalimentaria, la huella de C se calcula teniendo en cuenta las emisiones de GEI de la materia prima recibida (sea trigo, aceituna, naranjas, etc.), a las que se suman las emisiones generadas en el proceso de fabricación correspondiente (pan o pastelería, aceite, zumo, etc.), prescindiendo del posible secuestro de C que tales cultivos han podido generar al producir la materia prima. Es decir, el sector agroalimentario recibe el mismo tratamiento en el cálculo de la huella de C que una fábrica de cemento, una compañía aérea o una fábrica de automóviles, donde evidentemente no hay secuestro de C alguno en las materias primas que se emplean.

Las metodologías normalizadas de cálculo de la huella de C no han sido especialmente diseñadas para ser aplicadas a la agricultura y a la industria agroalimentaria que de ella deriva. Se ignora el papel de la fotosíntesis en la captura y secuestro de C que este proceso genera en



Página Izda. Plantación intensiva de olivera con restos de poda para su incorporación al suelo.

Derecha. Plantación superintensiva de olivera con laboreo.

el suelo y en la biomasa, especialmente en las plantaciones arbóreas. Su cálculo es complejo y muy variable según zonas, métodos de cultivo, etc. Por esta razón, las normas oficialmente establecidas para determinar la huella de C han preferido no considerar este aspecto, a pesar de que se están aplicando a la industria agroalimentaria. Como ya se ha dicho, sólo tienen en cuenta las emisiones de GEI generadas por las operaciones y técnicas del cultivo y el proceso de transformación y/o acondicionamiento del producto final, lo que es sin duda más cómodo. De esta manera, en la práctica, se puede desde un despacho determinar la huella de C de un producto agroalimentario elaborado. Considerar el secuestro de C es más difícil y exige investigaciones previas y estudios detallados de adaptación para cada producto y agrosistema donde se produce.

En definitiva, se está aplicando una metodología inadecuada y con ello causando un grave perjuicio al sector agroalimentario, cuyas materias primas pueden aportar un factor de compensación que neutraliza, reduce e incluso hace negativa

De izquierda a derecha: Plantación de olivar con cubierta vegetal y riego localizado.

Plantación intensiva de olivar con cubierta vegetal.

Plantación superintensiva de olivar con laboreo convencional.



“ MUCHOS IGNORAN EL PAPEL ESTRATÉGICO DE LA AGRICULTURA Y QUE EXISTEN CADA DÍA MÁS AGRICULTORES QUE HACEN BIEN SU TRABAJO Y PRACTICAN UNA AGRICULTURA SOSTENIBLE Y RESPETUOSA CON EL MEDIO AMBIENTE.

la huella de C provocada por las emisiones de GEI del proceso completo. No se cumple tampoco la tan conocida frase “de la cuna a la tumba”, a pesar de que se recurran a subterfugios para establecer limitaciones metodológicas que se acomoden a las normativas oficialmente establecidas.

Por otro lado, existe de forma bastante generalizada, especialmente en organizaciones e instituciones públicas y ecologistas e importantes sectores de la sociedad, una preocupación casi obsesiva por las emisiones de GEI provocadas por la acción del hombre, lo cual, aún estando justificado, contrasta con el gran desconocimiento que existe sobre el papel que tienen la agricultura y los suelos agrícolas en la captura y secuestro de C, y su gran potencial para neutralizar dichas emisiones. Además, muchos consideran la agricultura una actividad altamente contaminante

y señalan a los agricultores como protagonistas de dicha contaminación. Ignoran el papel estratégico de la misma en la alimentación, y que existen cada día más agricultores que hacen bien su trabajo y practican una agricultura sostenible, respetuosa con el medio ambiente. La práctica del laboreo de conservación, la lucha integrada de plagas y enfermedades, el uso eficiente de los fertilizantes y la agricultura de precisión, cada día más generalizadas, son un ejemplo de ello. En este contexto, sorprende la aparente falta de interés que existe, en el sector agrícola y en el de la industria agroalimentaria española, por reivindicar e impulsar la puesta en valor del verdadero papel que la agricultura debe jugar en el secuestro de C y los balances de GEI. Parece existir una escasa preocupación de las organizaciones e instituciones agrarias en estudiar y proponer la inclusión en las normativas del

cálculo de la huella de C de los productos agroalimentarios del factor de secuestro de C estable que potencialmente tienen los suelos agrícolas y la biomasa de las estructuras arbóreas. Sin duda, la huella de C va a tener una especial importancia en el futuro de nuestras exportaciones agroalimentarias, especialmente de nuestros productos más genuinos y relevantes, hacia los países donde el consumidor está cada vez más preocupado por la cuestión ambiental y exige el etiquetado de la huella ecológica de los productos que consume.

En los últimos años se han realizado, sobre todo en EE.UU., Canadá y Australia, numerosas investigaciones sobre el balance entre emisiones y secuestro de C de diferentes cultivos, estudiándose su influencia en la huella de C de las materias primas finales de la producción del cultivo. También en España se han realizado algunos trabajos en este sentido en cultivos herbáceos de secano, hortícolas, frutales y cítricos.

Un Protocolo Internacional para el cálculo de emisiones de C en el sector vitivinícola fue diseñado en 2008 por el Instituto Internacional del Vino de California, la Asociación de Viticultores de Nueva Zelanda, el Programa de Producción Integrada de Vino de Sudáfrica y la Federa-

ción de Viticultores de Australia. Dicho Protocolo establece que se tenga en cuenta en la fase agronómica la captura de CO₂ realizada por las estructuras permanentes de la vid, es decir, las raíces y el tronco, excluyendo las hojas, el fruto y las ramas que se podan. Aquí está la clave a considerar para la verdadera estimación de la huella de C de los productos agroalimentarios, cuyas materias primas proceden de cultivos agrícolas.

En el marco de un Convenio entre el Centro de Innovación y Tecnología Agroalimentaria, S.A. (Citagro) y nuestro Grupo de Investigación de la Universidad de Córdoba, hemos desarrollado el proyecto de investigación "Carbosiega: nuevas metodologías para la certificación de la huella de C de la producción agrícola bajo sistemas de producción sostenibles". Uno de sus objetivos ha sido evaluar el balance y huella de C del cultivo de olivar en diferentes explotaciones olivereras en las provincias de Sevilla, Córdoba, Cádiz y Jaén.

Metodología

Se ha diseñado y validado una metodología de cálculo del balance de C asociada a la producción agrícola primaria del olivar; que ha tenido en cuenta, por un

lado, la captura de C estable de la biomasa de olivar y el secuestro de C por el suelo, y por otro, las emisiones de GEI producidas por las prácticas del cultivo.

■ Áreas de estudio

La investigación ha sido realizada en una superficie total de 1.232 hectáreas localizadas en las provincias de Sevilla, Córdoba, Cádiz y Jaén. En concreto fueron elegidas 24 Unidades Homogéneas de Cultivo (UHC), correspondientes a parcelas de olivar de un mismo agricultor y que tenían similares características agronómicas y de cultivo: suelos, variedad, edad y marco de plantación, sistema de cultivo (secano o regadío) y prácticas de cultivo. En dichas UHC estaban incluidas las variedades Picual, Arbequina, Hojiblanca y Picudo; plantaciones intensivas, superintensivas y tradicionales; y cultivo de regadío y de secano.

La gran diversidad existente entre las diferentes UHC de olivar estudiadas, en localización (clima), variedades, edad y marco de plantación y sistema de cultivo, ha sido muy valiosa para obtener una amplia variación de datos, que ha sido de gran utilidad para constatar el amplio rango de valores relacionados con el secuestro y balance de C del cultivo de olivar.



Estudio de campo

Arranque de olivos

Fueron arrancados tres ejemplares de cada una de las variedades Picual y Arbequina, procedentes de plantaciones intensivas de quince años de edad. También fue arrancado un olivo con tres pies de una plantación tradicional de 75 años de edad, de la variedad Picudo. Previamente al arranque se calculó mediante dasometría el volumen de la biomasa de los olivos enteros, con el fin de establecer la relación entre las medidas dasométricas y los datos reales de peso y volumen obtenidos directamente de los olivos arrancados y constatar la fiabilidad del método dendrométrico utilizado.

Las raíces de los árboles fueron separadas del tronco y pesadas. La parte aérea de cada árbol fue cubicada y pesada, de forma separada el tronco y las ramas de distintos órdenes (hasta 2 cm de diámetro). La relación en peso parte aérea/raíz fue determinada. También se tomaron muestras con la barrena Pressler de las raíces y los distintos órdenes de ramas para determinar la densidad de la madera de cada componente. Una porción de las diversas partes del material vegetal fue secada en estufa a 70°C para determinar la materia seca. Finalmente, todo el material fue triturado separadamente para determinar analíticamente el contenido de C.

Medida del volumen de la biomasa de las parcelas de olivar

En cada parcela fueron elegidos tres árboles representativos, donde se midieron la altura y el diámetro de la copa y la longitud y el diámetro mayor y menor del tronco y de las ramas principales y secundarias hasta un grosor mínimo de 2 cm de diámetro. Para ello se utilizó una forcipula forestal y una cinta métrica metálica rígida. También se tomaron con la sonda Pressler cilindros del tronco y de las ramas principales de los árboles de las dis-



Plantación tradicional con laboreo convencional.

tintas variedades para determinar la densidad de la madera.

Toma de muestras de suelo

En cada parcela se tomaron cinco muestras de suelo, distribuidas aleatoriamente, con una sonda manual Eijkelkamp de 4 cm de diámetro, a las profundidades de 0-30, 30-60 y 60-90 cm. Para cada profundidad se mezclaron las muestras de suelo. También fueron tomadas muestras de suelo inalteradas para determinar la densidad aparente de las tres profundidades referidas, utilizándose una sonda especial Eijkelkamp con soporte de anillo cerrado. Las muestras de suelos fueron llevadas al laboratorio y almacenadas a -30°C en congelador-frigorífico hasta su preparación para el análisis.

Análisis de laboratorio

Las distintas muestras de madera fueron secadas en estufa hasta peso constante y posteriormente molidas. Las muestras de suelo fueron secadas al aire, trituradas, homogeneizadas y tamizadas. En las muestras de madera fue determinado el contenido de C y en las de suelo el de C orgánico. En ambos casos mediante espectrometría de infrarrojo cercano (NIR), basándose en el método de combustión seca de Dumas.

Cálculo de la biomasa y del contenido de C de los olivos

Mediante un programa informático especialmente diseñado, se calculó el volumen de la madera de cada árbol seleccionado, considerando las medidas biométricas realizadas (longitud y diámetro del tronco y los distintos órdenes de rami-

ficación). Las medidas de los tres árboles de cada parcela fueron promediadas en un solo valor. Los cilindros de madera obtenidos con la barrena Pressler, una vez secos, permitieron el cálculo de la densidad. De esta forma, fue calculado el contenido de C de la biomasa de cada árbol y para cada parcela.

Cálculo del C orgánico del suelo

A partir de la densidad aparente del suelo determinada y de los resultados porcentuales obtenidos de C orgánico, se calculó el contenido en peso de C orgánico en las tres profundidades de suelo muestreadas: 0-30, 30-60 y 60-90 cm.

Estimación de un modelo alométrico para predecir la acumulación de C en la biomasa del olivo

Distintas ecuaciones alométricas fueron ensayadas para determinar la tasa de acumulación de C por hectárea y año en las parcelas de olivar, en función de las distintas variables biométricas medidas en el conjunto de las parcelas estudiadas.

Cálculo de las emisiones de GEI de las operaciones de cultivo del olivar

La determinación de los gases de efecto invernadero (GEI), expresados en kg de carbono equivalente (CE) para cada parcela de olivar, fue realizada a partir de la ficha de cultivo de cada parcela, utilizando los factores de emisión (FE) establecidos en la literatura científica, especialmente por Lal (2004) [Carbon emission from farm operations. Environment Inter-

national, 30: 981-990) y completada por la Guía de los Factores de Emisión Versión 6.1 (Bilan Carbone, Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie). Los FE específicos del olivar fueron calculados de acuerdo con los datos energéticos y el estudio de rendimiento horario de las diversas operaciones.

Determinación del balance y tasa de secuestro de C en las parcelas de olivar

A partir de los datos de captura de C por la biomasa del olivar, el C almacenado en el suelo y las emisiones de GEI (expresadas en CE) de las operaciones de cultivo, se ha obtenido el Flujo Neto de Carbono (FNC), expresado como tasa anual de secuestro de C por hectárea para cada parcela o también denominada huella de carbono, mediante la fórmula:

$FNC = C \text{ acumulado en biomasa aérea y radicular} + \text{secuestro de C por el suelo} - \text{emisiones de C (CE) de las operaciones de cultivo.}$

Resultados

■ Biomasa y contenido de C de las parcelas de olivar

La relación parte aérea/raíz, obtenida a partir de los olivos arrancados, prescindiendo de las hojas y ramas de diámetro inferior a 2 cm (material que no ha sido computado para el cálculo de la captura de C de la biomasa de olivar, al considerarse que en su mayoría se retira con la poda y recolección y es incorporado al suelo, donde puede transformarse en C estable con el tiempo) ha sido muy similar en las variedades Picual y Arbequina: 4,2 y 4,3, respectivamente. Dicha relación en los olivares viejos tradicionales con 3 pies fue muy superior (≈ 6), debido al importante papel que juegan las peñas; cuya cubicación es por otro lado

muy difícil, debido por un lado a su forma muy irregular y por otro a que con frecuencia parte de las mismas está bajo la superficie del suelo.

El contenido porcentual de C de la madera ha sido prácticamente similar en el tronco y en los distintos tipos de ramas y la raíz, así como en las variedades. Este ha sido como promedio $45,7 \pm 0,6\%$.

El contenido medio de C por hectárea almacenado en la biomasa en el conjunto de las 24 parcelas (UHC) del estudio ha sido $6,3 \pm 4,5$ t/ha. La elevada desviación estándar constata la gran variabilidad de los valores de C capturado,

que es función de la edad de la plantación, el marco de la misma, la variedad, el tipo de suelo y el manejo del cultivo. Las plantaciones más antiguas, generalmente de tipo tradicional, son las que por su edad han acumulado mayor C por hectárea. Igual ocurre en las plantaciones más jóvenes de tipo intensivo y superintensivo, donde también la edad de plantación juega un papel importante. En las plantaciones intensivas de fechas de plantación similares, la acumulación de C en la variedad Picual es muy superior al de la variedad Arbequina: 5,4 y 3,1 t/ha, respectivamente. Las plantaciones superintensivas en seto, todas de la variedad Arbequina, superan en almacenamiento de C por hectárea a las plantaciones intensivas de la misma variedad en más del doble: 6,7 t/ha frente 3,1 t/ha. Respecto a la variedad Picual, la diferencia entre ambos sistemas de plantación es ligeramente superior al 20%, favorable a la plantación en seto de Arbequina.

En conjunto, las diferencias entre secano y regadío no han sido apreciadas debido a las diferencias de edad de las plantaciones, que al ser más antiguas en secano han enmascarado la comparación de resultados.

En síntesis, las plantaciones convencionales con más de 60 años y una densidad de plantación de 80 a 100 árboles/ha superan las 15 t/ha de C almacenado en su biomasa. Las plantaciones intensivas con una densidad en torno a los 200 árboles/ha pueden alcanzar dichos niveles a los 18 años de edad, sobre todo con la variedad Picual. En las plantaciones superintensi-



De arriba a abajo. Toma de muestra en tronco de olivar con la sonda Pressler para determinar la densidad de la madera.

Medida del diámetro del tronco de olivo con forcípula forestal.

Medida del diámetro de ramas de olivo con forcípula forestal.

Arranque de olivo con manipuladora telescópica para determinar el peso de las raíces tronco y ramas principales.



vas en seto de la variedad Arbequina, con una edad media de plantación de 6 años, la captura media de C alcanza niveles medios comprendidos entre 7 y 8 t/ha. Es evidente, que dichas plantaciones tienen un gran potencial de secuestro de C en el tiempo, y son por tanto ambientalmente más favorables como sumidero de C y en la mitigación de los GEI.

■ Contenido de C orgánico del suelo de las parcelas de olivar

El porcentaje medio de C orgánico en el horizonte superficial del suelo (0-30 cm) fue 0,7%, más del doble que en el horizonte intermedio de 30-60 cm (0,32%). En el horizonte inferior (60-90 cm) el promedio fue 0,21%. En conjunto, los suelos de las parcelas de olivar del estudio, con algunas excepciones, tuvieron un contenido bajo de materia orgánica: 1,2% en el horizonte superior de 0-30 cm, 0,55% en el nivel 30-60 cm y 0,36% en 60-90 cm.

Los valores medios de C orgánico de los suelos, expresados en t/ha, fueron $26,1 \pm 11$; $12,2 \pm 7,5$ y $8,1 \pm 8,9$ t/ha para los horizontes 0-30, 30-60 y 60-90 cm, respectivamente. El horizonte superficial tuvo como promedio el 56% del C orgánico del perfil del suelo, el 26,3% el horizonte intermedio y el 18% el inferior.

El perfil completo (0-90 cm) del conjunto de los suelos estudiados tuvo un contenido medio de C orgánico de $46,4 \pm 20,5$ t/ha. Hay que valorar que el C orgánico almacenado en los dos horizontes inferiores (30-60 y 60-90 cm) es más valioso desde el punto de vista del secuestro de C por el suelo, al no estar sometidos a las labores y ser menor la acción de los microorganismos que en el horizonte superficial (0-30 cm); es decir es un C menos lábil, más estable.

“ EL SECUESTRO DE C DE TODAS LAS PARCELAS ESTUDIADAS MOSTRÓ UN VALOR POSITIVO EN TODOS LOS CASOS RESPECTO A LAS EMISIONES DE CO₂ DE LAS OPERACIONES DE CULTIVO.

La diferencia entre el contenido de C orgánico del suelo procedente de los análisis históricos facilitados por los agricultores y de los valores determinados en el estudio fue negativa en muchas de las parcelas, lo que indica pérdidas en el tiempo de C orgánico del suelo. En otras la diferencia fue positiva y en algún caso con valores importantes de incremento de las reservas de C orgánico. Este apartado del estudio es el que presenta menos fiabilidad para el cálculo del balance y huella de C de las plantaciones de olivar, debido a que los análisis proporcionados por los agricultores son de fecha relativamente reciente. El escaso diferencial de tiempo entre dichos análisis y los realizados en el estudio, dificulta que se manifieste un incremento de la materia orgánica del suelo derivado de las mejoras en el manejo del mismo (cubiertas vegetales, no laboreo, enterrado de restos de poda, etc.). Además, con algunas excepciones, las

prácticas de manejo del suelo de muchas parcelas no han sido muy favorables para incrementar progresivamente las reservas de C orgánico del suelo.

■ Almacenamiento de C en la biomasa y el suelo de las parcelas de olivar

El almacenamiento medio de C en las parcelas de olivar estudiadas ha sido $52,7 \pm 19,7$ t/ha, correspondiendo el 12% al C de la biomasa y el 88% al C orgánico del suelo en el perfil 0-90 cm. No obstante, esta diferencia a favor del suelo no debe inducir a infravalorar el contenido de C de la biomasa del árbol, pues de hecho su captura es más estable y mantiene una tasa de aumento más constante, relacionada con el crecimiento de la plantación. El C orgánico del suelo es menos estable, su acumulación es más lenta y requiere prácticas de manejo que la favo-

rezcan, tales como: laboreo de conservación y no laboreo, no retirar los residuos del cultivo, etc. Por el contrario, el laboreo intensivo y la retirada de residuos conducen a tasas negativas y por tanto a la reducción del C acumulado en el suelo. Por esta razón, las plantaciones arbóreas tienen potencialmente un secuestro de C superior y más estable que los cultivos herbáceos. Un número importante de las parcelas estudiadas han registrado altos niveles de almacenamiento de C, que superan las 80 t/ha, debido a la contribución de un suelo de calidad bien manejado y a plantaciones convencionales adultas bien desarrolladas o plantaciones intensivas jóvenes bajo riego que generan un rápido crecimiento de la biomasa.

■ Tasa anual de C almacenado en las parcelas de olivar

La tasa anual de C almacenado en la biomasa de las plantaciones y en el suelo de las mismas a la profundidad de 0-30 cm, es un parámetro necesario para estimar el balance neto de C o huella de C de cada parcela, una vez descontadas las emisiones de GEI producidas por las operaciones de cultivo en la plantación.

Dicha tasa anual de C es calculada dividiendo las cantidades de C acumuladas en la biomasa y el suelo por los años de edad de la plantación en el primer caso, y por los años transcurridos entre la realización de los análisis de suelo. La tasa anual de C almacenado es un indicador imprescindible para el cálculo de la huella de C, de gran valor para evaluar el efecto que tienen las prácticas de manejo del olivar en el secuestro de C y las emisiones de GEI, y para establecer pautas de actuación que permitan mejorar el secuestro de C y mitigar la contaminación de GEI del agrosistema.

La tasa anual media de C acumulado de las parcelas estudiadas (biomasa y suelo) ha registrado un promedio de $2,24 \pm 2,2$ t/ha/año, con alta variabilidad entre

las mismas. Un buen número de parcelas ha superado los valores de 3 t/ha/año; que se consideran tasas elevadas si se comparan con los sistemas de cultivos herbáceos de secano bajo laboreo de conservación y no laboreo y sin retirada de los residuos.

■ Estimación de un modelo de predicción para la acumulación de C en la biomasa de los olivos

Con los datos de las diferentes medidas dasométricas realizadas en las 24 parcelas de olivar estudiadas y los correspondientes al tipo de variedad y fechas y marcos de plantación, se ensayaron diferentes modelos predictivos para estimar la tasa anual de acumulación de C en la biomasa de olivar. Sólo el número de árboles por hectárea, o marco de plantación, permitió ajustar un modelo lineal altamente significativo con la ecuación $y = 0,49x + 216$ ($R^2 = 0,87^{***}$) (figura 1). Con este modelo puede calcularse la tasa anual de secuestro de C a partir de la variable y (expresada en kg/ha), introduciendo el número de olivo/ha de la plantación en la variable independiente x.

El análisis de los datos según las variedades mostró diferencias entre Picual y Arbequina. En concreto, en las plantaciones intensivas del estudio el promedio de la tasa anual de secuestro de C fue 0,401 t/ha en la variedad Picual y 0,374 t/ha en Arbequina. Ello permitió estimar un coeficiente o factor de corrección de 1,1 para aplicar en el modelo, en el caso de tratarse de variedad Picual. De esta forma, el valor obtenido de la

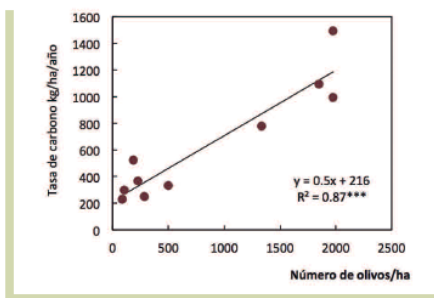
tasa anual de secuestro de C en la ecuación habrá que multiplicarlo por dicho factor (1,1) si la variedad considerada es Picual.

Similarmente, fueron analizados los datos según los sistemas de regadío y secano. El promedio de la tasa anual de secuestro de C en secano fue 0,303 t/ha y 0,374 t/ha en regadío. En consecuencia, el coeficiente o factor de corrección a aplicar al modelo para el olivar de secano es 0,8. Por tanto, como en el caso anterior, el valor obtenido de la tasa anual de secuestro de C en la ecuación habrá que multiplicarlo por el factor 0,8 si el olivar es de secano.

■ Cálculo de las emisiones de GEI de las parcelas de olivar

Como se ha explicado en la metodología, se han aplicado los factores de emisión de GEI expresados como carbono equivalente (kg CE/ha), de las operaciones de cultivo, incluidos los fertilizantes y productos fitosanitarios utilizados en cada parcela estudiada. La media de emisiones totales de las operaciones de cultivo de las parcelas del estudio ha sido 113 ± 54 kg CE/ha; con importantes diferencias entre las mismas. Estos valores de

Figura 1. Modelo predictivo de la tasa anual de acumulación de carbono en olivar, en función del número de árboles/ha.



emisión se consideran relativamente bajos en comparación con otros cultivos arbóreos e incluso en relación con algunos sistemas herbáceos. El apartado de emisiones de GEI más relevante es el riego y en algunos casos el de los fertilizantes. Estos bajos niveles de emisiones de C derivados de las operaciones de cultivo son consecuencia de los bajos inputs requeridos por el cultivo de olivar, incluso en plantaciones intensivas bajo riego. Ello es un factor muy favorable para el balance y huella de C, que se verá favorecido con un mayor flujo neto y secuestro de C.

■ Balance y huella de carbono de las parcelas de olivar

El promedio del balance y huella de C de las parcelas estudiadas ha sido $2,13 \pm 2,18$ t/ha/año de C, con gran variabilidad entre parcelas, algunas de las cuales tuvieron valores de C superiores a 4 t/ha/año y en un caso se alcanzaron las 8 t/ha/año.

En conjunto, el secuestro de C de todas las parcelas estudiadas mostró un valor positivo en todos los casos, respecto a las emisiones de CO₂ de las operaciones de cultivo.

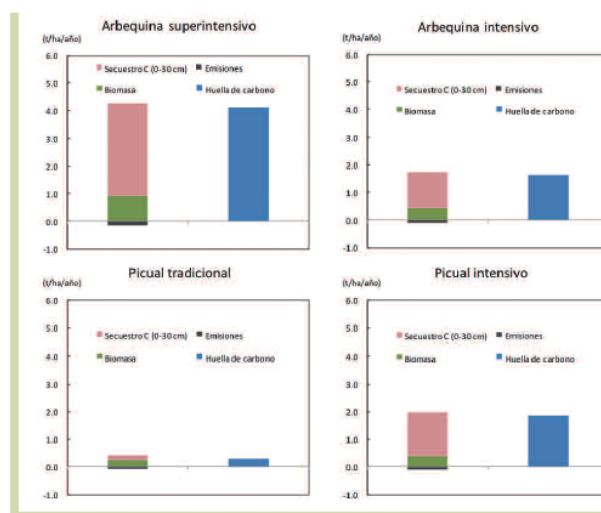
La figura 2 muestra la media de huella de C de las variedades Picual y Arbequina, según diferentes densidades de plantación. La plantación superintensiva en seto de la variedad Arbequina es la que registra un balance de C más positivo con 4,38 t/ha/año; mientras que en las plantaciones intensivas la variedad Picual con 2,56 t/ha/año de C es superior a la variedad Arbequina con 1,81 t/ha/año. Finalmente, el valor más bajo fue registrado por la plantación tradicional de la variedad Picual, con 0,28 t/ha/año de C.

Conclusiones

- El C almacenado por la biomasa de olivar registró un valor medio de $6,3 \pm 4,5$

Figura 2.

Balance y huella de C según diferentes densidades de plantación de las variedades Picual y Arbequina (datos medios expresados en t/ha/año de C).



t/ha en el conjunto de las parcelas estudiadas, alcanzándose valores máximos superiores a 15 t/ha. Las viejas plantaciones tradicionales y las plantaciones intensivas y superintensivas de más edad, fueron las que presentaron valores más altos. En las plantaciones intensivas, la variedad Picual tuvo un contenido de C almacenado notablemente más alto que la variedad Arbequina. Las plantaciones superintensivas de la variedad Arbequina exhibieron más del doble de contenido de C que las plantaciones intensivas de dicha variedad.

- En consecuencia, se constata el gran potencial de captura de C estable de las plantaciones de olivar, que ponen de manifiesto el relevante papel de las mismas como sumidero de CO₂ y en la mitigación de GEI.

- Aunque los suelos agrícolas pueden constituir un relevante reservorio de C orgánico, y por tanto un importante sumi-

dero de éste, no siempre las labores y las prácticas de manejo de suelo contribuyen a que esto sea posible. Por el contrario, el laboreo intensivo y la retirada y/o quema de los residuos pueden dar lugar a una pérdida progresiva de la materia orgánica del suelo y al deterioro de su fertilidad y de su calidad como reservorio de C. Esta situación ocurre en gran parte de las parcelas de olivar estudiadas, donde el deficiente manejo del suelo ha generado una tasa de negativa de acumulación de C orgánico en el tiempo. En este sentido, es recomendable llevar a cabo mejoras en el manejo del suelo, que incluyan métodos de laboreo de conservación, manejo e incorporación de residuos, uso de cubiertas vegetales, etc., con la finalidad de incrementar progresivamente el almacenamiento de C en el suelo y que éste contribuya de forma consistente a medio y largo plazo en la mejora del balance y huella



Medidas para determinar el volumen de un olivo.

de C del agrosistema del olivar.

- La tasa anual media de C acumulado por ha en las parcelas de olivar estudiadas ha sido $2,24 \pm 2,2$ t/ha/año; existiendo una alta variabilidad entre las mismas; siendo el factor de mayor influencia la densidad de plantación. Esta tasa que supera en algunas parcelas las 4 t/ha/año evidencia altos niveles de almacenamiento de C, en comparación con las plantaciones forestales y otras plantaciones de especies arbóreas, y con los sistemas de cultivos herbáceos bajo laboreo de conservación y sin retirada de los residuos.

- Sin duda, el resultado más relevante del estudio es el papel que el balance

claramente positivo de C del olivar puede representar en la valoración del ciclo de vida y de la huella de C del aceite de oliva como producto final. El no considerar el secuestro de C que potencialmente realiza la biomasa y el suelo de la plantación de olivar en el cálculo de la huella de C del aceite de oliva constituye un grave error metodológico que vulnera los fundamentos en que se basan los estudios del ciclo de vida y del balance de C de las materias primas agrícolas. Con ello además, se hace un flaco favor al importante sector del aceite de oliva en España en un momento decisivo de su proyección en el mercado exterior. Con la inclusión de la tasa de secuestro de C de olivar, la huella

de C del aceite de oliva sería notablemente reducida, e incluso podría llegar a ser negativa, donde las emisiones de GEI de todo el proceso agroindustrial podrían ser superadas por la captura de C del olivar.

- En nuestra opinión, no se puede poner como pretexto que las normas o metodologías establecidas para el cálculo de la huella de C no contemplan este aspecto. Los trabajos científicos realizados en los últimos años sobre la huella de C de las materias primas agrícolas ponen de manifiesto la necesidad de su consideración en el cálculo de la huella de C de los productos agroalimentarios transformados. En consecuencia, habrá que modificar o adaptar tales normas para este caso.

- Desde un punto de vista global, los más de 2,5 millones de hectáreas de superficie de olivar en España contribuyen a mitigar de forma notable las emisiones globales de GEI. En concreto, de acuerdo con los datos de nuestro estudio, la tasa anual estimada de secuestro de C (expresada como CO₂) del conjunto del olivar español supone alrededor del 6% de las emisiones totales de CO₂ equivalente según los datos estimados del Magrama para el año 2012; y el 56,1% de las emisiones correspondientes a la agricultura en el mismo período. Por el contrario, el cómputo de emisiones de GEI procedentes de las prácticas de cultivo del olivar sólo representan el 2,8% respecto a las emisiones totales de GEI de la agricultura. La relevancia de estos datos para el sector olivarero y del aceite de oliva, y su imagen y beneficio, está fuera de toda duda y debería ser tenida en cuenta en la política agroambiental española. ●

Agradecimientos

Por último, nuestro agradecimiento a Ana Grifán de Cita por su valiosa colaboración en la selección de las parcelas de olivar del estudio y a los técnicos de campo y laboratorio Joaquín Muñoz Luque, M^a Auxiliadora López-Bellido Garrido y José Muñoz Luque, por su colaboración en los trabajos de campo y laboratorio.



UNIVERSIDAD
DE
CÓRDOBA