



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

Facultad de Ciencias

GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

TRABAJO FIN DE GRADO

**Estudio de los flujos de CO₂ de
suelo en un olivar: diferencia en
las emisiones bajo copa y en la
entrecalle.**

Presentado por:

Manuel Martos Ureña

Tutor:

Prof. Dr. Enrique Pérez Sánchez-Cañete

Curso académico 2021/2022

Resumen

El presente, es un Trabajo de Fin de Grado de investigación realizado con el fin de estudiar el comportamiento temporal y espacial de los flujos de CO_2 y CH_4 , así como su relación con varios factores ambientales en el suelo de un olivar desprovisto de vegetación. Para el análisis espacial se han realizado seis jornadas de muestreo en campo, tomando mediciones tanto alrededor del olivo como en transectos desde bajo copa o dosel, hasta la entrecalle. El análisis temporal se ha realizado con un registro de datos formado por seis puntos de muestreo continuo de nueve meses.

Los resultados de este trabajo muestran que el suelo del olivar actúa como fuente de CO_2 y como sumidero de CH_4 . Se ha encontrado que por un lado el aumento de la respiración del suelo está relacionado positivamente con el aumento de temperatura y contenido de agua en el suelo, además se ha visto que esta tasa respiración no se mantiene de manera uniforme ya que los valores más altos se concentran en torno a las raíces. Por otro lado el CH_4 en condiciones aerobias es asimilado por microorganismos metanotrofos que podrían concentrarse junto a las raíces.

Índice

1. Introducción	3
2. Materiales y Metodología	4
3. Resultados	7
4. Discusión de resultados	16
5. Conclusiones del trabajo	18
6. Referencias	19

1. Introducción

La variación en la acumulación en la atmósfera de gases de efecto invernadero tales como puedan ser el dióxido de carbono (CO₂) y el metano (CH₄), es el principal mecanismo de regulación en el régimen global de temperaturas. Estos gases de efecto invernadero están involucrados en el calentamiento global terrestre debido a su efecto en la absorción e irradiación de radiación solar. Sin embargo, el balance natural del ciclo de CO₂ y CH₄, se ha visto severamente afectado por la actividad antrópica, emitiendo a la atmósfera el carbono secuestrado y limitando la capacidad de asimilación de los ecosistemas, tanto acuáticos como terrestres. A escala global, los ecosistemas terrestres fijan de la atmósfera más carbono del que emiten, con un balance neto de secuestro de carbono de $-1,9 \pm 1,1$ Gt al año (Pötnner et al. 2022). Para conservar este balance neto negativo y promover su aumento debemos estudiar los ecosistemas, las fuentes y sumideros de estos gases. En este trabajo fin de grado (TFG) se pretende comprender mejor los procesos de emisión y secuestro de carbono, así como, su implicación en un entorno de mucha importancia local como es el olivar mediterráneo.

El olivar (*Olea europaea L.*) es uno de los agroecosistemas más extensos de toda la cuenca mediterránea, llegando a cubrir 9,5 Mha y representando el 98% de todo el suelo dedicado al cultivo de olivo a nivel mundial. España supone más de dos terceras partes de toda esa producción y el 60% de la misma (1,5 Mha) se encuentra en Andalucía (Chamizo et al, 2017). En este contexto parece necesario considerar la intervención del olivar en el balance de carbono global. Otros estudios (Testi et al. 2008, Chamizo et al. 2017, Lardo et al. 2016) han calculado el balance neto de carbono en distintos olivares teniendo en cuenta tanto la implicación del suelo como de la parte aérea del olivar, sin embargo en este trabajo, el estudio se ha acotado únicamente a la intervención del suelo en este intercambio de gases con la atmósfera. El entorno antropizado del cultivo de olivo presenta tres características relevantes que definen el intercambio gaseoso que se produce en sus suelos: a) gran parte de los suelos de olivo presentan una menor actividad microbiológica causada por la poca biodiversidad en el olivar, b) los nutrientes son suministrados en el abonado, por lo tanto, no limitantes y c) el riego reduce el efecto del estrés hídrico durante el verano (Testi et al. 2008). Estas condiciones únicas del entorno de cultivo justifican que se hagan estudios específicos al olivar en vez de extrapolar conclusiones desde estudios hechos en entornos naturales u otros cultivos leñosos.

El CO₂ es un gas que en el suelo se genera principalmente por la respiración tanto de las raíces como de los microorganismos anaeróbicos y aeróbicos, la contribución de las raíces a esta emisión de carbono varía mucho (entre un 10% y un 95%) dependiendo del tipo de cultivo, la estación o la edad del cultivo (Oertel et al. 2016). Con una contribución mucho menor, otra fuente de CO₂ en el suelo es la degradación no biótica de la materia orgánica, ya sea por la luz (fotodegradación) o por la propia degradación química de las especies (Chamizo et al. 2017). Estas emisiones de CO₂ sumadas a las que se producen en la parte de la vegetación aérea del olivar, se consideran como la respiración del ecosistema en su conjunto. Para obtener un balance neto del flujo de CO₂ a nivel de ecosistema del olivar se requeriría además conocer la cantidad de CO₂ que se asimila por la fotosíntesis producida en la parte aérea. Con respecto al metano, el proceso que lo produce de forma natural se conoce como metanogénesis y solo se produce en condiciones estrictamente anaerobias, mientras que el consumo de CH₄ se produce por microorganismos metanotrofos que oxidan en condiciones aerobias este gas y lo convierten en CO₂ (Oertel et al. 2016). El balance entre los mecanismos de consumo y producción de estos gases determinan que los ecosistemas se comporten como sumideros o fuentes.

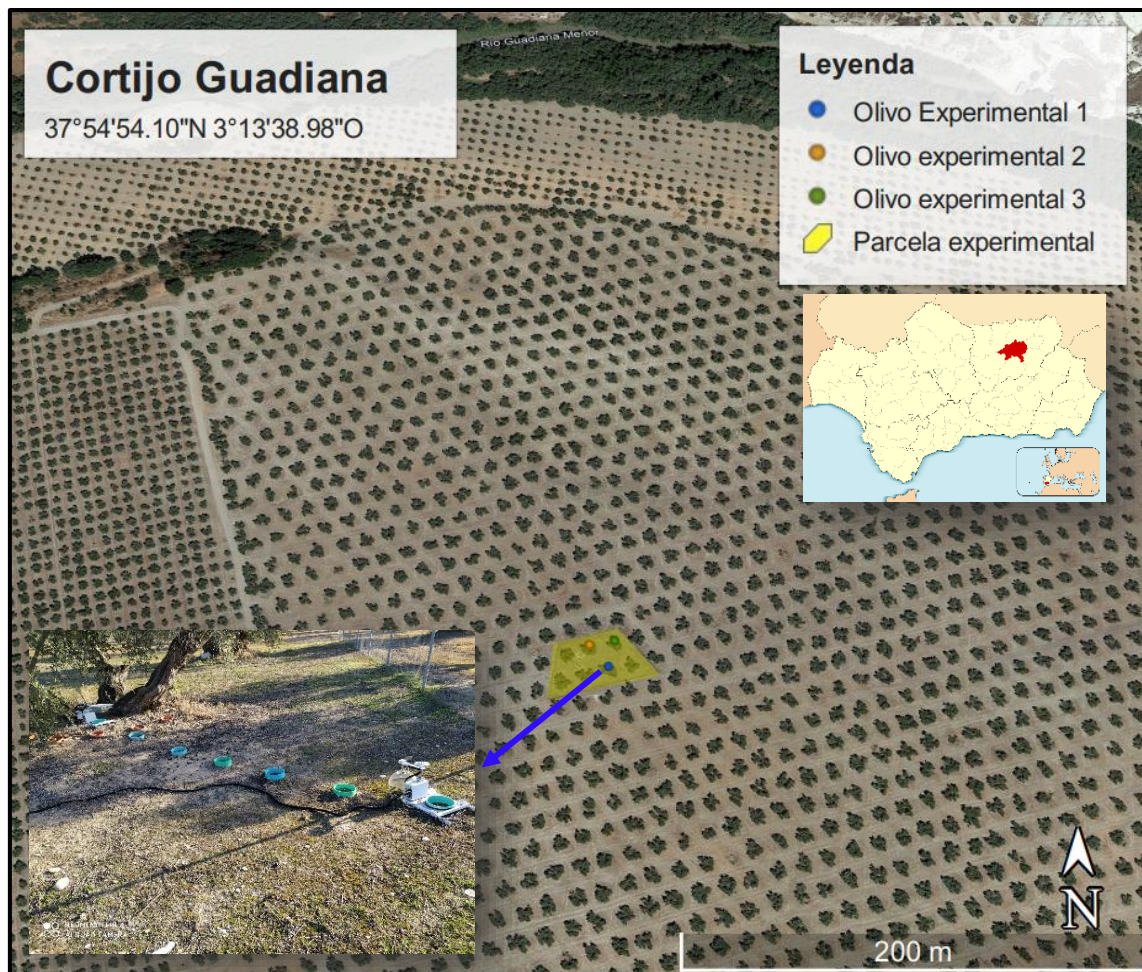
Este equilibrio fuente/sumidero se ve claramente influenciado por diferentes factores ambientales como: disponibilidad de nutrientes, temperatura del suelo, humedad del suelo, vegetación de cobertura y uso o manejo del suelo. El principal objetivo de este TFG es estudiar el comportamiento temporal de los flujos de CO₂ del suelo en un olivar desprovisto de vegetación. Se estudiarán los patrones diarios en los flujos de CO₂ tanto en la calle del olivar como bajo el

dosel arbóreo. Además, se estudiará la distribución espacial de los flujos de CO₂ y CH₄ alrededor del olivo y en transectos desde bajo copa hasta la entrecalle. Para ello, se han tomado mediciones de flujos de CO₂ y CH₄ mediante un sistema de cámaras de suelo automáticas, en combinación con un sistema de cámaras portátil. Así mismo, se han registrado valores tanto de temperatura como del contenido de agua en el suelo con el fin de poder establecer relaciones entre estos factores ambientales y los flujos de suelo CO₂ y CH₄.

2. Materiales y Metodología

2.1 Localización

Este TFG ha sido realizado en la zona de experimentación de la universidad de Granada en el “Cortijo Guadiana” un olivar en regadío de la variedad Arbequina ocupando una extensión de 1500 ha, localizado a 16 km al sureste del municipio de Úbeda, Jaén. La parcela experimental utilizada en este TFG se encuentra a 368 m sobre el nivel del mar ocupando una extensión de 0,12 ha en terreno llano, bajo un clima Mediterráneo con valores de temperatura media anual en torno a los 16°C, una precipitación media anual de 373 mm y una radiación solar media de 16,52 MJ /m² día en los últimos 5 años, con vientos predominantes en la dirección Noroeste durante el día y sureste en la noche, según datos de la estación de Úbeda, perteneciente a la Red de Información Agroclimática de Andalucía (RIA). Se trata de un olivar maduro con olivos de 85 años con espaciado entre olivo de 7 x 7 metros y con una altura aproximada de 4 metros. El suelo presente en este olivar tiene un contenido de materia orgánica del 2,9% en los primeros 5 cm de suelo y 2,4% hasta los 15 cm. La textura de este suelo tiene un 24% de arena, 32% de limo y 44% de arcilla. Los olivos de esta parcela cuentan con un riego por goteo de 32L/h durante 5 horas, 3 noches por semana entre los meses de marzo y octubre, además durante el experimento se han hecho aplicaciones de herbicida glifosato en la parcela experimental, para evitar que la vegetación temporal interfiriese con la medición concreta del papel del olivo en los flujos de CO₂ y CH₄. Mas información sobre el sitio experimental e instrumentación instalada puede encontrarse en Chamizo et al. 2017 y Aguirre García et al. 2021.



***Imagen 1:** Localización de la parcela experimental donde se encuentran los 3 olivos de estudio y ampliación de la disposición del instrumental de muestreo en el olivo 1. Imagen de elaboración propia obtenida y editada en Google Earth.*

2.2 Mediciones en continuo

Las mediciones en continuo de los flujos de CO_2 en olivar usadas en este TFG, son parte de una base de datos que se está creando por parte de los departamentos de física aplicada y ecología de la UGR. El diseño experimental consiste en tener mediciones cada media hora en cada uno de los seis puntos de muestreo continuo, marcados con anillos de plástico que delimitan una porción de suelo de $317,8 \text{ cm}^2$, tres situados en los doseles de los olivos estudiados y otros tres situados en las correspondientes calles del olivar. Para este TFG se han utilizado datos que comienzan en Junio de 2021 y terminan en febrero de 2022. Estos datos han sido obtenidos con cámaras del fabricante Licor de medición de flujo de gases, transparentes 8200-104C y opacas 8200-104; la transparencia u opacidad de las cámaras no influye en los propósitos de este TFG y su funcionamiento es el mismo. Estas cámaras a la hora de realizar la medición se cierran autónomamente sobre el anillo creando una estancia sellada entre el interior de la cámara y el suelo debajo del anillo. El aire del interior de la cámara es entonces bombeado y a la vez repuesto, estableciendo un circuito continuo de aire a través de unos tubos hasta el analizador de gases (LI-8100). Este es un analizador de gases por absorción de luz infrarroja, el flujo de aire pasa de forma estable por el sensor que recoge valores en tiempo real. Las cámaras a su vez están conectadas a

un sistema multiplexor LI-8250 que permite el manejo y almacenado simultáneo de los datos de las seis cámaras de la parcela experimental.



Imagen 2: Fotografía tomada en la parcela experimental de la cámara 8200-104C usadas en la medición en continuo.

Este experimento ha permitido obtener una amplia base (06/21 – 02/22) de datos del flujo de CO_2 en esta parcela, así como valores de temperatura y humedad en el suelo. Para manejar esta extensa cantidad de datos se ha recurrido a la función de tablas dinámicas en Excel, que permite incorporar filtros por categorías y el cálculo rápido de promedios y desviaciones estándar, haciendo el manejo de la base mucho más eficiente. El procesado de estos datos comienza por el filtrado por columnas de valores anómalos de temperatura, humedad o flujo debidos a fallos en la medición. La base de datos que se usó en este TFG incorpora categorías de clasificación por horas que han permitido realizar un análisis tanto de la evolución en un día promedio de las variables como de la serie temporal completa, pudiendo dividirla en estaciones, meses o días. Haciendo uso de estas herramientas digitales se han realizado los gráficos presentados en el apartado de resultados correspondientes a las mediciones en continuo.

2.3 Mediciones in situ

Las mediciones en campo fueron realizadas en un total de seis salidas a la parcela experimental, tres de los días fueron para medir la sección horizontal entre dosel y la calle del olivo y otros tres para medir la sección radial del dosel en torno a cada olivo. Para el transecto horizontal se han dispuesto cinco puntos de muestreo delimitados por anillos equidistantes, entre los puntos de dosel y calle utilizados en el muestreo anterior. La sección radial se ha compuesto con un total de dieciséis puntos en torno al dosel de cada uno de los tres olivos. Con respecto a la medición en sí, antes de empezar se debe de comprobar que en los anillos no ha crecido vegetación oportunista (estrategas de la “r”) o quitarla alterando el suelo lo mínimo posible. La medida de los flujos de suelo de CO_2 y CH_4 se ha realizado con una versión portátil de las cámaras 8200-01S y del analizador de gases LI-7810, el funcionamiento de este equipo es exactamente el mismo que el instrumental en continuo. El manejo de la cámara se realiza a través de una conexión WIFI con el teléfono móvil y una vez realizada la medición el dato se registra en un fichero .csv para luego ser descargado. A diferencia de las cámaras fijas, este instrumento mide tanto CO_2 como CH_4 con el analizador de gases, mientras que los valores de temperatura y contenido de agua en el suelo se recogen con una sonda que se clava directamente en el suelo desde la cámara portátil.



Imagen 3: Fotografía tomada en la parcela experimental del instrumental portátil usado en la medición *in situ*, el equipo se compone de la cámara 8200-01S, el circuito de aire cerrado y el analizador de gases LI-7810.

Una vez descargado el fichero se ha usado el programa Soilfluxpro, este programa te permite seleccionar las categorías que aportan la información recogida en cada punto de muestreo, así como recalcular algunos valores de flujo en los que se han producido fallos en la medición, ya sea porque la sonda de humedad y temperatura no diera valores coherentes o por algún problema en el sellado de la cámara a la hora de realizar la medición. Tras esta primera revisión de los resultados, estos se han pasado a Excel y usando la función tabla dinámica se han tomado las categorías necesarias para la realización de los gráficos presentados en el apartado Resultados.

3. Resultados

En este apartado se expondrán los datos obtenidos por las diferentes mediciones, realizadas *in situ* y en continuo con el instrumental anteriormente descrito. Las mediciones en continuo realizadas con tres cámaras transparentes 8200-104C y otras tres opacas 8200-104 y el analizador Li-8100, han estado recogiendo datos de flujo CO₂, temperatura y contenido volumétrico de agua en el suelo en los nueve meses comprendidos entre Junio y Febrero de 2021/2022, tanto a nivel de calle como en los doseles de los olivos de la parcela experimental. Mientras que las mediciones *in situ* se realizaron con la versión portátil de cámara 8200-01S y el analizador de gases LI-7810 en seis salidas a la parcela experimental para tomar datos tanto de la distribución horizontal entre los valores de calle y el dosel, como radial en el dosel del olivo, tanto del flujo de CO₂ y CH₄ como de los valores de temperatura y contenido de agua en el suelo.

3.1 Datos en continuo

La serie de datos diaria se compone del promedio de las mediciones realizadas automáticamente cada media hora por el instrumental tanto en calle como en dosel. Las tendencias de la calle y el dosel son claramente distintas, en el dosel hay un mayor flujo positivo de CO₂ y presenta una mayor desviación estándar que los obtenidos en calle (Gráfico 1). La temperatura del suelo varía ligeramente entre calle y dosel dependiendo de la estación, durante el verano y principios del otoño en la calle se mantiene una temperatura más alta debido a la alta irradiación solar en esos meses en un suelo desnudo, mientras que en los meses de finales de otoño e invierno el suelo más caliente se encuentra bajo el dosel del olivo (Gráfico 2). Con respecto a la variabilidad en la cantidad de agua contenida en el suelo, obtenemos un patrón escalonado que empieza a partir de los primeros días de septiembre, este aumento repentino en la cantidad de agua en el suelo viene

seguido de un lento descenso hasta que este se produce de nuevo un aumento debido a las lluvias (Gráfico 3). Con respecto a los máximos y mínimos que encontramos en estas gráficas cabe destacar que el pico de emisión de CO₂ se encuentra alineado con los primeros días de septiembre coincidiendo con un episodio de aumento repentino en la cantidad de agua en el suelo y con las altas temperaturas propias de la estación.

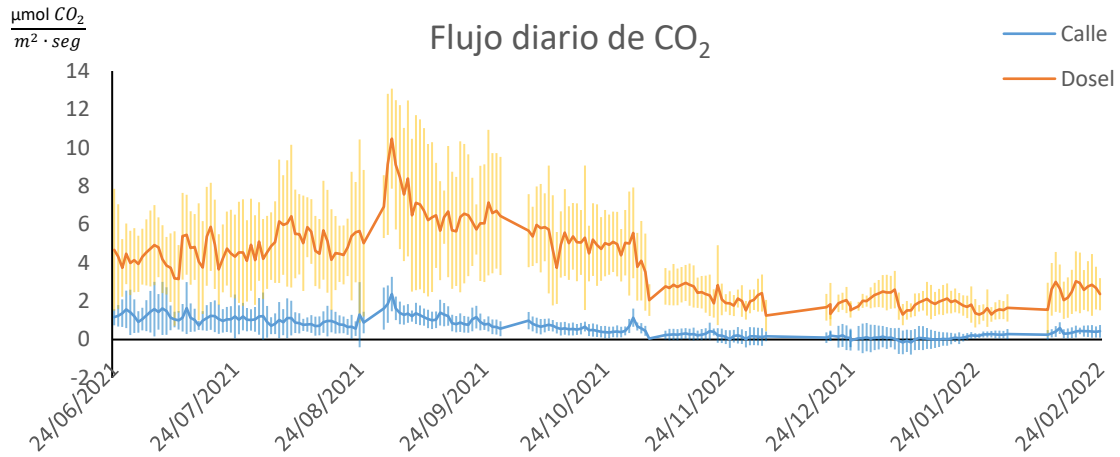


Gráfico 1: Serie diaria del flujo de CO₂ tanto en calle como en dosel. Las barras de error corresponden a la desviación estándar de los datos promediados.

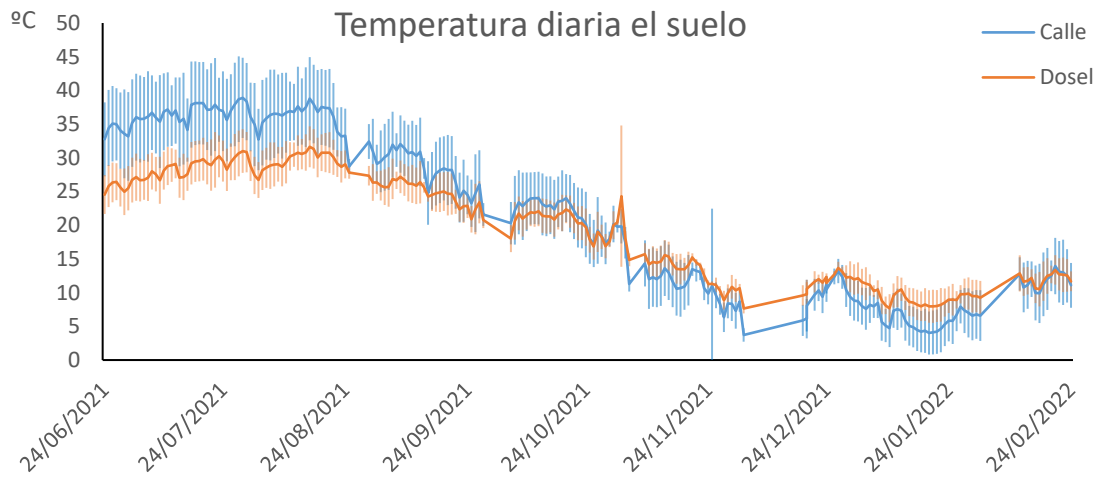


Gráfico 2: Serie diaria del flujo de la temperatura del suelo tanto en calle como en dosel. Las barras de error corresponden a la desviación estándar de los datos promediados.

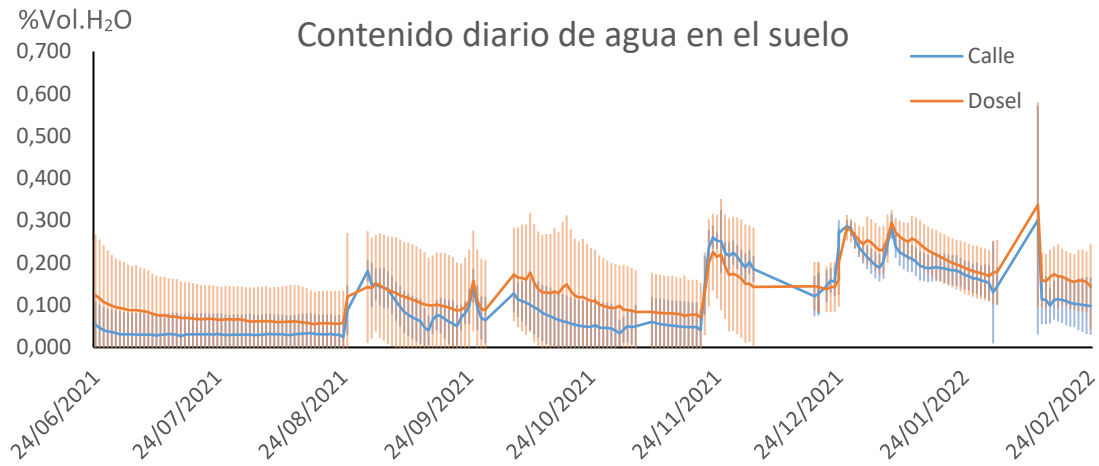


Gráfico 3: Serie diaria del contenido de agua en el suelo expresada como $\frac{\text{Vol. H}_2\text{O}}{\text{Vol. Total suelo}} * 100$

Los gráficos de los datos sobre la variabilidad mensual del flujo de CO₂, temperatura y contenido de agua, se han hecho promediando y filtrando por meses la serie de datos diaria. El Gráfico 4 muestra el flujo de CO₂ promedio para cada mes durante toda la serie de datos, los valores máximos y mínimos obtenidos para calle son 1,467 y 0,093 $\mu\text{mol de CO}_2 * \text{m}^{-2} * \text{s}^{-1}$; mientras que para el dosel los valores varían entre 6,822 y 1,765 $\mu\text{mol de CO}_2 * \text{m}^{-2} * \text{s}^{-1}$. Tanto para calle como para dosel los valores más altos de emisión de CO₂, se alcanzan en los meses de verano y en ambos se puede apreciar un cambio de tendencia con el inicio del otoño en octubre. La distribución de temperaturas en el gráfico 5 se muestra que tanto calle como dosel siguen una tendencia muy similar y esperable, teniendo en cuenta la exposición solar de cada sitio. Se han obtenido valores máximos en los meses de julio y agosto y mínimos entre diciembre y enero. Por último, en la distribución por meses del contenido volumétrico de agua en el suelo (Gráfico 6) los máximos están en los meses de invierno y mínimos en verano, inversamente a la gráfica obtenida para la temperatura.

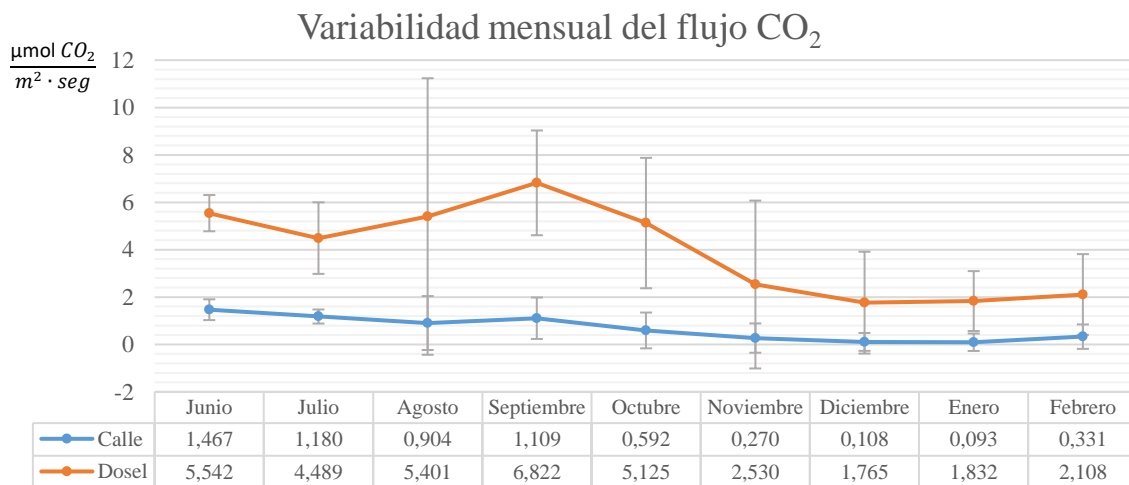


Gráfico 4: Promedios mensuales del flujo de CO₂ y su desviación estándar recogidos en toda la serie temporal diaria (2021-2022).

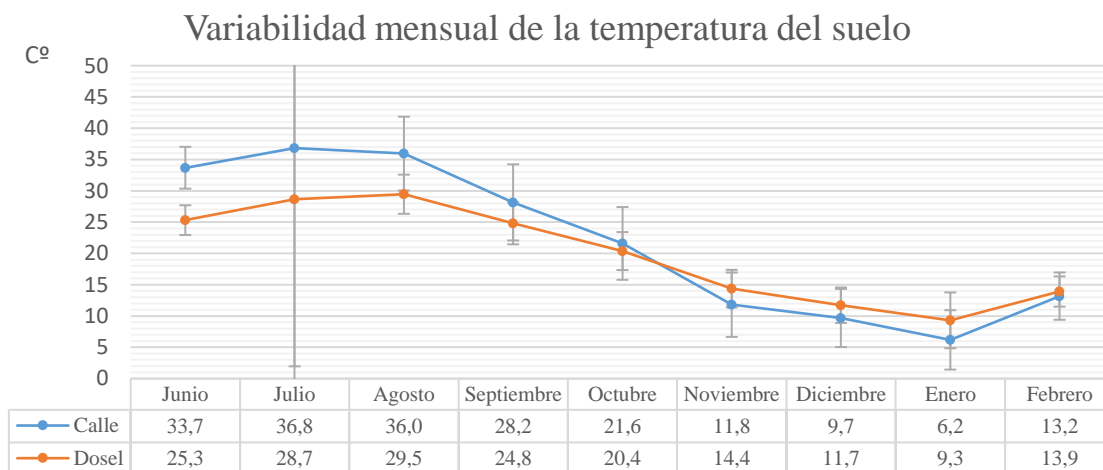


Gráfico 5: Promedios mensuales de la temperatura del suelo y su desviación estándar recogidos en toda la serie temporal diaria.

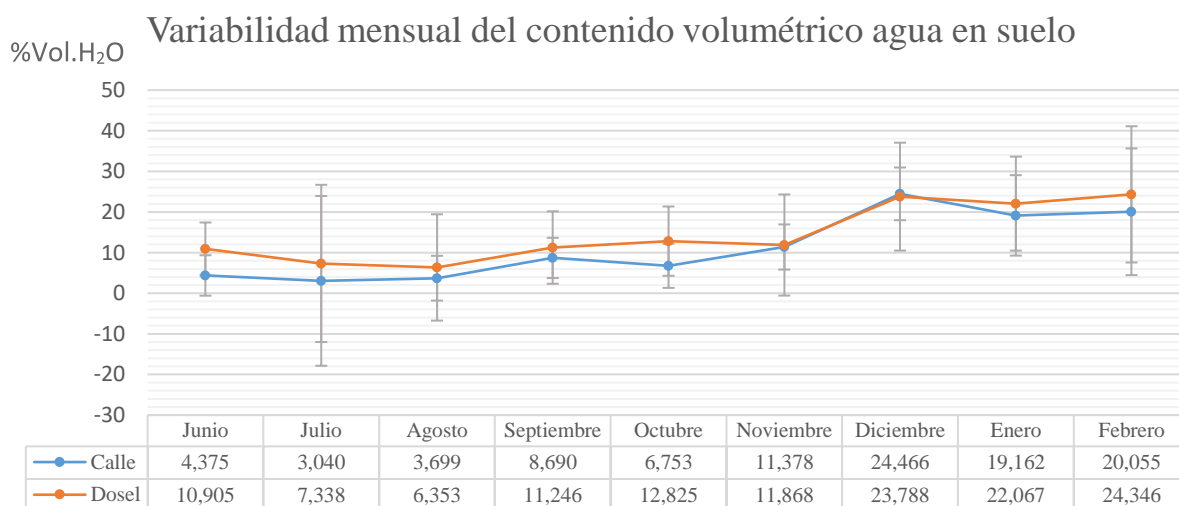


Gráfico 6: Promedios mensuales del contenido porcentual volumétrico de agua en el suelo y su desviación estándar ($\frac{\text{Vol. H}_2\text{O}}{\text{Vol. Total suelo}} * 100$).

Los gráficos 7, 8 y 9 muestran la evolución diaria del flujo de CO₂, temperatura y contenido de agua en el suelo. En estos gráficos tenemos un valor para cada media hora promedio de los 3 olivos de estudio y usando la serie temporal completa, filtrando por la hora en la que se tomó la medición automáticamente tanto para calle como para dosel. Los resultados que se han obtenido con respecto al flujo de CO₂ muestran que la emisión durante las 19:30 y las 7:30 es sensiblemente más baja y estable que la que se produce durante las horas del día, siendo esta diferencia más notable para el dosel que para la calle. El momento del día donde se encuentran los flujos máximos de CO₂ emitidos a la atmosfera son entre las 13:30 y las 15:30 siendo este para dosel de $5,32 \pm 3,74 \mu\text{mol} * \text{m}^{-2} * \text{s}^{-1}$ y para calle $0,96 \pm 1,15 \mu\text{mol} * \text{m}^{-2} * \text{s}^{-1}$. El patrón de temperatura a lo largo del día en la calle y el dosel tiene un perfil muy similar, sin embargo, en el dosel ($19,32 \pm 1,69$ °C) la distribución se centra más en torno a la media que en la calle ($19,45 \pm 3,89$ °C) y a excepción de las horas centrales del día, los valores de temperatura del suelo son superiores. En cuanto al contenido de agua en el suelo se puede apreciar que a lo largo del día la cantidad de agua que permanece en el suelo es prácticamente constante tanto en calle como en dosel, sin embargo en el suelo bajo el dosel hay más agua que en la calle.

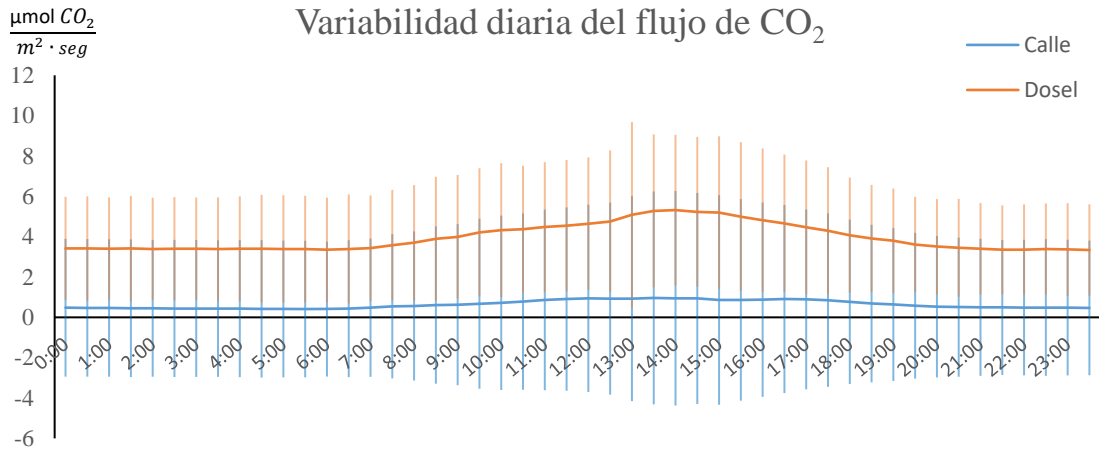


Gráfico 7: Variabilidad diaria del flujo de CO₂ tanto para calle como dosel con los datos de la serie completa. Calle media=0,64 ± 0,20 μmol * m⁻² * s⁻¹; Dosel media=3,95 ± 0,66 μmol * m⁻² * s⁻¹

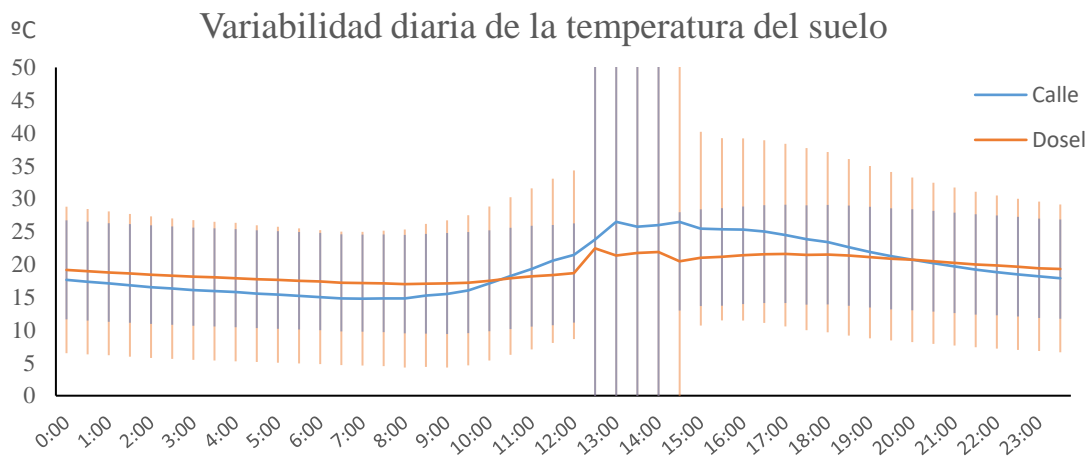


Gráfico 8: Variabilidad diaria de la temperatura del suelo con los datos de la serie completa

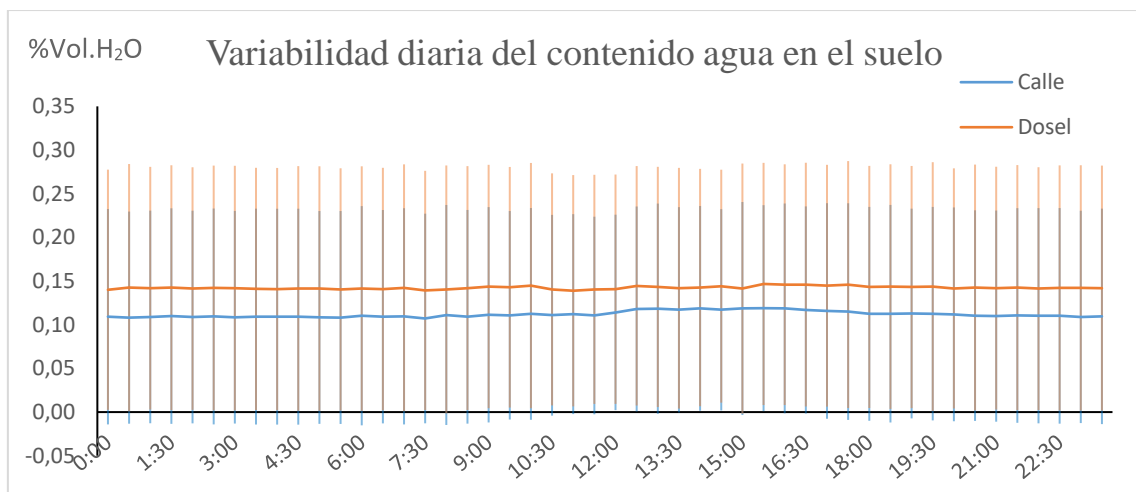


Gráfico 9: Variabilidad diaria del contenido porcentual volumétrico de agua en el suelo con los datos de la serie completa $\frac{\text{Vol. H}_2\text{O}}{\text{Vol. Total suelo}} * 100$

Con el fin de poder analizar la posible relación entre las variables de estudio, se ha realizado un gráfico combinando las variables anteriormente descritas tanto para la calle como para el dosel.

En ambos gráficos 10 y 11 se puede observar un cambio en la tendencia del flujo de CO₂ (6:00) y de la temperatura (8:00), incrementando desde esa hora hasta alcanzar su máximo en las horas centrales del día (12:00-15:00), para después volver a decrecer durante la noche.

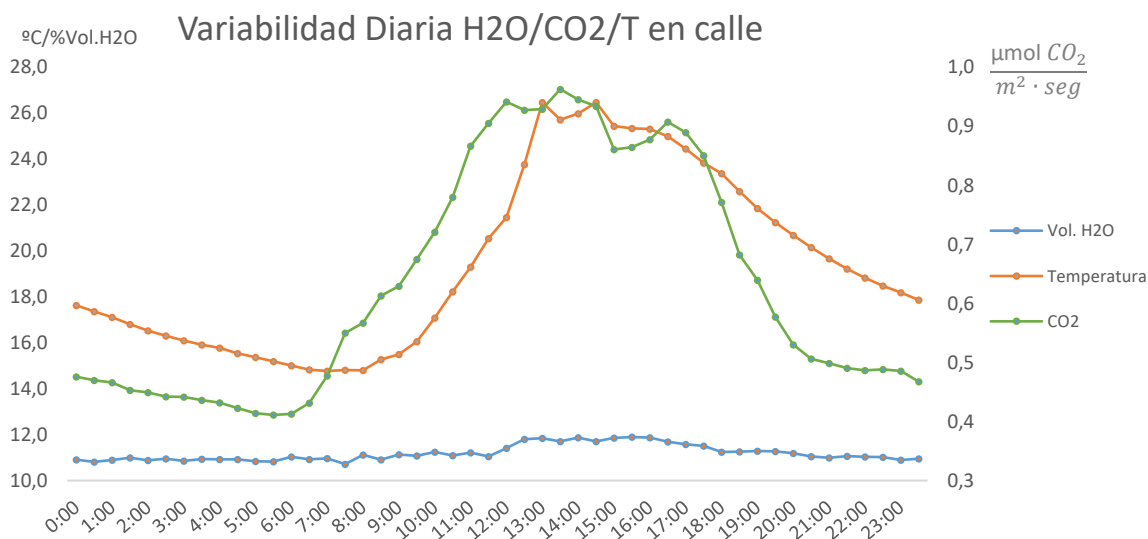


Gráfico 10: Gráfico combinando la variación del contenido de agua en el suelo, el flujo de CO₂ y la temperatura a lo largo de un día promedio para la calle

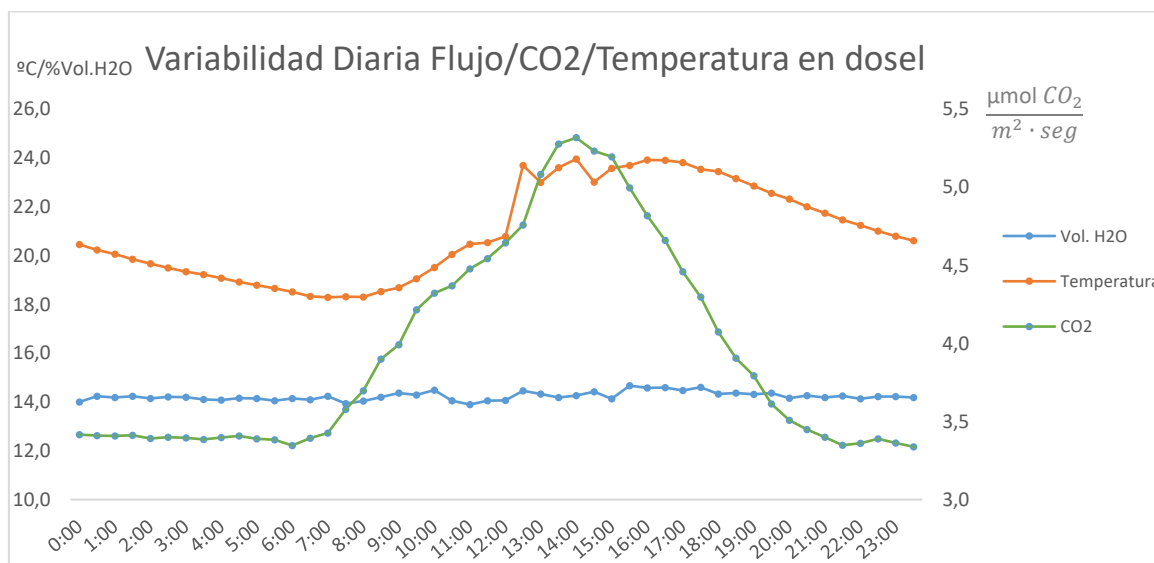


Gráfico 11: Gráfico combinando la variación del contenido de agua en el suelo, el flujo de CO₂ y la temperatura a lo largo de un día promedio para el dosel

Para finalizar el procesado que se ha realizado a los datos tomados por el sistema de cámaras en continuo, se ha calculado un balance mensual de los flujos de CO₂, diferenciando entre la aportación a la atmosfera de la calle y del dosel del olivo. En este gráfico de barras se puede observar fácilmente que la emisión de CO₂ en el dosel es mucho mayor a la que se produce en la calle. Además se pueden distinguir dos intervalos: un primer intervalo de mayor emisión coincidiendo con el verano y el inicio del otoño y un segundo periodo de menos. El mes de mayor emisión es septiembre, emitiéndose a la atmosfera 212,18 ± 68,76 g/m² de CO₂ en el dosel y 34,48 ± 27,23 g/m² de CO₂ en la calle, a lo largo de los 9 meses muestreados, en la calle se han emitido 188,29 ± 23,46 g/m² de CO₂ mientras que en el dosel se han emitido 1107,71 ± 93,67 g/m².

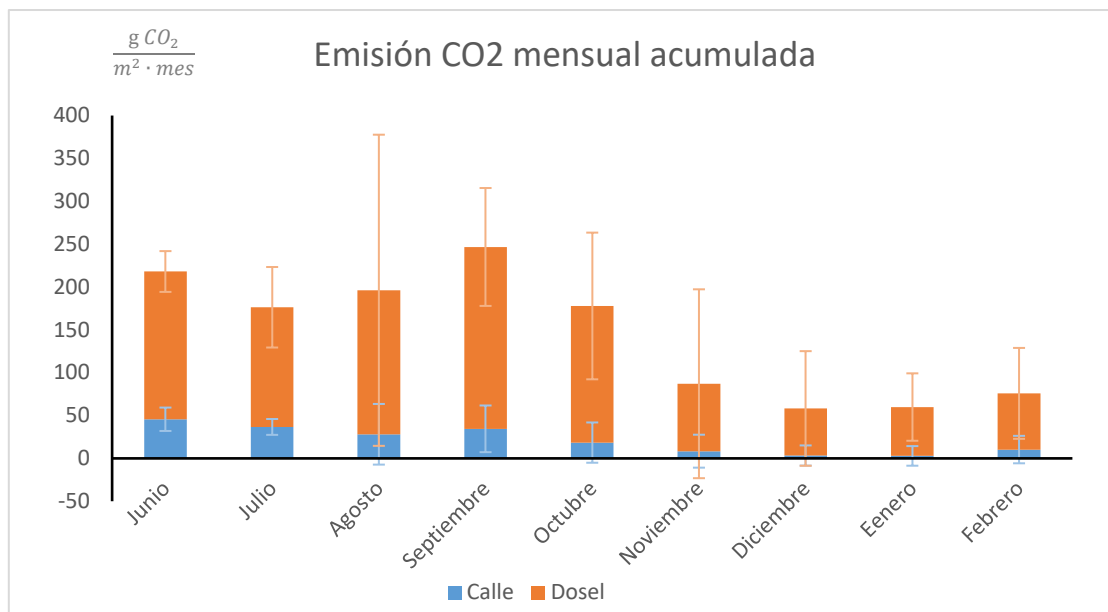


Gráfico 12: Gramos de CO₂ acumulados por metro cuadrado en un mes, diferenciando entre la calle y el dosel de los olivos estudiados.

3.2 Datos tomados in situ durante 6 campañas

Los datos tomados en campo se han recogido para analizar la distribución del flujo de CO₂ y CH₄, así como la temperatura y el contenido de agua en el suelo tanto para un transecto horizontal (dosel-calle), como para un transecto radial en torno al dosel del árbol. En cada gráfico se puede ver una línea de color que representa el promedio de los tres árboles en la parcela de estudio, esta línea conecta los puntos de muestreo cuyo valor es el promedio de 3 días de muestreo para cada punto. Además es interesante tener en cuenta que tanto la posición 1 como la 7 corresponden a los mismos puntos de muestreo que el dosel y la calle del muestreo continuo. El muestreo del transecto horizontal se realizó en los días: 05/11/21, 18/11/21 y terminó el 03/12/21; el muestreo del transecto radial se realizó en los días 16/12/21, 31/01/22 y 18/02/22.

Comenzando con los resultados para la sección horizontal, en el gráfico 13 podemos ver que el flujo de CO₂ es positivo, indicando que se está emitiendo a la atmósfera desde el suelo. La tendencia es que cuanto más se aleja el punto de muestreo con respecto al dosel del árbol, menor es la cantidad de CO₂ emitido, variando en un rango entre los 1,09 $\mu\text{mol} * \text{m}^{-2} * \text{s}^{-1}$ y los 0,26 $\mu\text{mol} * \text{m}^{-2} * \text{s}^{-1}$. Una tendencia parecida a la que se puede observar en el gráfico 14 relativo al flujo de CH₄, en este gráfico los valores de flujo son negativos por lo que se está fijando CH₄ atmosférico en el suelo. En la figura se puede observar que la cantidad de CH₄ eliminado de la atmósfera desciende rápidamente con respecto a la distancia del dosel, teniendo el máximo en el primer punto de muestreo -0,33 $\mu\text{mol} * \text{m}^{-2} * \text{s}^{-1}$. Los resultados en cuanto a la temperatura del suelo en la sección horizontal muestran que la temperatura máxima 18,22°C se alcanza en torno a la mitad del transecto para luego decrecer a los 15,5°C. Por último los datos para el agua contenida en el suelo muestran valores mínimos cercanos al dosel y máximos en la calle.

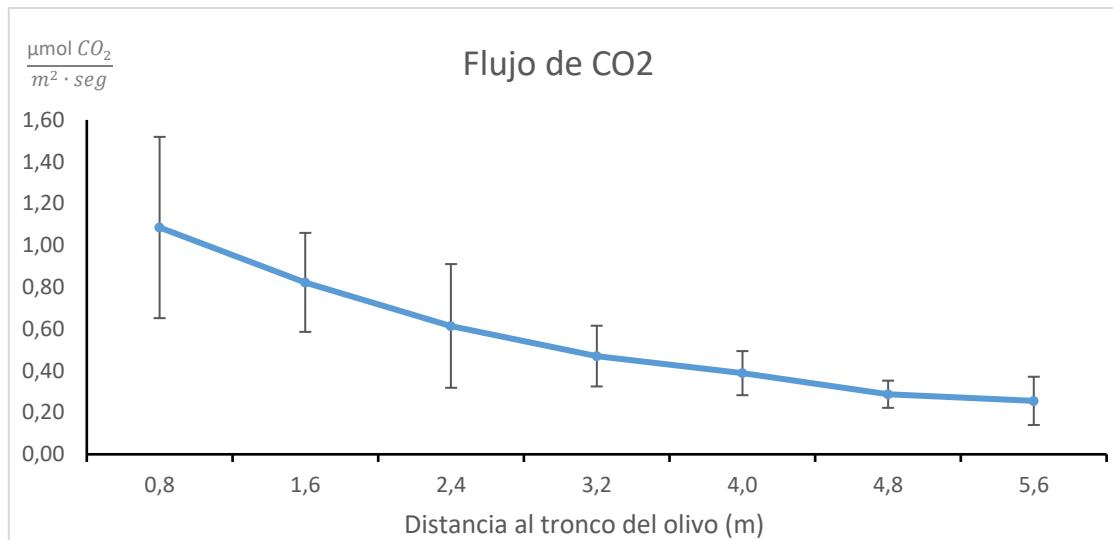


Gráfico 13: Representación gráfica de la variación del flujo de CO₂ con la distancia entre el dosel y la calle en la parcela de estudio.

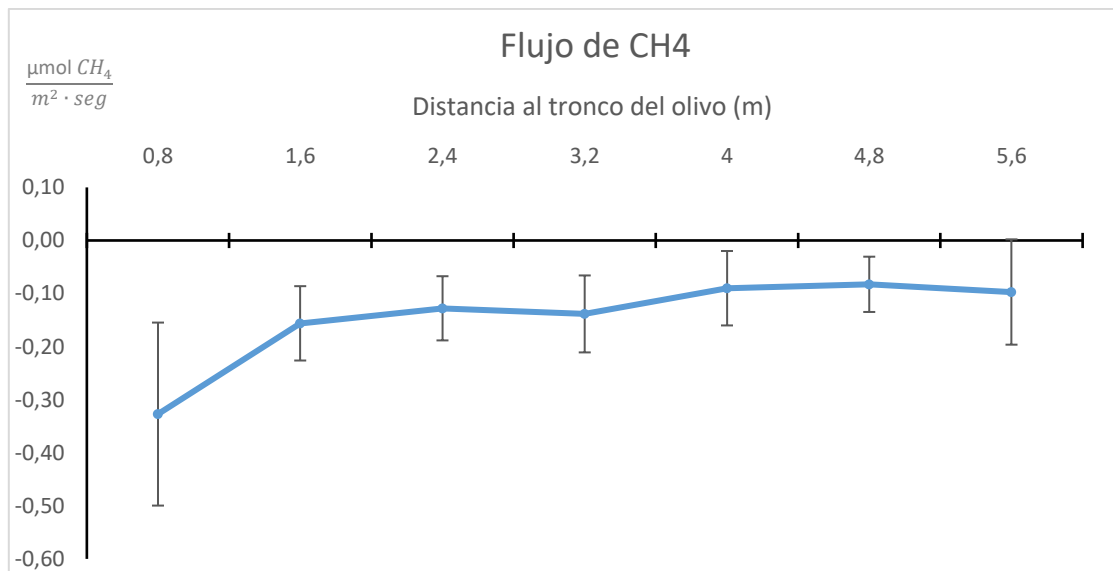


Gráfico 14: Variación del flujo de CH₄ con la distancia entre el dosel y la calle en la parcela experimental.

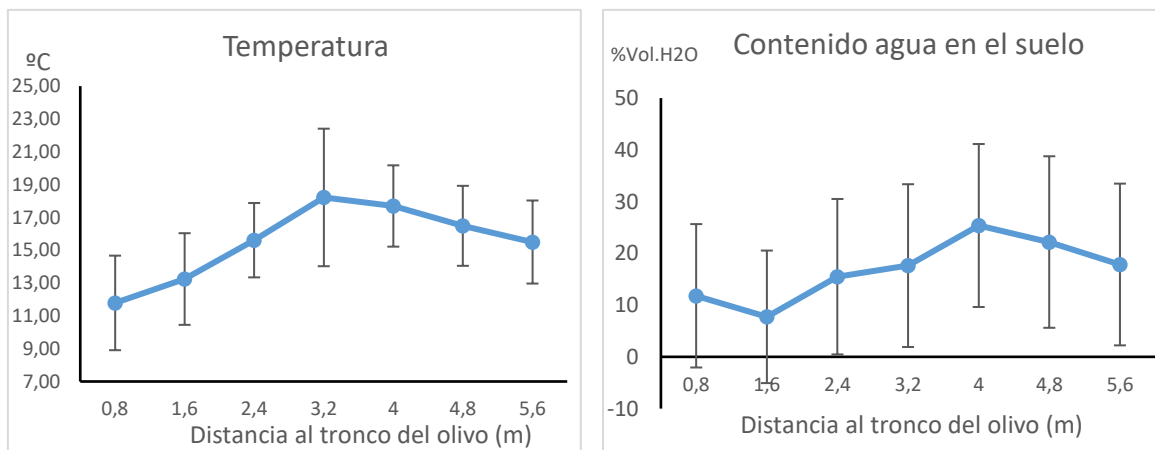


Gráfico 15: Variación de la temperatura (izquierda) y el contenido de agua en el suelo (derecha) con respecto a la distancia entre el dosel y la calle en la parcela experimental.

A continuación, en este apartado de resultados se van a presentar los datos sobre la disposición radial tanto de los flujos de CO_2 y CH_4 como de temperatura y agua del suelo, para estos resultados en concreto se ha decidido distinguir entre cada uno de los olivos monitorizados representados por cada una de las líneas de color. El gráfico 16 de la distribución de CO_2 en la circunferencia que rodea al dosel del olivo se puede observar diferencias entre el patrón de los 3 olivos, siendo el número 1 el que más dióxido de carbono emite con valores más altos de emisión al Oeste del olivo. En cuanto al CH_4 en el gráfico 17 se puede observar más similitud entre los 3 olivos del patrón de distribución en la fijación de este gas invernadero, a excepción de unos picos de absorción en el Sureste para el olivo 3 y Sur para el olivo 1. Para terminar este apartado tenemos la distribución de temperatura y contenido de agua en el suelo, para este último se puede observar que es un patrón que oscila mucho con respecto al punto de muestreo sin seguir un orden concreto, sin embargo las temperaturas si siguen un perfil radial muy parecido y estable en los 3 olivos con la salvedad de que las temperaturas medias en cada uno son diferentes (probablemente debido a la hora a la que se hicieron las mediciones).

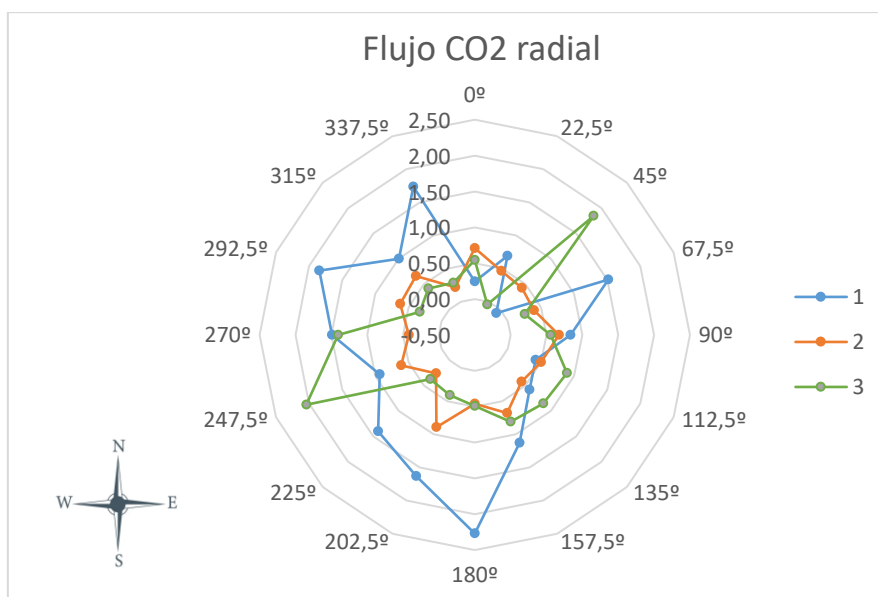


Gráfico 16: Gráfico radial del flujo de CO_2 en el dosel.

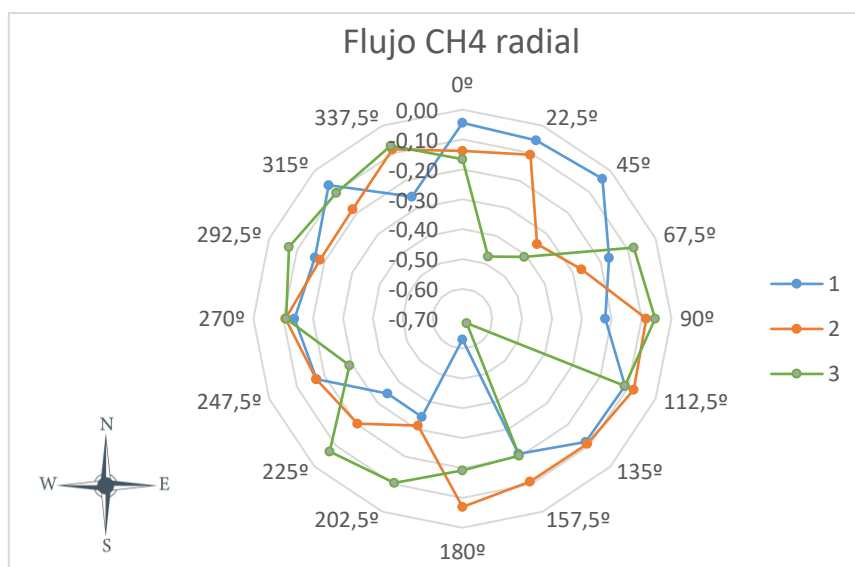
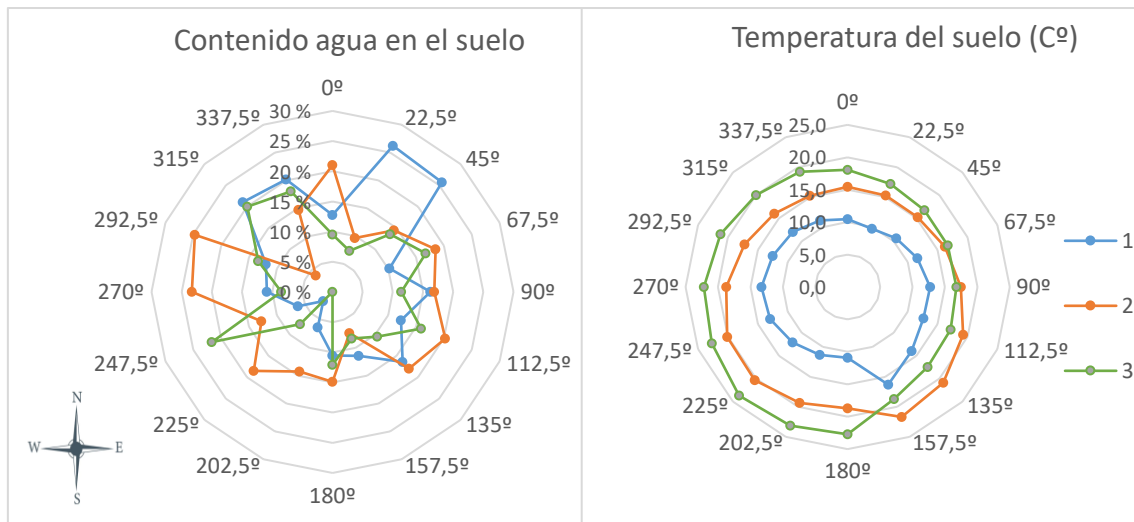


Gráfico 17: Gráfico radial del flujo de CH_4 en el dosel de los olivos.



Gráficos 18: Representaciones gráficas radiales del contenido de agua en el suelo (izquierda) y la temperatura en el dosel de los olivos estudiados (derecha).

4. Discusión de Resultados

4.1 Relación de los flujos de CO₂ con la temperatura y el contenido de agua en el suelo

Las altas temperaturas normalmente implican una mayor tasa de respiración por parte de los microorganismos y raíces. Sin embargo, en los datos continuos se observa que en los meses de Junio, Julio y Agosto; los más calurosos, se emite menos CO₂ que en el mes de Septiembre, siendo este último un mes cálido pero no tanto como los anteriores. Esto puede ser debido a que temperaturas extremas reducen la actividad de ciertos microorganismos disminuyendo la respiración total producida en el suelo y con ello la cantidad de CO₂ emitido (*Chamizo et al. 2017*). Estudios como *Testi et al. 2008* no encontraron relación alguna entre la temperatura y el flujo de CO₂ pero esto se explica a que las mediciones se realizaron en días de verano donde las temperaturas eran tan extremas que interfieren con la propia medición, tales posibilidades no se pueden descartar de los datos en continuo aquí presentados para los meses de verano. Aun así los resultados a partir de las mediciones en continuo de este estudio muestran una fuerte correlación entre la temperatura y el flujo de CO₂, visible tanto a lo largo de los meses estudiados (*Gráficos 1 y 2*), como a lo largo de un día promedio (*Gráficos 4 y 5*). Esta correlación se ve acentuada por la falta de cobertura vegetal, ya que la exposición solar calienta más rápido la capa superficial del suelo donde se han realizado las mediciones con la sonda de temperatura. En *Lardo et al. 2016* se realizaron mediciones similares a las de este TFG con una metodología diferente, sus resultados muestran una débil correlación entre el flujo de CO₂ y la temperatura, los investigadores de este estudio justifican esto con la presencia de cobertura vegetal de pasto. En este trabajo se ha descartado la cobertura vegetal temporal como variable que pudiera afectar a la medición, además se dispone de un amplio rango temporal de mediciones habiéndose podido descartar los días con temperaturas extremas.

Por otro lado, el contenido de agua en el suelo tiene una influencia clara en la respiración que se produce en el suelo. Se ha estudiado que ha ciertos rangos de humedad y en combinación con una temperatura alta (25°C) se producen las condiciones ideales para un máximo en la cantidad de CO₂ emitido del suelo (*Curtin et al. 2012*). En condiciones de clima semiárido como el presente en el olivar de estudio, el contenido de agua en el suelo es determinado por pulsos de lluvia, tras estos se produce un incremento significativo de la respiración en el suelo (*Lopez-Ballesteros et al. 2016*). Un tercer factor a tener en cuenta a la hora de determinar el efecto del agua del suelo, son las zonas en torno al dosel del árbol donde se acumula esta agua, ya que será ahí donde haya

una mayor concentración de raíces y microorganismos asociados a estas, aumentando la tasa de respiración (*Testi et al 2008*). Para producirse respiración las condiciones han de ser aerobias por tanto, una buena difusión del oxígeno a través de los poros del suelo es indicativo de una mayor cantidad de CO₂ emitido. Un factor determinante en la difusión de gases por los poros del suelo es la cantidad de estos poros ocupados por agua. El olivar de estudio se encuentra en un entorno semiárido con un régimen de precipitaciones discontinuo, condiciones que favorecen una buena difusión de gases a través del suelo.

En las mediciones en continuo de la serie diaria, se ha podido observar que los días donde se producen los picos más representativos en la emisión del flujo de CO₂, son días calurosos donde se produce un aumento repentino del contenido de agua en el suelo, provocado por un episodio de precipitaciones. Este patrón se puede ver en los resultados del muestreo continuo de este trabajo, dado que los picos de contenido de agua en el suelo (Gráfico 2), asociados a episodios de precipitaciones, se alinean con picos de emisión de CO₂ (Gráfico 1). Esto concuerda con lo visto en los anteriores estudios (*Chamizo et al. 2017* y *Lopez-Ballesteros et al. 2016*) sin embargo, en los datos surgidos a partir de las mediciones in situ no se ha podido verificar una fuerte correlación entre el aumento del contenido de agua y el CO₂ emitido. Esto puede deberse a que no se han hecho las suficientes repeticiones como para establecer dicha interacción posiblemente porque sea débil, como ya se sugería en *Lardo et al. 2016*. Es también importante mencionar que las condiciones en regadío del olivar estudiado hacen que el agua no sea un factor limitante en contraposición a lo que sería propio de un entorno semiárido, por tanto su influencia en la respiración probablemente haya sido enmascarada en este experimento con respecto a lo que sería un olivar tradicional de secano.

En el estudio anteriormente mencionado (*Lardo et al. 2016*) se realizaron mediciones con un instrumental por inducción electromagnética, las mediciones se realizaron en un transecto horizontal entre el dosel y la calle, una situación muy similar al diseño experimental de este TFG. El patrón que se obtiene en este estudio de la variación del flujo de CO₂ con respecto a la distancia al tronco es muy similar al que se obtiene en este trabajo. Tal y como se ha mencionado, junto con la disponibilidad de agua y las altas temperaturas la presencia de raíces es un factor que influye mucho en los patrones de distribución espacial de la emisión de CO₂, debido tanto a la respiración propia de las raíces como a los microorganismos que se asocian o agrupan en torno a estas. Es por tanto esperable que los valores más altos de CO₂ se encuentren en el dosel del árbol donde la presencia de raíces es presumiblemente más alta, cuanto más nos alejemos del tronco menos cantidad de raíces se encontraran y el flujo emitido a la atmósfera menor. Hay que tener en cuenta que la distribución de raíces no es uniforme lo que podría explicar las diferencias que existen en los patrones de los 3 olivos estudiados, reflejadas en parte por la longitud de las barras de error representadas en los gráficos. Esta diferencia en la distribución de las raíces de los tres árboles de la parcela podría ser la causante de los picos y los valles presentes en el gráfico 16, ya que como se ha visto la agrupación puntual de las raíces en torno al árbol es más determinante que las variables temperatura o humedad del suelo. Otra observación realizada a partir de los resultados teniendo en cuenta las relaciones entre la temperatura y el agua con los flujos de CO₂ ha sido que cuanto más temperatura, más se acentúa la diferencia entre el CO₂ que se emite entre la calle y el dosel. Una hipótesis que se puede formular a partir de esta observación sería que la calle sin cobertura vegetal tiene una alta tasa de evaporación debido a la exposición solar directa, mientras que en el dosel del olivo bajo sombra se mantiene una cantidad de agua en el suelo suficiente como para aumentar la tasa de respiración.

4.2 Flujos del metano

Una parte complementaria a este trabajo ha sido estudiar la distribución del CH₄ junto con la del CO₂, ya que el instrumental portátil permitía realizar la medición simultánea de ambos gases de efecto invernadero. Si para el CO₂ el suelo de olivar actúa como una fuente, para el CH₄ este pasa a ser un sumidero, asimilando metano atmosférico por la acción de bacterias metanotrofas. Esto concuerda con lo observado por otros estudios en olivar (*Maris et al. 2015*, *Vilarasa-Nogue et al.*

2019) donde además se experimenta a través de diferentes tratamientos para dirimir la influencia del N como factor de posible importancia en la asimilación de CH₄. Es esperable que un olivar donde no se producen fenómenos frecuentes de encharcamiento actúe como sumidero de metano, ya que la producción de metano por medio de microorganismos requiere de condiciones estrictamente anaeróbicas (Vilarasa-Nogue et al. 2019). Con respecto a posibles coincidencias entre los flujos de emisión y asimilación, se ha visto en los gráficos radiales 16 y 17 que altos valores de emisión de CO₂ suelen coincidir con altos valores de asimilación de CH₄, que a su vez ha sido relacionado anteriormente con la presencia de raíces y los microorganismos asociados a ellas.

5. Conclusiones del trabajo

En este último apartado se van a sintetizar las conclusiones derivadas de los resultados anteriormente expuestos, para finalizar se comentarán algunas sugerencias de mejora en vista a futuros muestreos en campo.

Las conclusiones de este trabajo son:

- 1) El suelo del olivar estudiado se comporta en líneas generales como fuente de CO₂ y sumidero de CH₄.
- 2) La combinación de temperaturas altas (>25°C) con cierta cantidad de agua en el suelo provocan un aumento considerable en la tasa de respiración en el suelo, sin embargo temperaturas extremadamente altas inhiben una parte importante de esta respiración, reduciendo el flujo de CO₂ emitido.
- 3) La distribución espacial de los flujos de CO₂ y CH₄ en torno al dosel del árbol podría estar directamente relacionada con los puntos de acumulación de raíces, ya que se ha comprobado que estas tienen una fuerte influencia en estos flujos.
- 4) Los episodios de precipitaciones conllevan un aumento súbito de la cantidad de CO₂ emitido a la atmósfera, concordando con lo visto en anteriores trabajos.
- 5) El CH₄ se consume en el suelo del olivar por los microorganismos metanótrofos porque se mantienen unas condiciones aerobias gracias al escaso régimen de precipitaciones y al buen drenaje.

Por último, de cara a futuros estudios se quieren discutir algunas sugerencias de mejora para este trabajo. Comenzando por un mejor tratamiento de los errores e incertidumbres en las mediciones realizadas. En este trabajo se han elegido las desviaciones estándar como método de cálculo, esto se ha traducido en amplios rangos de variación de los resultados en continuo, con algunos extremos saliéndose de lo razonable para ese tipo de variable. Este efecto se debe a valores puntuales o posibles errores en el instrumental de medición que no reflejan el comportamiento habitual del suelo de olivar. Con otra metodología de cálculo del error se podría haber reducido la influencia de estos valores puntuales y extremos. Además un cálculo del error preciso ha de tener en cuenta no solo el rango de variación de los valores si no también el error intrínseco a la propia medición que dependerá de la sensibilidad del instrumental. Otra sugerencia de mejora es ampliar el rango de datos de las mediciones in situ, ya sea con más días de muestreo en los mismos olivos aquí trabajados o bien moviendo el muestreo a otros olivos. Complementariamente podría ser interesante realizar mediciones justo tras un episodio fuerte de lluvia, preferiblemente en los primeros días de Septiembre. A pesar de las dificultades adicionales que ese muestreo implicaría, en este trabajo se ha visto que en esas condiciones se da la mayor tasa de emisión de CO₂, las precipitaciones podrían alterar el régimen de emisión entre dosel y calle.

Referencias

- Cornelius Oertel, Jörg Matschullat, Kamal Zurba, Frank Zimmermann, Stefan Erasmí, *Greenhouse gas emissions from soils—A review*, *Geochemistry*, Volume 76, Issue 3, 2016, Pages 327-352, ISSN 0009-2819, <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2016.04.002>.
- Curtin, D., Beare, M.H. and Hernandez-Ramirez, G. (2012), *Temperature and Moisture Effects on Microbial Biomass and Soil Organic Matter Mineralization*. *Soil Science Society of America Journal*, 76: 2055-2067. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0011>
- Egidio Lardo, Aissa Arous, Assunta Maria Palese, Vitale Nuzzo, Giuseppe Celano, *Electromagnetic induction: A support tool for the evaluation of soil CO₂ emissions and soil organic carbon content in olive orchards under semi-arid conditions*, *Geoderma*, Volume 264, Part A, 2016, Pages 188-194, ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.10.014>.
- López-Ballesteros, A., Serrano-Ortiz, P., Sánchez-Cañete, E. P., Oyonarte, C., Kowalski, A. S., Pérez-Priego, Ós., and Domingo, F. (2016), *Enhancement of the net CO₂ release of a semiarid grassland in SE Spain by rain pulses*, *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 121, 52–66, doi:[10.1002/2015JG003091](https://doi.org/10.1002/2015JG003091).
- Luca Testi, Francisco Orgaz, Francisco Villalobos, *Carbon exchange and water use efficiency of a growing, irrigated olive orchard*, *Environmental and Experimental Botany*, Volume 63, Issues 1–3, 2008, Pages 168-177, ISSN 0098-8472, <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.11.006>.
- M. Vilarrasa-Nogué, M.R. Teira-Esmatges, J.M. Villar, J. Rufat, *Effect of N dose on soil GHG emissions from a drip-fertigated olive (*Olea europaea* L.) orchard*, *Science of The Total Environment*, Volume 677, 2019, Pages 350-361, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.210>.
- Perez-Priego, O. (2021). *Plant Chamber Measurements*. In: Foken, T. (eds) *Springer Handbook of Atmospheric Measurements*. Springer Handbooks. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-52171-4_59
- Pörtner, H. O., Roberts, D. C., Adams, H., Adler, C., Aldunce, P., Ali, E., Ara Begum, R., Betts, R., Bezner Kerr, R., Biesbroek, R., Birkmann, J., Bowen, K., Castellanos, E., Cissé, G., Constable, A., Cramer, W., Dodman, D., Eriksen, S. H., Fischlin, A., ... Zaiton Ibrahim, Z. (2022). *Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability*. IPCC. <https://edepot.wur.nl/565644>
- S.C. Maris, M.R. Teira-Esmatges, A. Arbonés, J. Rufat, *Effect of irrigation, nitrogen application, and a nitrification inhibitor on nitrous oxide, carbon dioxide and methane emissions from an olive (*Olea europaea* L.) orchard*, *Science of The Total Environment*, Volume 538, 2015, Pages 966-978, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.040>.
- Sergio-D. Aguirre-García, Sergio Aranda-Barranco, Hector Nieto, Penélope Serrano-Ortiz, Enrique-P. Sánchez-Cañete, Juan-L. Guerrero-Rascado, *Modelling actual evapotranspiration using a two source energy balance model with Sentinel imagery in herbaceous-free and herbaceous-cover Mediterranean olive orchards*, *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 311, 2021, 108692, ISSN 0168-1923 <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108692>.
- Sonia Chamizo, Penélope Serrano-Ortiz, Ana López-Ballesteros, Enrique P. Sánchez-Cañete, José Luis Vicente-Vicente, Andrew S. Kowalski, *Net ecosystem CO₂ exchange in an irrigated olive orchard of SE Spain: Influence of weed cover*, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Volume 239, 2017, Páginas 51-64, ISSN 0167-8809, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.01.016>.