

Efecto del clareo y sus residuos sobre la emisión de gases de efecto invernadero en suelos de pinar y robleal del Parque Nacional de Sierra Nevada

Máster en Geofísica y Meteorología



Trabajo fin de máster (2021/2022)

Universidad de Granada

Ángela Lucía Valverde Amor

Tutora: Penélope Serrano Ortiz (Universidad de Granada)

Mentor: Sergio Aranda Barranco (Universidad de Granada)

Agradecimientos

Quiero agradecer la ayuda a mi tutora Penélope Serrano y a Sergio Aranda que siempre que lo he necesitado han estado ahí para guiarme y enseñarme. A Daniel Agea por acompañarnos en las campañas de medida y ayudar en todo lo posible. A mis amigos, en especial a Inés, Juanmi y Tony por este año de máster y mucho más. Y a mis padres por apoyarme en todo lo que hago.

This work was supported by the projects “LifeWatch-2019-10-UGR-01 (SMART-ECOMOUNTAINS)” co-funded by the Ministry of Science and Innovation through the FEDER funds from the Spanish Pluriregional Operational Program 2014-2020 (POPE), LifeWatch-ERIC action line and “RNM-60-UGR20 (OLEAGEIs)” funded by FEDER/Junta de Andalucía-Consejería de Transformación Económica, Industria, Conocimiento y Universidades.



ÍNDICE

Lista de acrónimos	4
Resumen	5
1. Introducción	6
2. Objetivos	8
3. Metodología	8
3.1 Área de estudio	8
3.2 Instrumentación y software	10
3.3 Corrección por dilución del vapor de agua	16
3.4 Cálculo del flujo	17
3.5 Análisis estadístico.....	18
4. Resultados	20
4.1 Efecto del tratamiento aplicado sobre los flujos de carbono, temperatura y humedad de suelo	20
4.2 Variabilidad estacional de flujos de suelo de CO ₂ y CH ₄	23
4.3 Relación entre los flujos de carbono y otras variables	26
5. Discusión	28
6. Conclusiones	31
7. Referencias	31

Lista de acrónimos y símbolos

ANOVA: Analysis of Variance

CH₄: metano

CO₂: dióxido de carbono

PVC: policloruro de vinilo

R^2 : coeficiente de correlación

Resumen

La respiración del suelo de los ecosistemas forestales es un factor muy importante al estar relacionada con la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera, proceso clave en el cambio climático que sufrimos actualmente en todo el planeta. Los trabajos de clareo que a menudo se llevan a cabo para mejorar la calidad de los bosques, suelen tener gran impacto en los flujos de carbono. En el presente trabajo estudiamos como esta actividad influye en los flujos de CO₂ y CH₄ a escala de suelo en dos ecosistemas forestales mediterráneos: un pinar y un robledal situados dentro del Parque Nacional de Sierra Nevada. La toma de medidas tuvo lugar entre marzo y junio de 2022 mediante métodos de cámara, con los que también se registraron medidas de humedad y temperatura de suelo. De esta forma, se ha podido comprobar que, dejar sobre el suelo de pinar restos procedente de la tala o retirarlos, no tiene efecto significativo sobre los flujos de carbono. En cambio, en el robledal sí aparecen diferencias significativas entre un suelo cubierto por hojarasca y un suelo desnudo donde se retiraron ejemplares que crecían de forma asexual.

Para el procesado de datos se ha hecho uso del software SoilFluxPro, además del software R para el análisis estadístico de los mismos.

Abstract

Soil respiration in forest ecosystems is a very important factor as it is related to the emission of greenhouse gases into the atmosphere, a key process in the climate change that we are currently experiencing throughout the planet. Thinning, which are often carried out to improve the quality of forests, often have a large impact on carbon fluxes. In the present work we study how this activity influences the fluxes of CO₂ and CH₄ at soil scale in two Mediterranean forest ecosystems: a pine forest and an oak forest located within the Sierra Nevada National Park. Data set were taken between March and June 2022 by camera methods, with which soil humidity and temperature data were also recorded. Thus, it has been possible to verify that leaving remains from logging on the floor of the pine forest or removing them does not have a significant effect on carbon fluxes, on the other hand, in the oak grove, significant differences do appear between a soil covered by leaf litter and a bare soil where specimens that grew asexually were removed.

For data processing, “SoilFluxPro” software has been used, in addition to the “R” software for statistical analysis.

1. Introducción

En la actualidad contamos con un escenario de calentamiento global sin precedentes, debido al aumento de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4) que se emite a la atmósfera (Core Writing Team et al., 2014). Estos gases, absorben y reemiten gran parte de la radiación infrarroja que emite la superficie terrestre de nuestro planeta, produciendo un incremento de la temperatura global. Aunque el aumento de estas emisiones en gran parte tiene su origen en la actividad antropogénica, los procesos de respiración del suelo contribuyen a este aumento de gases de efecto invernadero.

La respiración del suelo engloba la respiración autótrofa de las raíces de las plantas y la respiración heterótrofa de los microbios y organismos (Bond-Lamberty et al., 2004). A través de ella, se expulsa a la atmósfera CO_2 (CH_4 bajo condiciones de anoxia). La respiración del suelo constituye una componente esencial del ciclo del carbono a escala de ecosistema, por ello se considera una variable clave que permite estudiar los bosques tanto desde el punto de vista de su crecimiento, como de sus respuestas al cambio climático (Gower, 2003).

La temperatura y la humedad del suelo parecen ser las principales variables ambientales responsables de la variación temporal de la respiración del suelo. Normalmente, las temperaturas más altas se asocian a mayores tasas de respiración. Sin embargo, las interacciones entre la temperatura y la humedad del suelo son bastante complejas y aún poco conocidas (Azizi-Rad et al., 2022). En menor medida, influyen los cambios locales de presión debido al viento o el desplazamiento volumétrico de la lluvia, ya que desplazan los gases desde los lugares de producción a la atmósfera, aunque principalmente estos se mueven por los poros y grietas llenas de aire del suelo (Using the Smart Chamber. Soil Gas Flux Survey Chamber, 2021). Por otro lado, también afecta el tipo de vegetación, ya que determina la calidad y la cantidad de hojarasca depositada en el suelo y la actividad de las raíces (Morote et al., 2022).

De la misma manera que el CH_4 es emitido hacia la atmósfera, por procesos de respiración en condiciones de anoxia fundamentalmente, algunos tipos de suelo se caracterizan por la capacidad de absorber este gas. Estudios han demostrado que hay suelos semiáridos actuando como sumideros de CH_4 durante todo el año, incluso en épocas con un alto contenido de agua en terreno, y que la captación de este gas tiene una fuerte dependencia con la temperatura del suelo (Chen et al., 2010).

Los estudios centrados en flujos de gases de suelo son, hoy en día, muy necesarios ya que el calentamiento global altera el régimen de precipitaciones y temperaturas, lo que podría modificar la composición actual de las especies forestales y, por tanto, la respiración del suelo (Morote et al., 2022). Asimismo, actividades de origen antropogénico, como la tala y el manejo de los residuos forestales, pueden tener también un impacto significativo en estos flujos de gases que se emiten a la atmósfera, y por tanto alterar las reservas de carbono de los ecosistemas forestales que tanto influyen en el cambio climático.

Esta situación la podemos encontrar dentro del Parque Nacional de Sierra Nevada, que forma parte de la cordillera Penibética, extendiéndose desde el sudeste de Granada hasta el extremo occidental de Almería (Junta de Andalucía. Consejería de agricultura, n.d.). Con más de 2000 especies vegetales, la diversidad biológica es el principal valor ecológico de Sierra Nevada (Sierra Nevada. Diversidad Biológica, n.d.). En zonas de media montaña aparecen formaciones boscosas como robledales (*Quercus pyrenaica*) o pinares (*Pinus sylvestris* o pino albar nevadense) en los que frecuentemente se llevan a cabo procesos de tala o de retirada de alguno de sus ejemplares.

El pino silvestre o albar es una especie de montaña que podemos encontrar hasta a 2000 metros de altitud en la Península Ibérica, alcanza hasta 40 metros de altura, forma bosques en laderas poco húmedas y presenta gran capacidad para entrar en el terreno de otras especies u ocupar espacios vacíos tras una tala (de Cara García, 2004). Por otro lado, el robledal (*Quercus pyrenaica*) tiene una alta capacidad de rebrote (especialmente de raíz), alcanza una altura de hasta 18 metros y es caducifolio, aunque no desprende sus hojas secas hasta que no aparece el brote de las nuevas (Valbuena-Carabaña & Gil, 2014).

Las transformaciones históricas que han sufrido los bosques españoles han afectado a las especies que estamos comentando. En Sierra Nevada, después de un intenso aprovechamiento de robledales de *Quercus pyrenaica*, la actividad humana sobre estos bosques ha disminuido en las últimas décadas provocando una degradación que se refleja en un estancamiento del crecimiento o en una escasez de la fructificación (Valbuena-Carabaña & Gil, 2014). Precisamente la regeneración asexual continuada está detrás de esta última consecuencia y es por ello por lo que a veces se procede a retirar el robledal que crece de forma asexual (por rebrote de la raíz) (Valbuena-Carabaña & Gil, 2014). El efecto de este manejo sobre la respiración del suelo es aún desconocido.



Figura 1. Robledal en el Parque Nacional de Sierra Nevada. Aparece una zona libre de robles junto a otra cubierta al fondo de la imagen.

Por otro lado, destacar la existencia de numerosas plantaciones forestales. Todas ellas se caracterizan por una alta densidad y a la vez pobre diversidad de árboles (Gómez-Aparicio et al., 2009). Esta situación la podemos encontrar en bosques de pino silvestre de Sierra Nevada. Estas plantaciones nacieron con la idea de recuperar la superficie forestal perdida a lo largo de miles de años por la explotación maderera y por la conversión a tierras agrícolas de esas zonas. Sin embargo, muchas de las iniciativas de reforestación no contaron con una buena supervisión posterior y no se logró con éxito el objetivo inicial.

Es por ello, por lo que se han llevado a cabo procesos de clareo, ya que aumentan la riqueza de las especies al bajar la competencia y al aumentar la disponibilidad de recursos (luz, agua y nutrientes), lo que permite a su vez, que persistan un mayor número de especies de sotobosque y conduce a crear plantaciones con densidades más naturales (Thomas et al., 1999). Nuevamente, el efecto de este manejo en la respiración de suelo está poco estudiado (Marañón-Jiménez et al., 2011)

En nuestro caso, vamos a centrarnos en estudiar las relaciones que existen entre estos procesos de regeneración de ecosistemas forestales con valores de flujos de suelo de dióxido de carbono y metano, así como su relación con factores abióticos (como temperatura o humedad).

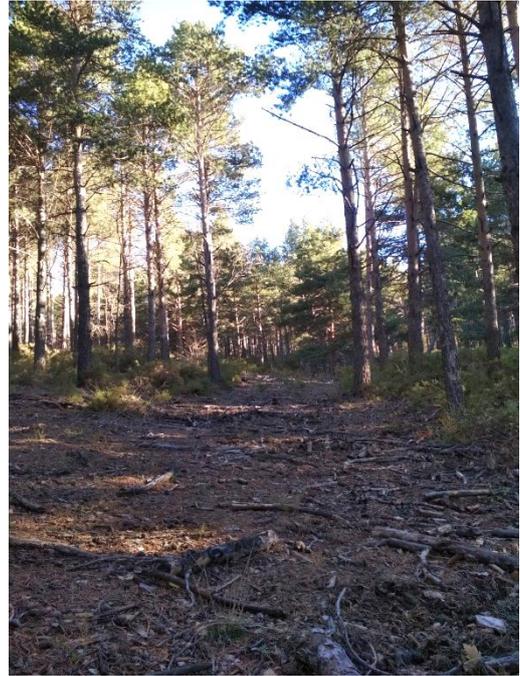


Figura 2. Pinar en el Parque Nacional de Sierra Nevada. Se aprecia el clareo realizado en la parte inferior de la imagen.

2. Objetivos

La idea principal de este trabajo es analizar los flujos de CO_2 y CH_4 a escala de suelo en dos ecosistemas forestales distintos (pinar y robleal) en los que se han llevado a cabo procesos de regeneración.

Para determinar los flujos utilizaremos métodos de cámaras. Estudiaremos la evolución de los flujos a nivel estacional, su dependencia con la temperatura y la humedad del suelo y analizaremos si existen o no diferencias entre distintos tratamientos aplicados. De esta forma, lograremos caracterizar ambos emplazamientos en cuanto su comportamiento como fuente o sumidero de gases de efecto invernadero.

3. Metodología

3.1 Área de estudio

Para la toma de medidas de flujos de CO_2 y CH_4 nos hemos desplazado a dos ecosistemas forestales situados dentro del Parque Nacional de Sierra Nevada: una zona de pinar ($36^{\circ}57'16.9''\text{N}$ $3^{\circ}18'04.5''\text{W}$) en Pórtugos y un robleal ($36^{\circ}57'08.8''\text{N}$ $3^{\circ}25'51.3''\text{W}$) situado en Cáñar, municipios pertenecientes a La Alpujarra granadina. El clima en ambas zonas de estudio es de tipo mediterráneo con veranos cálidos y secos y precipitaciones concentradas en primavera y otoño (Junta de Andalucía. Consejería de agricultura, n.d.).

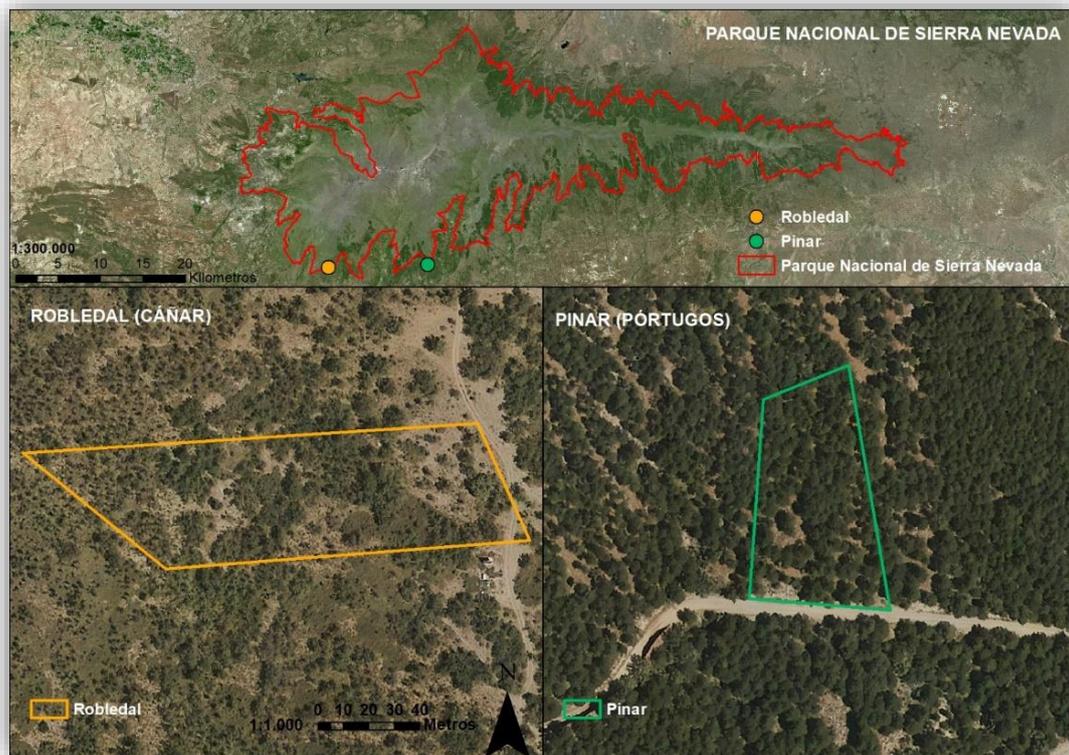


Figura 3. Zona de estudio. Parque Nacional de Sierra Nevada (imagen superior). Áreas aproximadas de trabajo en el robledal (imagen inferior izquierda) y en el pinar (imagen inferior derecha).

En primer lugar, se procedió a la instalación de tubos de PVC (de 20 cm de diámetro y 11 cm de alto) en ambos emplazamientos, a principios del mes de febrero de 2022. El área de suelo que estos engloben será la que analicemos. En el pinar disponemos de un total de 24 collares repartidos en seis parcelas, nueve de ellos con restos de tala (bajo rama), otros nueve al descubierto (suelo desnudo) y seis colocados justo debajo de los pinos (bajo pino). En el robledal contamos con 18 collares repartidos, de nuevo en seis grupos, nueve de ellos colocados cerca de los robles y cubiertos de hojarasca (suelo cubierto) y los restantes en zonas donde se había retirado el robledal previamente (suelo desnudo).

Las campañas de medidas se han realizado cada dos semanas a partir del día 9 de marzo de 2022 hasta el 13 de junio de 2022, contando con ocho días de registros para ambos emplazamientos con los que vamos a realizar nuestro estudio.

3.2 Instrumentación y software

La mejor opción para medir flujos de gases traza, cuyo proceso de intercambio está controlado predominantemente por pequeñas áreas de la planta y suelo, son los métodos de cámara (Harazono et al., 2015). Existen cámaras estáticas y dinámicas, que junto con un analizador de gases son capaces de proporcionar los valores de flujo a escala de suelo.

En nuestro caso, para determinar los flujos de CO₂ y CH₄ contamos con un equipo formado por una cámara (8200-01S, *Smart Chamber*, Li-Cor, Lincoln, NE, USA), un analizador de gases trazas (LI-7810, Li-Cor, Lincoln, NE, USA) y el software *Soil Flux Pro* con el que procesaremos los datos medidos.



Figura 4. Analizador de gases traza y cámara de medición de flujos de gases en suelo.

▪ Cámara de medida del flujo de gas en el suelo



Figura 5. *Smart Chamber* midiendo flujo de gas a escala de suelo en una zona de robledal.

Se trata de una cámara inteligente de medición portátil, alimentada por una batería, con GPS y Wi-Fi que realiza mediciones de flujo de gas a escala de suelo (Figura 5). Tiene integrado un software para el procesamiento del flujo, almacenamiento interno y cuenta con una sonda que registra humedad de suelo, temperatura de suelo y su conductividad eléctrica (Stevens HydraProbe). Estos datos auxiliares se recogen junto con los datos de flujo de gas del suelo y se almacenan en los archivos de datos de la cámara (‘Using the Smart Chamber. Soil Gas Flux Survey Chamber’, 2021).

Puede configurarse con analizadores de gas LI-COR para realizar cálculos de flujo en tiempo real, pero también se puede utilizar con otro tipo de analizadores de gas para medir flujos de otros gases

de interés utilizando el software *Soil Flux Pro* (‘Using the Smart Chamber. Soil Gas Flux Survey Chamber’, 2021).

Dado que los flujos de gas del suelo son muy sensibles a las fluctuaciones de presión, la cámara está ventilada, de tal forma que mantiene el equilibrio de presión entre el interior y el exterior de la cámara y garantiza una mezcla adecuada sin causar turbulencias ni gradientes de presión (‘Using the Smart Chamber. Soil Gas Flux Survey Chamber’, 2021).

La cámara no proporciona recomendaciones absolutas sobre la mejor duración de la observación en todas las situaciones ya que no conoce todos los tipos de suelo sobre los que puede operar. Sin embargo, indica que, para gases como el dióxido de carbono y el metano, los tiempos de mediciones recomendados han de ser de 90 a 180 segundos con el fin de mantener los cambios de concentración de gas tan pequeños como sea posible ya que hay estudios de modelos de difusión que han demostrado que las cámaras pueden alterar los gradientes de concentración de gases en el suelo, lo cual daría lugar a errores en las estimaciones de flujo ('Using the Smart Chamber. Soil Gas Flux Survey Chamber', 2021). En nuestro caso, se realizaron mediciones de 110 segundos.

En cuanto a la *dead band* (periodo de tiempo que comienza cuando la cámara se ha cerrado completamente y que continúa hasta que el aire encerrado en su interior es una mezcla estable y se inicia la medición), la cámara indica que su longitud óptima puede variar entre 10 y 60 segundos. Para el estudio que se realiza en este trabajo se le atribuyó una duración por defecto de 26 segundos.

Para proceder a medir, la cámara inteligente se sitúa sobre collares de suelo (tubos de PVC) (Figura 6 a), de tal forma que el área encerrada por ellos sea la que analicemos. Estos tienen una gran ventaja, permiten realizar mediciones repetidas exactamente en el mismo lugar a lo largo del tiempo. Deben instalarse días antes de realizar las primeras medidas y quedar fijos al suelo, de manera que no se muevan al colocar la cámara sobre ellos. Han de sobresalir un mínimo de 2 centímetros por encima de la superficie del suelo y no se recomiendan más de 3 centímetros porque aumenta el sombreado y la perturbación del movimiento del aire. Con el tiempo, estas perturbaciones podrían provocar cambios en la tasa de evaporación, la temperatura y la humedad del suelo ('Using the Smart Chamber. Soil Gas Flux Survey Chamber', 2021).

El día en el que se inició la campaña de medición, lo primero que se determinó fue el *offset* de cada uno de los collares, que hace referencia a la distancia entre la superficie del suelo y la parte superior del collar, como podemos ver en la Figura 6 b). Es importante determinarlo ya que se utiliza para calcular el volumen de aire dentro del collar, que a su vez es necesario para estimar el volumen total del sistema. El volumen total del sistema es un parámetro importante en el cálculo del flujo, por lo que debe determinarse con la mayor exactitud posible. Por ello, para obtener medidas precisas, se midió dicha distancia en cuatro zonas de cada collar y finalmente se obtuvo el promedio. Proceder de este modo es de especial importancia cuando los collares se instalan en suelos inclinados o irregulares ('Using the Smart Chamber. Soil Gas Flux Survey Chamber', 2021).

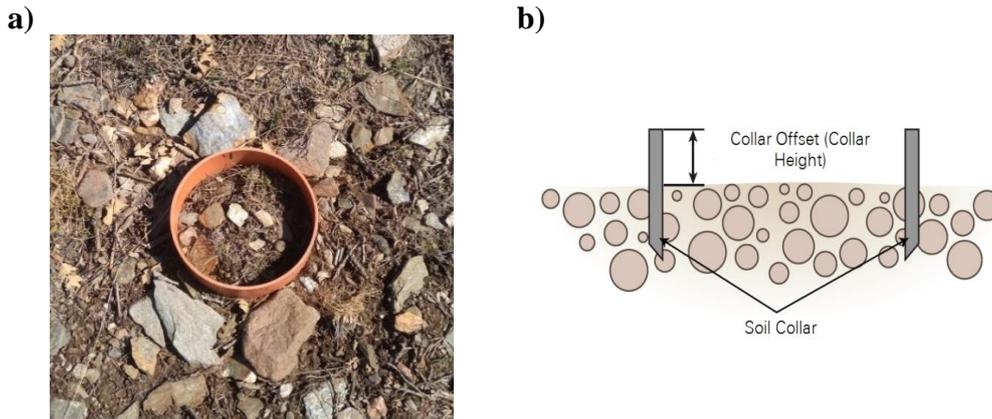


Figura 6. Collar de PVC instalado en un roblezal de Cãñar (Sierra Nevada) (a). Esquema del collar con la distancia que determina el offset (b).

Los analizadores de gases traza LI-COR proporcionan datos a la cámara para determinar los flujos de gases. A través de una serie de cables auxiliares conectamos los dos instrumentos una vez llegamos al lugar de trabajo (Figura 7).

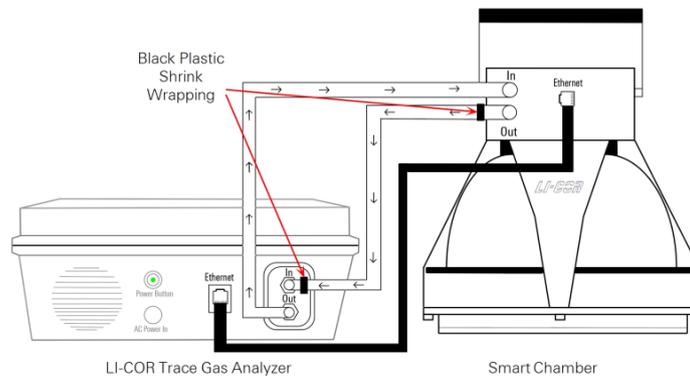


Figura 7. Esquema de la conexión entre un analizador de gases LI-COR y una Smart chamber.

▪ Analizador de gases traza LI-7810

El analizador de gases traza LI-7810 (Figura 8) registra medidas de la concentración de vapor de agua (ppm), de la fracción molar de CO₂ en aire seco (ppm) y de la fracción molar de metano en aire seco (ppb) ('LI-7810 Trace Gas Analyzer. Instruction Manual', 2021). Está diseñado tanto para interior como para exterior, sin embargo, no es resistente al agua y por ello no debe dejarse expuesto a la lluvia ni en zonas con agua estancada. Para su funcionamiento cuenta con dos baterías que le permiten estar operativo un total de 8 horas ('LI-7810 Trace Gas Analyzer. Instruction Manual', 2021).

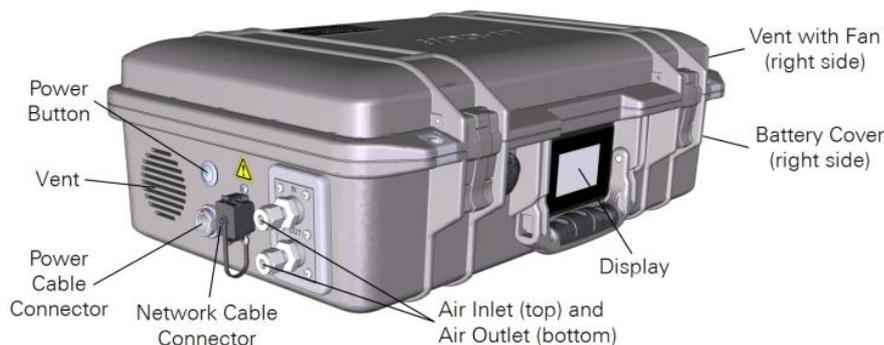


Figura 8. Esquema del analizador de gases traza LI-7810.

Al conectarlo a la cámara inteligente para iniciar una medición, cuando la cámara se cierra, el aire llega a él y se introduce en su interior a través de la entrada de aire (*air inlet*) gracias a una bomba interna (Figura 8). A continuación, se dirige hacia un banco óptico que debe alcanzar una temperatura de 55 °C para que la bomba comience a funcionar, por ello es importante encender el instrumento unos 30 minutos antes de iniciar la toma de medidas.

Para medir la concentración de los gases traza, el analizador inyecta luz láser en el interior del banco óptico que posee forma de “V” y está compuesto por tres espejos altamente reflectantes para que así los fotones puedan circular más tiempo a través del medio activo antes de escapar y golpear el fotodiodo, como podemos observar en la Figura 9. Con una longitud de trayectoria efectiva superior se logra mejorar la sensibilidad, ya que el gas que fluya a través de la cavidad tendrá más oportunidades de absorber la luz (‘LI-7810 Trace Gas Analyzer. Instruction Manual’, 2021).

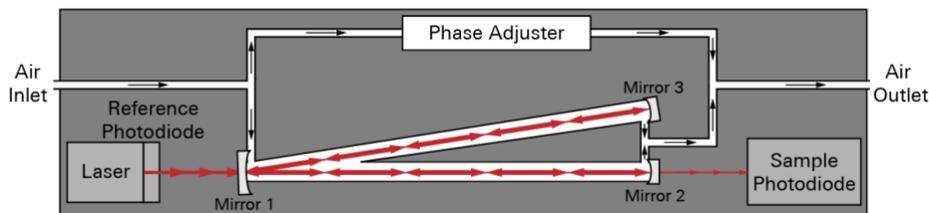


Figura 9. Esquema simplificado de la trayectoria que recorre el aire a través del analizador LI-7810 a través del banco óptico.

Por otro lado, contamos con un ajustador de fase o *phase adjuster*. Se trata de un volumen situado entre el láser y el banco óptico que cuenta con un mecanismo de control de presión. Al cambiar la presión de ese volumen, alteramos el índice de refracción del aire, que posteriormente modificará la fase del láser (‘LI-7810 Trace Gas Analyzer. Instruction Manual’, 2021).

La luz láser, dentro de la cavidad, se refleja varias veces. Parte de esos fotones son capaces de salir de la cavidad y volver al láser, generándose un acoplo entre la luz reflejada que sale de la cavidad y la que sale del dispositivo láser que llevará una frecuencia asociada no resonante que no lograremos ver. Se generan, por tanto, unas condiciones de contorno que van a fijar cuales son las frecuencias resonantes para cada fase del láser. Con el *phase adjuster*, al ir variando la fase del láser que entra en la cavidad, cambiaremos las

condiciones de contorno, variarán las frecuencias resonantes y así iremos barriendo todo el espectro de frecuencias de interés y lograremos registrar todas las frecuencias resonantes de ese rango, para finalmente observar cuales y en qué medida son absorbidas por los gases de la muestra de aire que introducimos en la cavidad.

Al reflejarse la luz varias veces, se producen ondas estacionarias para ciertas frecuencias resonantes. Los patrones de onda estacionaria producidos se denominan “modos”. De esta manera se genera una red de modos de resonancia asociados a la cavidad y cada uno lleva asociado una frecuencia de resonancia, equiespaciadas en unos kHz (Figura 10).

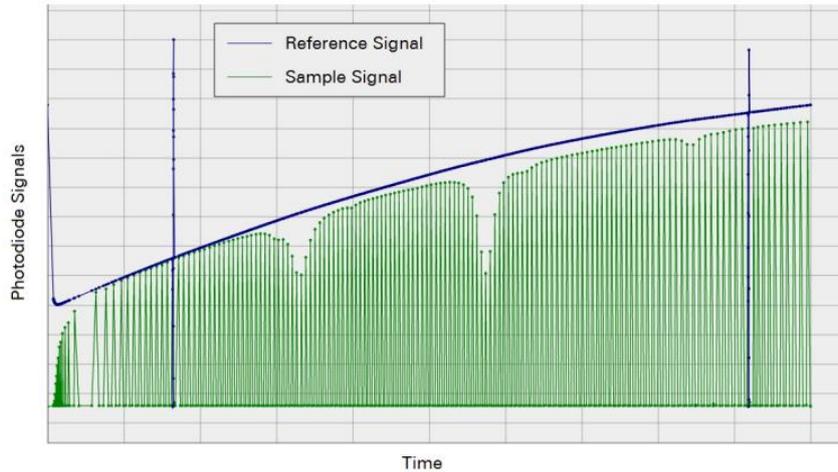


Figura 10. Ejemplo donde se muestran las absorciones de los gases. La línea azul es la señal de referencia y las líneas verdes hacen referencia a la señal de la muestra en cada uno de los modos de resonancia de la cavidad.

Se recorre todo el espectro de frecuencias de interés en 0,25 segundos y la absorción que realizan los gases de estas frecuencias se calcula en cada modo de resonancia comparando la señal del fotodiodo de la muestra con la señal de referencia, como se puede ver en la Figura 10. La concentración de cada gas se determina a través de un algoritmo que compara el espectro de absorción medido con el espectro de alta resolución que se tiene como referencia (LI-7810 Trace Gas Analyzer. Instruction Manual, 2021) (‘LI-7810 Trace Gas Analyzer. Instruction Manual’, 2021).

Una vez analizado el aire de la muestra, el instrumento lo expulsa a través de la salida (*air outlet*). Cuando el instrumento se está apagando, el aire circula en un circuito cerrado a través del desecante para garantizar que el aire que queda en el sistema esté libre de humedad, evitando la condensación cuando el instrumento se apaga (Figura 11 B) (‘LI-7810 Trace Gas Analyzer. Instruction Manual’, 2021).

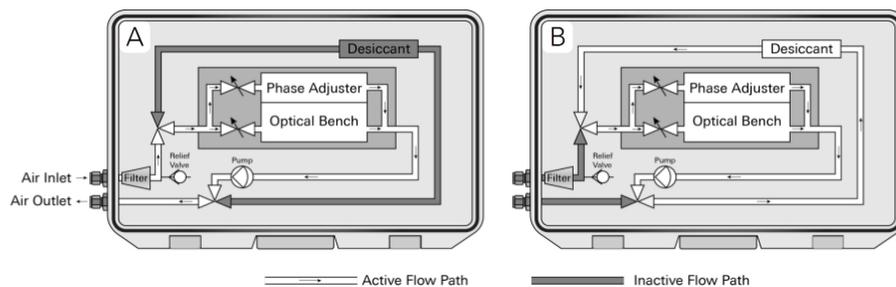


Figura 11. Esquema del flujo del analizador de gases LI-7810. Durante una medida (A) el aire fluye a través del banco óptico y el ajustador de fase. Durante el apagado (B), el instrumento elimina el vapor de agua para evitar su condensación.

La precisión con la que se registran las medidas de los gases trazas es la siguiente (‘LI-7810 Trace Gas Analyzer. Instruction Manual’, 2021):

- CH₄:
 - 0,60 ppb a 2 ppm con una media de 1 segundo
 - 0,25 ppb a 2 ppm con una media de 5 segundos
- CO₂:
 - 3,5 ppm a 400 ppm con una media de 1 segundo
 - 1,5 ppm a 400 ppm con una media de 5 segundos
- H₂O:
 - 45 ppm a 10.000 ppm con una media de 1 segundo
 - 20 ppm a 10.000 ppm con una media de 5 segundos

Es posible conectarnos a la cámara y al analizador a través de un smartphone o un ordenador. Con el software que llevan incorporado, indicamos cuando iniciar una medida, además de realizar los ajustes pertinentes antes de comenzar, como introducir el *offset* de cada collar. Asimismo, mientras realizamos una medición es posible ir observando como con el paso del tiempo aumenta la concentración de los gases en el volumen encerrado, así como el valor del flujo.

▪ Software *SoilFluxPro*

Una vez termina una campaña de medida existe la posibilidad de descargarnos los datos a posteriori y analizarlos con el software *SoilFluxPro*. Se trata de una aplicación para el estudio avanzado de datos de flujos del suelo. Con él es posible recalcular flujos, alterar parámetros, hacer estadísticas, graficar, hacer correcciones de dilución e incluso visualizar datos con *Google Earth* (‘SoilFluxPro Software. Instruction Manual’, n.d.). Además, se pueden cambiar los tiempos iniciales y finales para cada medición lo cual nos permite corregir errores si los tiempos empleados en campo no fueron los más adecuados (‘Using the Smart Chamber. Soil Gas Flux Survey Chamber’, 2021).

Este software nos proporcionará los valores de flujo que buscamos, los cuales se pueden determinar a partir de un ajuste lineal o exponencial de los datos. *SoilFluxPro*, ofrece directamente los parámetros de ambos ajustes, así como los valores de flujos finales. En la Figura 12 se recogen los valores de concentración de CO₂ frente al tiempo junto con el

ajuste lineal y exponencial, durante 110 segundos para un tubo de PVC instalado en suelo de pinar.

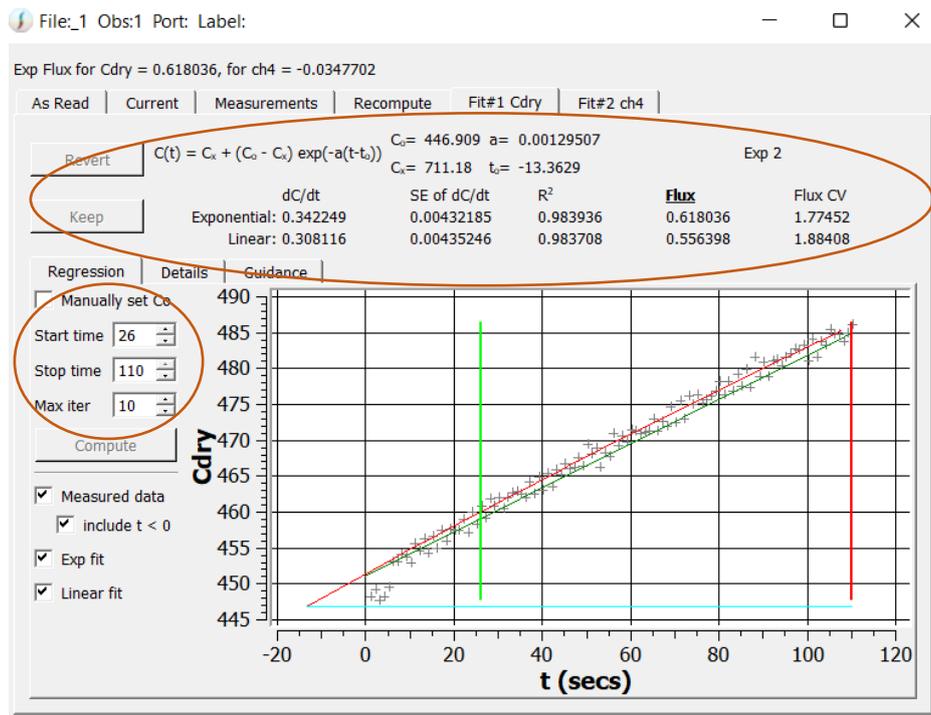


Figura 12. Visualización del software Soil Flux Pro. Representación de la concentración de CO₂ frente al tiempo para un collar en suelo. Ajustes lineal y exponencial. Parámetros del ajuste.

3.3 Corrección por dilución del vapor de agua

En la determinación de flujos de suelo de gases traza es importante considerar el efecto de dilución que provoca el vapor de agua ya que normalmente se miden en condiciones de aire húmedo (Harazono et al., 2015).

Al medir con la cámara aparece una dilución del CO₂ y CH₄ causada por el vapor de agua que hay en el interior de la cámara, lo cual introduce incertidumbre en la precisión de las medidas del flujo de estos gases (Harazono et al., 2015). En nuestro caso, el analizador LI-7810 nos proporciona las concentraciones de los gases en aire seco, es decir, ya corregidas. No obstante, a continuación, vamos a ver la importancia de esta cuestión.

El vapor de agua varía espacial y temporalmente, especialmente dentro de la capa límite y más sobre el suelo que sobre la capa superior de la vegetación. Por tanto, la concentración real del gas traza que estemos analizando se verá afectada por el cambio temporal o espacial de la concentración de H₂O. En el interior de la cámara el vapor de agua aumenta debido a la evapotranspiración, aunque el plazo de medición sea corto, se registra una variación considerable. Como el nivel diluido del gas bajo estudio variará durante el tiempo de medida, esto inducirá error en el cálculo del flujo (Harazono et al., 2015).

Definimos la concentración de un gas como la fracción molar del gas medido en aire húmedo y la proporción de mezcla si se mide en aire seco. Los flujos de gases se

determinan usando concentraciones medidas como proporción de mezcla, mientras que los gases trazas como el CO₂ y CH₄ son medidos en aire húmedo en la mayoría de los casos (C_c y C_m respectivamente) por lo que se diluyeron de acuerdo con la concentración de vapor de agua C_v . Luego, para pasar a proporción de mezcla (C'_c , C'_m) las concentraciones de los gases medidas en aire húmedo se aplican las siguientes ecuaciones a los dos gases traza (Harazono et al., 2015).

$$C'_c = \frac{C_c}{1 - C_v} \quad (1)$$

$$C'_m = \frac{C_m}{1 - C_v} \quad (2)$$

Estos valores son los que directamente podemos observar en el software SoilFluxPro y por ello no es necesario aplicar desde ahí la corrección para eliminar el efecto de dilución que provoca el vapor de agua.

3.4 Cálculo del flujo

Como hemos mencionado, la cámara inteligente, es la encargada de determinar los flujos de CO₂ y CH₄. Para ello, utiliza la siguiente expresión:

$$F = \frac{10 \cdot V \cdot P_0 \cdot \left(1 - \frac{W_0}{1000}\right)}{R \cdot S \cdot (T_0 + 273.15)} \cdot \frac{\partial C'}{\partial t} \quad (3)$$

Donde F es la tasa de flujo del suelo del gas ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), V es el volumen (cm^3), P_0 es la presión inicial (kPa), W_0 es fracción molar inicial de vapor de agua (mmol mol^{-1}), S el área de suelo (cm^2), R es la constante universal de los gases, T_0 la temperatura inicial del aire ($^{\circ}\text{C}$) y $\frac{\partial C'}{\partial t}$ la tasa inicial de cambio de la fracción molar del gas habiéndosele aplicado previamente la corrección por la dilución del vapor de agua ($\mu\text{mol mol}^{-1}\text{s}^{-1}$) ('Using the Smart Chamber. Soil Gas Flux Survey Chamber', 2021).

Dependiendo del comportamiento y la forma de los datos de la serie temporal, la tasa de cambio de la concentración de gas traza (dC'/dt) dentro de la cámara puede estimarse con una regresión lineal o un ajuste de curva exponencial ('Using the Smart Chamber. Soil Gas Flux Survey Chamber', 2021). En nuestro caso hemos trabajado con los valores de flujo estimados a partir del siguiente ajuste exponencial:

$$C'(t) = C'_{\infty} + (C'_0 - C'_{\infty}) \cdot e^{-\alpha(t-t_0)} \quad (4)$$

Siendo $C'(t)$ la fracción molar instantánea corregida del gas, C'_0 el valor inicial de $C'(t)$ justo cuando la cámara se cierra, C'_{∞} es la fracción molar corregida del gas si pasara un tiempo infinito, todo en μmol del gas por mol de aire seco ($\mu\text{mol mol}^{-1}$); α es un parámetro que define la curvatura del ajuste y t_0 representa el instante de tiempo en el que $C'(t_0) = C'_0$ ('Using the Smart Chamber. Soil Gas Flux Survey Chamber', 2021). La tasa de variación de la fracción molar del gas corregida por la dilución del vapor de agua y que es necesaria para determinar el valor del flujo, resulta:

$$\left. \frac{\partial C'}{\partial t} \right|_{t=t_0} = \alpha(C'_{\infty} - C'_0) \quad (5)$$

Aún así, en nuestro caso, no tenemos que realizar este cálculo porque la propia cámara se encarga de ofrecernos los valores finales de flujo con los que trabajaremos.

Los flujos de CH₄ obtenidos a partir de ajustes exponenciales con un $R^2 < 0.82$ en el pinar se han eliminado (30% del número total de flujos de CH₄ registrados), por ello los días 22 de marzo, 7 de abril y 5 de mayo aparecen sin resultados ya que más de la mitad de las medidas de ese día se habían rechazado y los promedios no eran representativos.

3.5 Análisis estadístico

Para estudiar el flujo de CO₂ y CH₄ hemos analizado las medidas registradas con un ANOVA (ANalysis Of VAriance) de una vía o de un factor (one-way or one-factor ANOVA). Se trata de una técnica estadística que permite comparar el efecto de uno o más factores sobre la media o la varianza de una variable dependiente de salida. Nos permite conocer si existen diferencias significativas entre los distintos tratamientos que se le puedan aplicar a nuestra variable dependiente.

En nuestro caso, no aplicamos al suelo un tratamiento como tal pero sí hay diferencia en el lugar donde se instalan los collares. Por tanto, vamos a considerar que tenemos un “tratamiento” que será la “zona de colocación del collar” y dentro de él distinguiremos entre tres grupos o niveles (bajo rama (BR), suelo desnudo (SD), bajo pino (BP)) si nos encontramos en el pinar situado en Pórtugos o entre dos grupos (suelo cubierto (SC) y suelo desnudo (SD)) si estudiamos los flujos en el robledal de Cãñar. De esta forma, la idea es ver si existen diferencias significativas en los valores de flujo de suelo y otras variables ambientales de entre los diferentes grupos, en cada una de las zonas de estudio (Page et al., 2003).

Para el análisis de varianza ANOVA, se han de cumplir tres suposiciones (Ojeda, 2007; Quinn & Keough, 2002):

- Los distintos grupos de datos han de ser independientes.
- Los residuos de cada grupo deben de tener una distribución normal.
- Los grupos han de presentar varianzas iguales (homocedasticidad).

Antes de aplicar el ANOVA de un factor debemos asegurarnos del cumplimiento de estas tres asunciones. Para comprobar la normalidad de los residuos aplicaremos el test de Shapiro-Wilk y para la homocedasticidad el test de Levene o el test de Bartlett. Se asume la independencia de los datos ya que se tuvo en cuenta a la hora de realizar las medidas en las distintas salidas a campo. Para asumir que nuestros datos son homocedásticos y normales, al realizarle las dos pruebas debemos de obtener un valor p de significancia mayor a 0,05 para cada una, si no, significaría que alguna de ella no se cumple (Quinn & Keough, 2002).

Si no se cumplieran algunos de estos requisitos tendríamos que transformar la variable dependiente y realizar con ella las dos pruebas anteriores. Teniendo en cuenta que estamos trabajando con datos ecológicos, lo habitual es llevar a cabo una *transformación logarítmica* (Quinn & Keough, 2002):

$$x' = \log(x) \quad (6)$$

Una vez hayamos comprobado que se cumplan las tres asunciones con la nueva variable, aplicamos el test de ANOVA a nuestros datos. Si obtenemos $p < 0.05$ se rechaza la hipótesis nula, es decir se rechaza la hipótesis de no efecto del tratamiento sobre los valores de flujo obtenidos y por tanto se considera que este sí influye. Si aparece $p > 0.05$, ocurre al contrario, se rechaza la hipótesis alternativa de sí efecto del tratamiento sobre el flujo (Quinn & Keough, 2002).

Si queremos comparar tres o más grupos después de que el análisis de varianza nos haya indicado que el tratamiento aplicado afecta a nuestros datos medidos, tendremos que aplicar una prueba *post-hoc* o de *comparación múltiple* ya que el test ANOVA únicamente nos asegura si existe o no influencia del tratamiento sobre la variable dependiente que se estudia, pero no distingue entre que niveles se da esa significancia estadística que lleve al test de ANOVA a proporcionarnos dicho resultado (Page et al., 2003).

En el caso de que alguna de las asunciones no se cumpla aun habiendo transformado la variable dependiente, no se podrá realizar el test de ANOVA y por tanto tendremos que acudir a una alternativa no paramétrica. La prueba de Kruskal-Wallis es no paramétrica en el sentido de que no asume que la distribución de los datos sea normal pero sí considera que las varianzas de los distintos grupos deben ser similares. No trabaja con los datos directamente, sino con rangos de estos (Hollander et al., 1999; Quinn & Keough, 2002). De manera análoga al ANOVA, a través del p valor podremos concluir si el tratamiento influye significativamente sobre la variable que estudiemos.

Para complementar la información que nos proporcionan las pruebas estadísticas, haremos uso también de diagramas de caja para cada variable estudiada en las dos áreas de estudio.

El análisis estadístico completo se ha realizado con el software R a partir de Rstudio.

4. Resultados

4.1 Efecto del tratamiento aplicado sobre los flujos de carbono, temperatura y humedad de suelo.

La Figura 13 recoge los diagramas de caja de todas las variables analizadas en el pinar. En ella podemos observar que el rango de valores que abarcan las medidas en el pinar es prácticamente idéntico para los tres grupos ya que los cuartiles y los valores mínimos y máximos registrados para los flujos, la temperatura y la humedad de suelo, son prácticamente similares. Es decir, el tratamiento aplicado no produciría diferencias significativas entre los grupos de cada variable medida. Si es cierto que para la temperatura de suelo (Figura 13 c), los resultados no dejan duda de que el tratamiento no influye, pero en otros casos como en las medidas de flujo de CO_2 (Figura 13 a), el resultado que nos proporciona el diagrama de cajas no es concluyente.

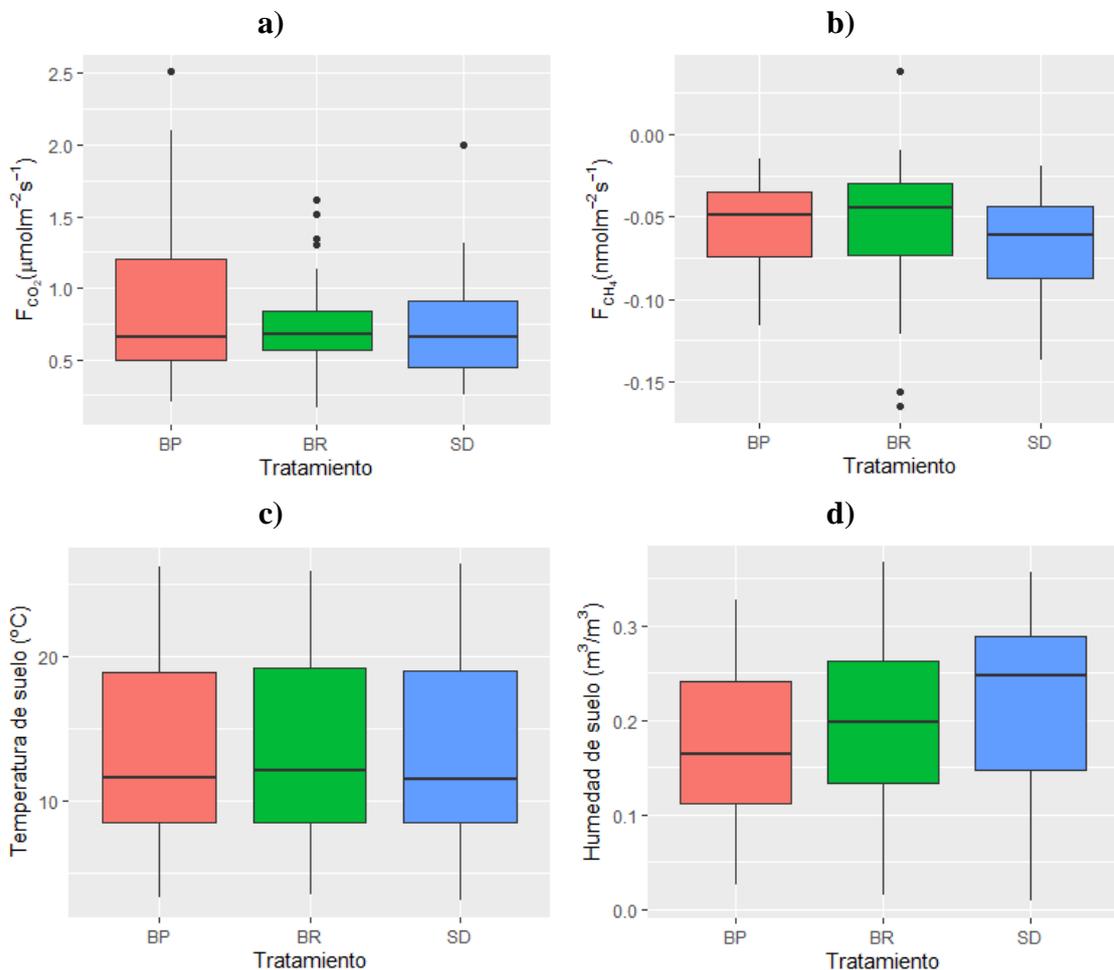


Figura 13. Diagramas de caja para las variables medidas en el pinar (Pórtugos). Respuesta del a) flujo de CO_2 (F_{CO_2}) emitido por el terreno al tratamiento, b) flujo de CH_4 (F_{CH_4}) emitido por el suelo, c) temperatura y d) humedad del suelo. El tratamiento está formado por tres grupos que hacen referencia a la zona de medida: bajo pino (BP) en rojo, bajo rama (BR) en verde y suelo desnudo (SD) en azul. Los cuartiles inferior y superior de cada una de las cajas corresponden a los percentiles 25 y 75 respectivamente. Los bigotes inferior y superior se extienden desde los cuartiles hasta los valores mínimos y máximos registrados no atípicos, respectivamente. Los puntos de color negro representan las medidas atípicas que se han registrado.

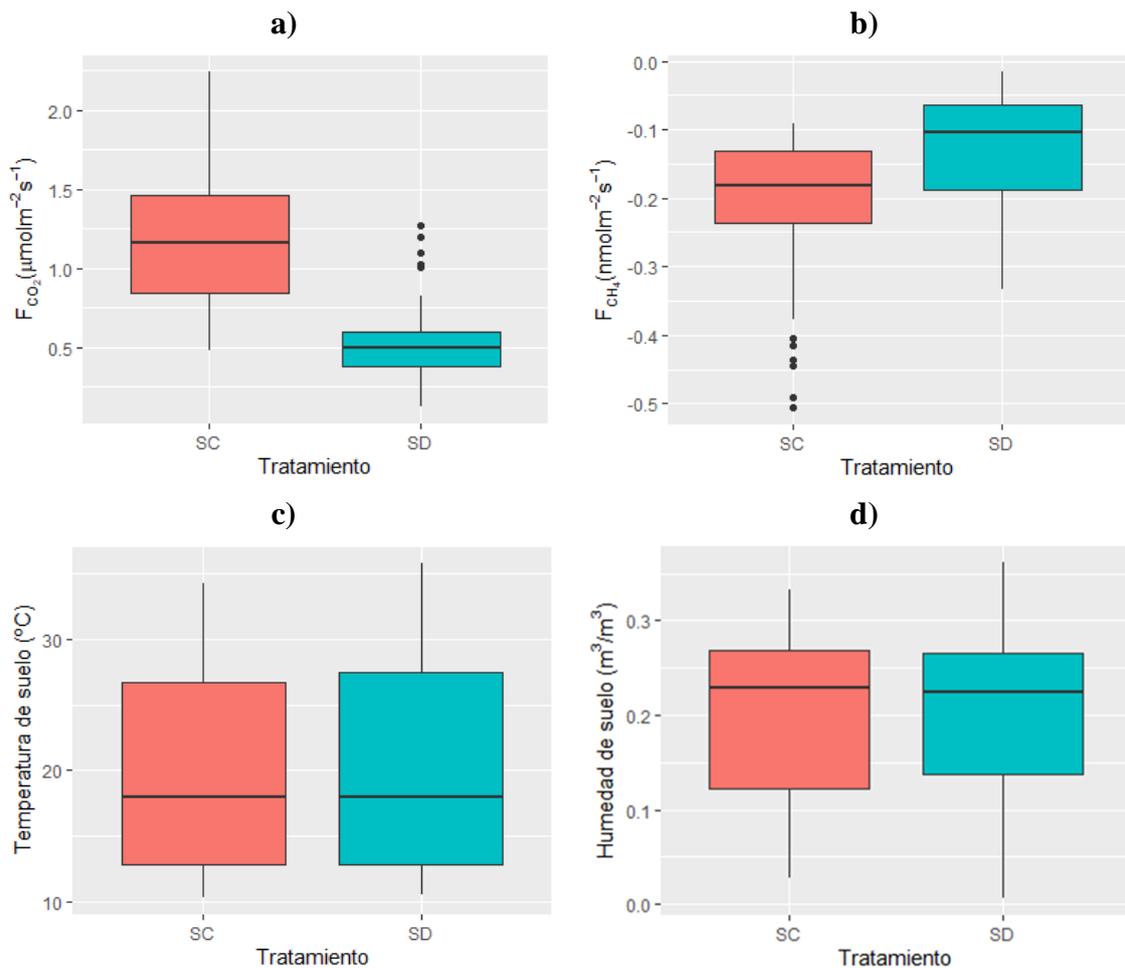


Figura 14. Diagramas de caja para las variables medidas en el robledal (Cáñar). Respuesta del flujo de CO_2 (F_{CO_2}) emitido por el terreno al tratamiento (superior izquierda), del flujo de CH_4 (F_{CH_4}) emitido por el suelo (superior derecha), de la temperatura (inferior izquierda) y de la humedad del suelo (inferior derecha). El tratamiento está formado por dos grupos que hacen referencia a la zona de medida: suelo cubierto (SC) en rojo y suelo desnudo (SD) en azul. Los cuartiles inferior y superior de cada una de las cajas corresponden a los percentiles 25 y 75 respectivamente. Los bigotes inferior y superior se extienden desde los cuartiles hasta los valores mínimos y máximos registrados no atípicos, respectivamente. Los puntos de color negro representan las medidas atípicas que se han registrado.

Fijándonos en el flujo de CO_2 emitido en el robledal, a partir de los diagramas de caja de la Figura 14, podemos observar que la mayoría de los valores obtenidos en suelo desnudo son menores que los que se miden en suelo cubierto. Concretamente, el 50% de las medidas registradas en suelo desnudo se encuentran por debajo de $0.5 \mu\text{molCO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, mientras que en suelo cubierto todas son superiores a esa cifra (Figura 14 a). Es decir, los rangos de valores de flujo de CO_2 en suelo cubierto y en suelo desnudo no se solapan, lo cual indica que, muy probablemente, existe una diferencia estadísticamente significativa entre los grupos.

De forma parecida ocurre para el flujo de CH_4 absorbido (Figura 14 b), pero en este caso al haber mayor dispersión en los valores registrados, existe un solapamiento entre las cajas. Hay mayor número de valores de flujo similares entre los dos grupos que no aclara el hecho de que ambos grupos sean diferentes de manera significativa.

En cambio, la temperatura y la humedad de suelo registran valores prácticamente idénticos en suelo cubierto y suelo desnudo, como nos indica la coincidencia casi total de las cajas (Figura 14 c y d).

Atendiendo ahora, al análisis estadístico que hemos realizado a las variables medidas en ambos emplazamientos, obtenemos los siguientes resultados.

Tabla 1. Parámetros obtenidos al realizar las pruebas de pertinentes para el análisis estadístico de los datos de flujo de dióxido de carbono (F_{CO_2}), flujo de metano (F_{CH_4}), temperatura y humedad del suelo en el pinar y en el robleal.

Análisis estadístico									
Lugar	Variable	Parámetro Prueba	W	Df	F-valor	Sum Sq	Mean Sq	χ^2	p-valor
Pinar	F_{CO_2}	Kruskal-Wallis	-	2	-	-	-	2.22	0.33
	F_{CH_4}	Shapiro-Wilk	0.99	-	-	-	-	-	0.94
		Levene	-	2	0.87	-	-	-	0.42
		ANOVA	-	2	2.04	1.33	0.66	-	0.14
	Temperatura de suelo	Kruskal-Wallis	-	2	-	-	-	0.06	0.97
Humedad de suelo	Kruskal-Wallis	-	2	-	-	-	3.68	0.16	
Robleal	F_{CO_2}	Shapiro-Wilk	0.99	-	-	-	-	-	0.14
		Levene	-	1	0.47	-	-	-	0.49
		ANOVA	-	1	165.51	28	28	-	$2 \cdot 10^{-16}$
	F_{CH_4}	Kruskal-Wallis	-	1	-	-	-	22.72	$1.9 \cdot 10^{-6}$
	Temperatura de suelo	Kruskal-Wallis	-	1	-	-	-	0.004	0.95
Humedad de suelo	Kruskal-Wallis	-	1	-	-	-	0.006	0.94	

W: coeficiente de concordancia, Df: grados de libertad, F-valor: estadístico F, Sum Sq: suma de los cuadrados, Mean Sq: media aritmética de la suma de los cuadrados, χ^2 : distribución de Pearson o distribución χ^2 , p-valor: valor de significancia estadística.

Analizamos primero la situación en el pinar, fijándonos en el flujo de CO_2 (Tabla 1). En este caso, al no cumplirse las asunciones de normalidad de los residuos y homocedasticidad, se realizó la prueba de Kruskal-Wallis que nos devuelve un p-valor = $0.33 > 0.05$. Este resultado nos confirma lo que ya se intuía con el diagrama de caja de la Figura 13. Dejar restos de tala en el suelo o no dejarlos no afecta al flujo de CO_2 emitido por el terreno. Y de la misma manera no existe una diferencia significativa entre los flujos medidos bajo los pinos y los obtenidos en sitios más alejados de estos y sus raíces.

Para el flujo de CH_4 , hemos realizado satisfactoriamente una prueba ANOVA, después de haber transformado logarítmicamente la variable flujo. Fijándonos en el p-valor, se obtiene un valor mayor a 0.05, es decir, la hipótesis nula de no efecto del tratamiento no puede ser rechazada y por tanto se concluye que el flujo de CH_4 emitido a escala de suelo en el pinar tampoco se ve influido por el tratamiento aplicado.

A los valores de temperatura y de humedad de suelo que se miden con el sensor de la cámara inteligente en el pinar, se les atribuye un p-valor de 0.97 y 0.16 respectivamente tras realizar la prueba de Kruskal-Wallis. De nuevo, esto significa que los valores registrados de estas variables ambientales son similares independientemente de si quedan depositados o no, sobre el suelo, restos de ramas procedente del clareo o de si medimos bajo pino o a escasos metros de estos.

La situación en el robledal es diferente. El flujo de CO_2 a escala de suelo emitido sí es significativamente diferente entre suelo cubierto por hojarasca y suelo desnudo, como ya observábamos en la Figura 14 y como nos confirma la prueba ANOVA devolviéndonos un p-valor muy pequeño (Tabla 1). De igual forma ocurre con el flujo de CH_4 , obtenemos un p-valor = $1.9 \cdot 10^{-6}$ de haber aplicado la prueba de Kruskal-Wallis, que nos asegura la diferencia significativa entre las medidas de los dos grupos que ya intuíamos con los diagramas de caja (Figura 14).

Para la temperatura y la humedad de suelo medidas en el robledal, obtenemos el mismo resultado que en el pinar, el tratamiento no afecta a estas variables ambientales, como así veíamos en la Figura 14 y como nos señala el p-valor > 0.05 obtenido en ambos casos (Tabla 1).

4.2 Variabilidad estacional de flujos de suelo de CO_2 y CH_4

En esta sección vamos a ver la variabilidad de los flujos de suelo de CO_2 y CH_4 con el tiempo, teniendo en cuenta que se comenzaron a tomar medidas a finales de invierno (marzo 2022) y concluyeron a finales de primavera (junio 2022).

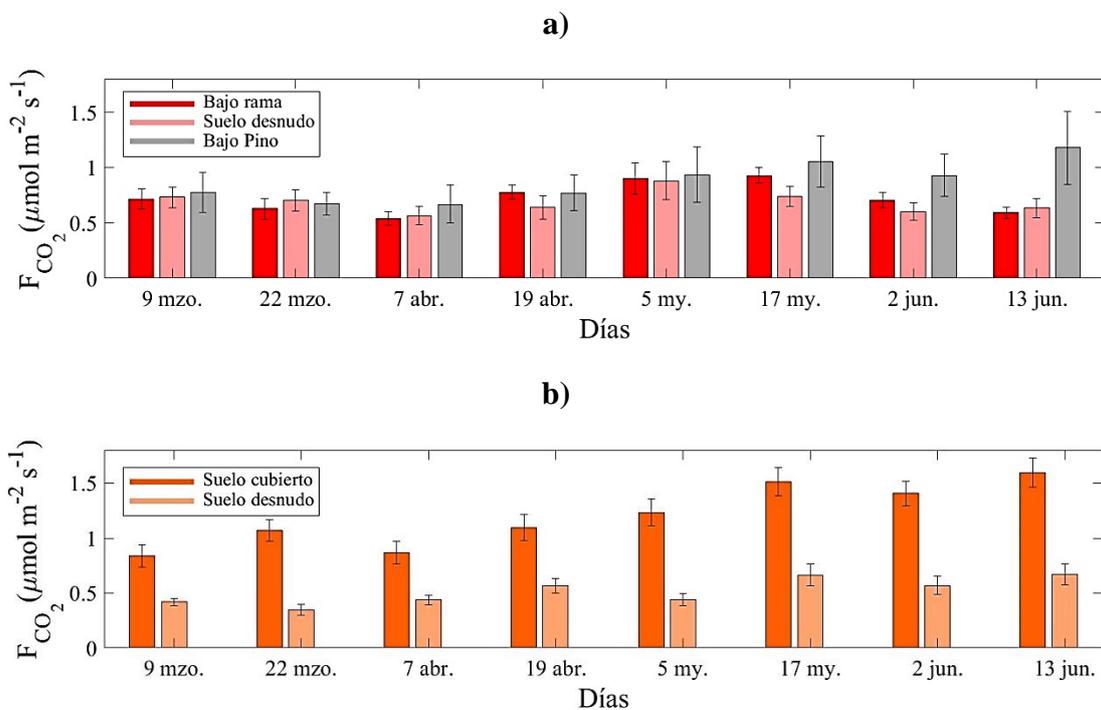


Figura 15. Variabilidad temporal de los promedios de flujo dióxido de carbono (F_{CO_2}) a escala de suelo en: a) una zona de pinar (Pórtugos) y b) en un robledal (Cáñar), dentro del Parque Nacional de Sierra Nevada. Cada barra representa el flujo promedio de CO_2 para 9 collares en cada grupo salvo en bajo pino (6 collares). El error estándar se representa sobre cada barra.

La Figura 15 muestra la evolución de los promedios de flujo de CO_2 en suelo de pinar (a) y en el robleal (b) a lo largo de los ocho días en los que se realizaron las campañas de medida. Ambos ecosistemas son fuentes de dióxido de carbono. En el pinar se aprecia un leve incremento de los flujos a medida que nos acercamos al verano, siendo más evidente este aumento justo debajo de los pinos que en zonas más alejadas. En el robleal el crecimiento de la emisión de CO_2 con el paso de los meses es más notorio. Los valores más altos de flujo se registran en suelo cubierto por hojarasca y los más bajos, sobre suelo desnudo, mientras que en el pinar se observan valores intermedios a los anteriores.

Además, para cada campaña de medida, podemos apreciar cualitativamente una cierta diferencia entre suelo cubierto por hojarasca y suelo desnudo en cuanto a la emisión de CO_2 , lo cual coincide con los resultados obtenidos en la sección 4.1 teniendo en cuenta todo el periodo de medida. Por ejemplo, el 17 de mayo el promedio de flujo de dióxido de carbono emitido en suelo cubierto alcanza $1.5 \mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ mientras que en suelo desnudo se registra $0.7 \mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

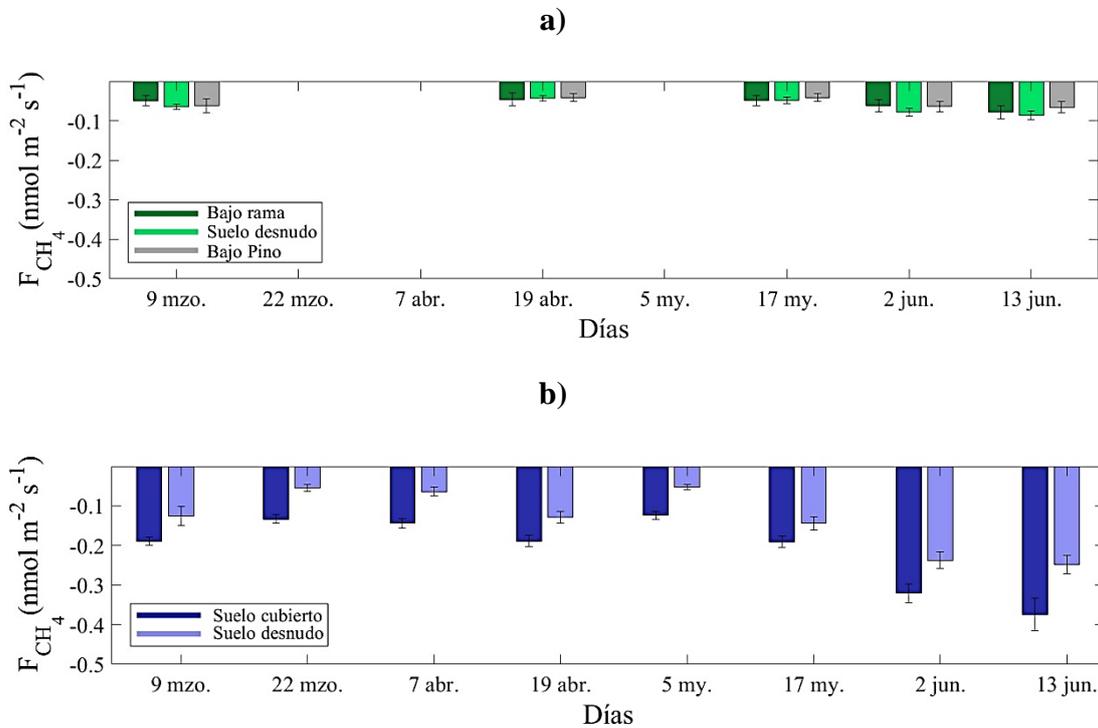


Figura 16. Variabilidad temporal de los promedios de flujo de metano (F_{CH_4}) asimilado por el suelo en: a) una zona de pinar (Pórtugos) y b) en un robleal (Cáñar), dentro del Parque Nacional de Sierra Nevada. Cada barra representa el flujo promedio de CH_4 para 9 collares en cada grupo salvo en bajo pino (6 collares). El error estándar se representa sobre cada barra. Los días 22 de marzo, 7 de abril y 5 de mayo, más del 50% de las medidas de flujos de metano que se registraron en el pinar presentaban un $R^2 < 0.82$ y optamos por desecharlas.

En la Figura 16 observamos la evolución de los promedios de flujo de CH_4 a escala de suelo en la zona de pinar (a) y en el robleal (b).

Como se puede apreciar, ambos emplazamientos son sumideros de metano, presentando el robleal mayor asimilación de este gas que el pinar.

Estadísticamente comprobamos que, en el pinar, dejar los restos del clareo sobre el terreno o retirarlos no afecta significativamente a la cantidad de metano absorbido por el suelo y

esto también se puede ver en la Figura 16 ya que los valores promedios son muy similares para los tres grupos. En ninguno de los ocho días de medida el flujo promedio de CH_4 supera los $-0.1 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, el valor más elevado se obtiene el 13 de junio cuando se alcanzan los $-0.086 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ sobre suelo desnudo, sin resto de tala. Tampoco se aprecia distinción entre los valores de flujo de CH_4 que se registran justo debajo del pino silvestre y los que se miden en localizaciones más apartadas (bajo rama y suelo desnudo).

De nuevo, en el robledal, sí se aprecia una diferencia más importante entre el CH_4 asimilado en suelo cubierto y en suelo desnudo, como también quedó demostrado en la sección anterior. La asimilación de metano es siempre mayor en suelo cubierto que en suelo desnudo, incrementándose ambas a medida que se aproxima el verano.

4.3 Relación entre los flujos de carbono y otras variables.

A continuación, vamos a analizar las relaciones que existen entre los flujos de CO_2 y CH_4 con la temperatura y la humedad de suelo medidas en el pinar y en el robleal.

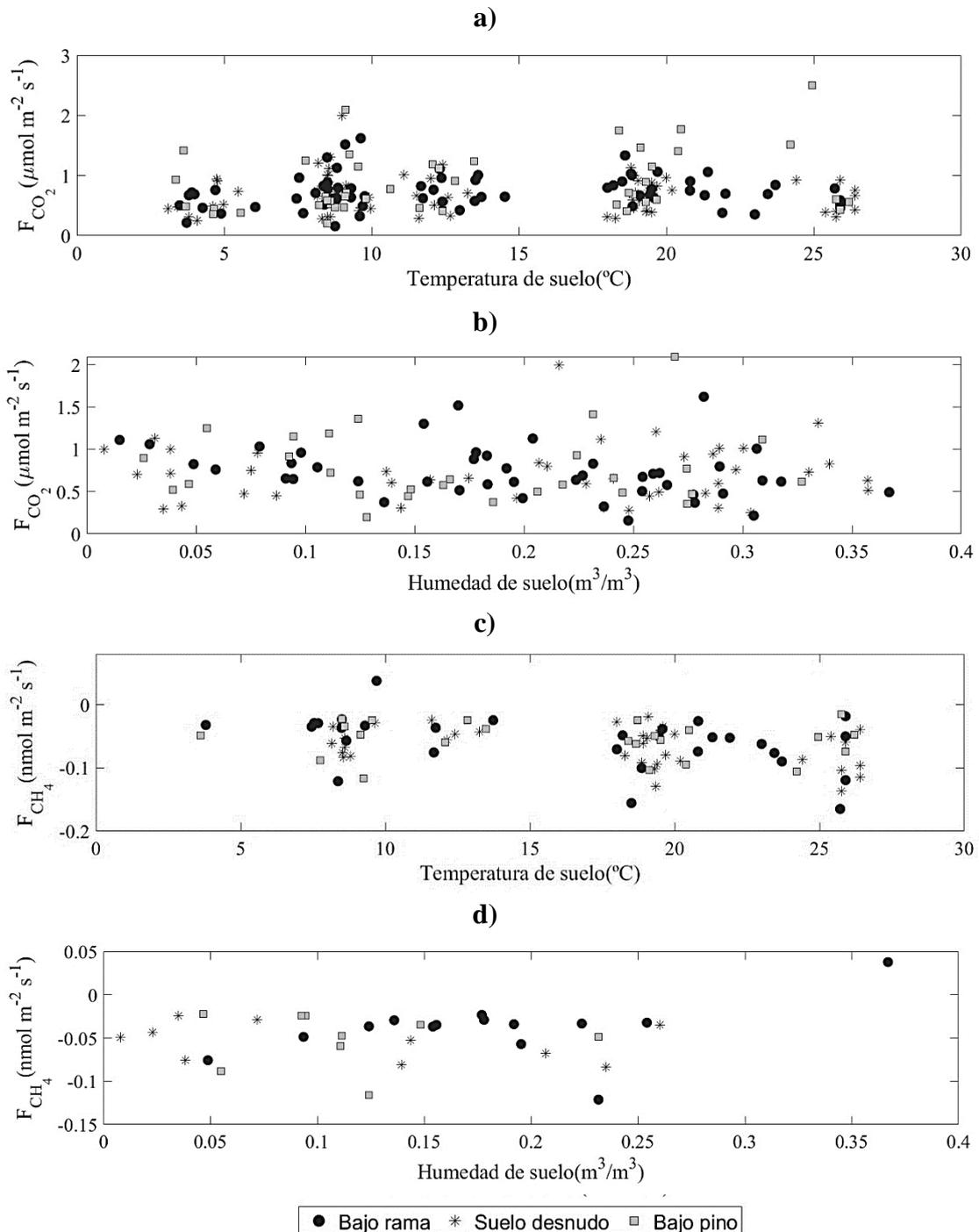


Figura 17. Valores de flujos de CO_2 y CH_4 (F_{CO_2} y F_{CH_4}) a escala de suelo frente a temperatura y humedad de suelo para cada collar instalado y para cada grupo (bajo rama, suelo desnudo y bajo pino) que forma el tratamiento en el pinar (Pórtugos).

La Figura 17 muestra los flujos de suelo medidos en el pinar frente a los valores de temperatura y humedad de suelo. En ella podemos comprobar que no existe una relación

entre los flujos de CO_2 y CH_4 con las variables ambientales. De hecho, el R^2 del ajuste lineal de los datos es menor a 0,1 en todos los casos.

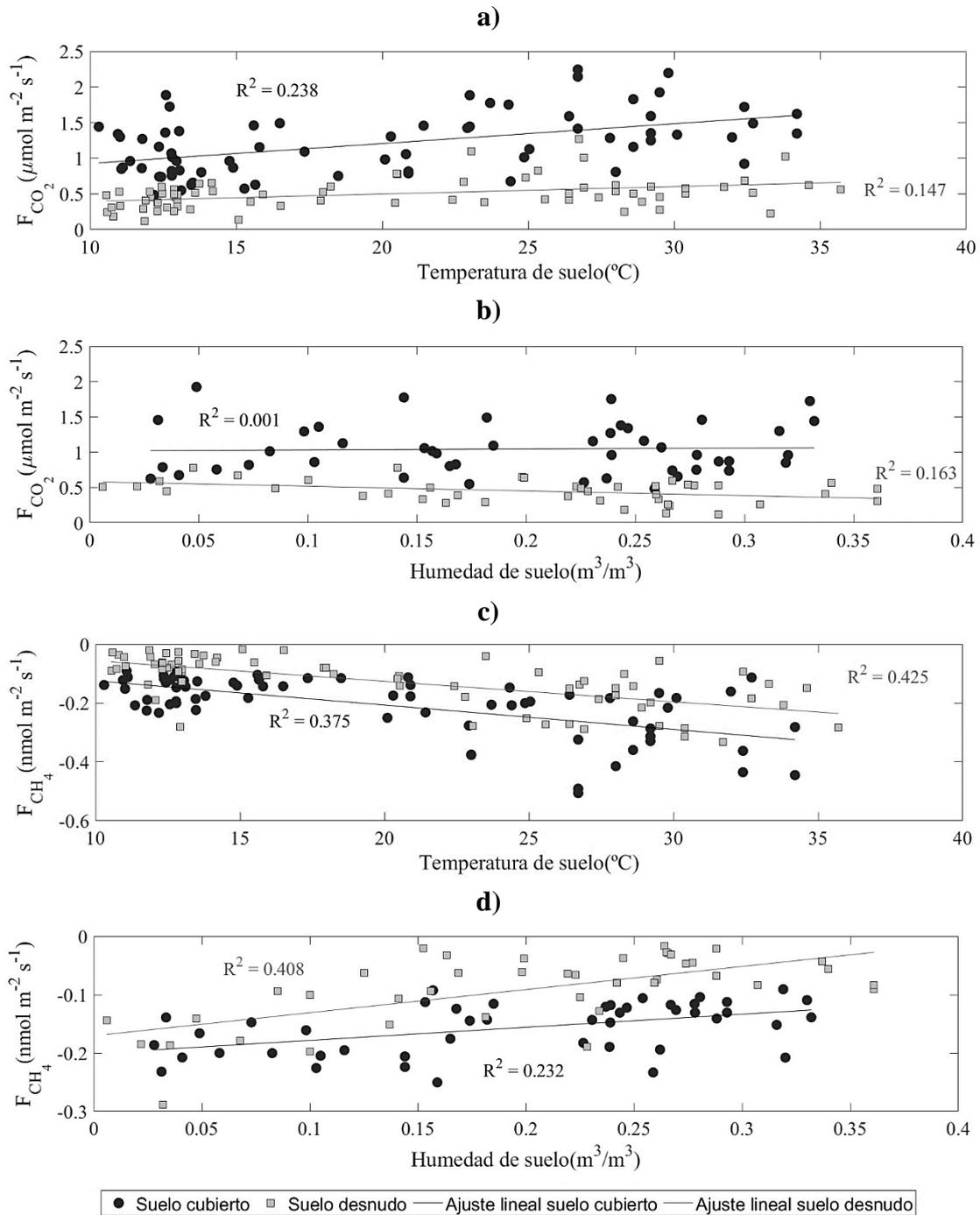


Figura 18. Valores de flujos de CO_2 y CH_4 (F_{CO_2} y F_{CH_4}) medidos a escala de suelo en el robledal (Cáñar) frente a temperatura y humedad de suelo registrada para cada collar instalado y para cada grupo que forma el tratamiento (suelo cubierto y suelo desnudo). Ajuste lineal de los datos junto con el valor de R^2 .

Las relaciones de los flujos de CO_2 y CH_4 con la temperatura y la humedad de suelo se recogen en la Figura 18. En este caso, tampoco se aprecia una clara relación entre los flujos de suelo y las variables ambientales. Aunque los valores de R^2 obtenidos son algo superiores a los del pinar, destacándose los registrados para el CH_4 ($R^2 \approx 0.4$). Observamos que cuanto mayor es la temperatura de suelo, mayor es la asimilación de CH_4 por el suelo (Figura 18 c). Por otro lado, a mayor humedad, los flujos se hacen más

pequeños. Asimismo, es posible ver la distinción que venimos comentando en los flujos entre suelo cubierto y suelo desnudo, obteniéndose siempre mayor emisión de CO₂ y mayor asimilación de CH₄ en suelo cubierto por hojarasca.

5. Discusión

Este estudio analiza los flujos de carbono de un pinar y un robleal en Sierra Nevada, con el objetivo de ver qué efectos producen en ellos un clareo previo realizado en la zona y estudiar su relación con variables ambientales como son la temperatura o la humedad de suelo.

En cuanto a la calidad de los datos obtenidos en las campañas de medidas hay que diferenciar entre los flujos de CO₂ y los flujos de CH₄. Los ajustes realizados para los valores de CO₂ medido en ambos lugares son muy buenos por tener asociados un valor de R² alto, por lo que se obtienen valores de flujos de CO₂ precisos. Sin embargo, durante los días 22 de marzo, 7 de abril y 5 de mayo, las regresiones exponenciales y lineales de la mayoría de las medidas de CH₄ en el pinar presentan valores de R² muy pequeños. Un ejemplo de esta situación lo recogemos en la Figura 19 donde adjuntamos a través del software SoilFluxPro, la medición de CH₄ para un collar en el pinar (a) y para un collar en el robleal (b), ambas realizadas el 5 de mayo: podemos ver que la regresión exponencial y lineal para la medida de CH₄ de un collar del pinar presenta un R² ≈ 0.16, frente al R² ≈ 0.999 que se obtiene en un collar del robleal. Esto quizás sea debido a la baja variabilidad de la concentración de CH₄ con el tiempo en el pinar.

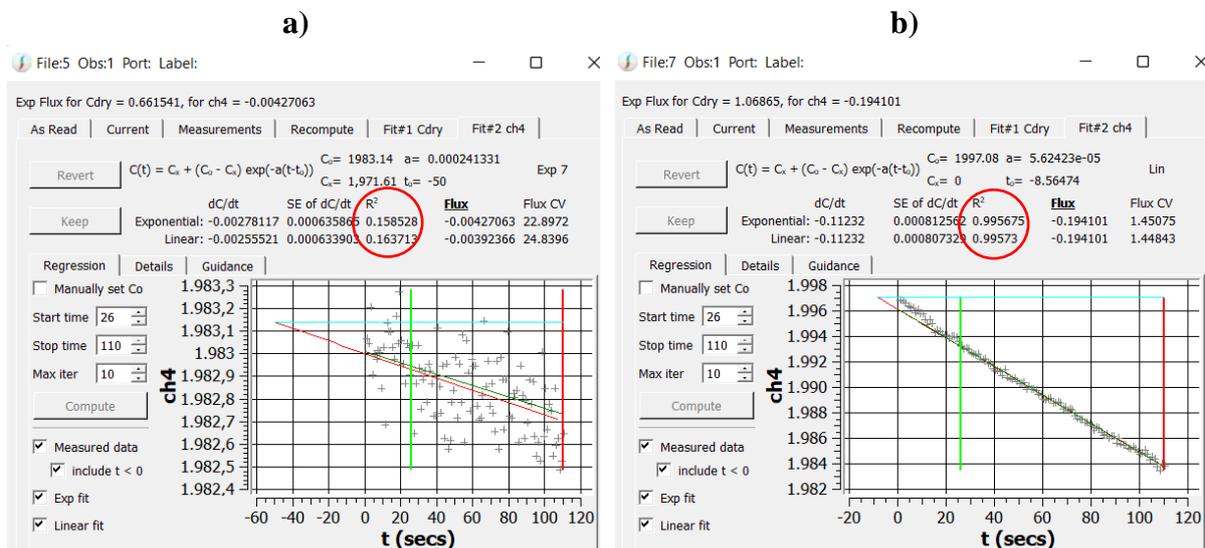


Figura 19. Visualización del software SoilFluxPro en la que se recoge una comparación de ajustes entre una medición de CH₄ en el pinar (a) y otra en el robleal (b) ambas realizadas el día 5 de mayo de 2022, a partir de las cuales se obtienen los valores de los flujos de CH₄.

Durante toda la época de medida que comprende de marzo a junio, los valores de flujo promedio de CO₂ que hemos obtenido en el pinar se encuentran comprendidos entre 0.5 μmolCO₂m⁻²s⁻¹ y 1 μmolCO₂m⁻²s⁻¹. Mientras que en el robleal para suelo cubierto se sobrepasa de 1 μmolCO₂m⁻²s⁻¹ la mayoría de los días e incluso los 1.5 μmolCO₂m⁻²s⁻¹ los días más cercanos al verano, y en cambio, en suelo desnudo no se registra mucho más de los 0.5 μmolCO₂m⁻²s⁻¹. Contextualizando los valores de flujo

de carbono obtenidos en este estudio con otros estudios ya publicados, constatamos que estos valores son algo más bajos que los registrados entre 2007 y 2008 en una zona de pinar también dentro del parque Natural y Nacional de Sierra Nevada, muy cercana a nuestras áreas de estudio. En este caso, se estudió la respiración del suelo después de que un incendio forestal devastara la zona en 2005. El objetivo era analizar el efecto del manejo de la madera quemada en la regeneración del ecosistema llevando a cabo tres tratamientos (“tala de árboles”, “sin intervención” y “corte más poda”). Se registraron flujos de CO_2 con valores entre $2\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y los $4\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ en la primavera de 2008 e incluso se llegaron a medir $10\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ en suelo donde se depositó parte de la rama procedente de la poda de los pinos quemados (Marañón-Jiménez et al., 2011).

Por otro lado, ya vimos que los niveles de flujo de CH_4 asimilados en suelo de pinar no sobrepasaban los $-0.1\text{nmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$, mientras que en el robledal se llegan a alcanzar los $-0.35\text{nmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$ en suelo cubierto frente a los $-0.25\text{nmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$ en suelo desnudo. Valores similares ($\approx -0.4\text{nmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$) se han medido en otros dos ecosistemas forestales de clima mediterráneo (uno situado en Monte Morello (Italia) y otro en Xanthi (Grecia)) formados por distintos ejemplares de pino, donde se realizaron procesos de clareo para ver los efectos que tenían a corto plazo en flujos de suelo y con el fin de mejorar la calidad de estos bosques (Mazza et al., 2019).

En cuanto al efecto que produce el tratamiento en la respiración del suelo, en el robledal, hemos visto que sí aparece una diferencia significativa entre flujos de carbono medidos en suelo cubierto y en suelo desnudo. La hojarasca que cubre el suelo en algunas zonas es importante por estar relacionada con el incremento de CO_2 atmosférico (Quinto Mosquera et al., 2007). El hecho de que el terreno esté cubierto por restos de hojas caídas implica mayor cantidad de materia orgánica, que al descomponerse produce principalmente CO_2 (Álvarez-Sánchez & Harmon, 2003). De esta forma si sobre el suelo hay una capa de hojas, este emitirá más cantidad de CO_2 , que un suelo desnudo con menos materia orgánica, tal y como se puede observar en la Figura 15 b). De manera parecida ocurrió en un bosque mixto formado por ejemplares de pino y roble en la provincia de Cuenca, donde se analizó la influencia del clareo y de la recuperación del bosque tras un incendio forestal en la respiración de suelo. También analizaron el tipo de cubierta del suelo y se registraron flujos de CO_2 en una masa forestal no gestionada ni inalterada, ligeramente más altos en suelo cubierto por plantas herbáceas que en suelo desnudo (López-Serrano et al., 2016). Asimismo, los flujos de CH_4 absorbidos en suelo cubierto y en suelo desnudo en el robledal, también presentan diferencias significativas. La asimilación de CH_4 es siempre mayor en suelo cubierto que en suelo desnudo y esto puede ser debido a la presencia de microorganismos metanotrofos que utilizan como fuente de carbono el metano para su crecimiento y que posiblemente habiten en el suelo cercano a los robles y cubierto por sus hojas (Anthony, 1983).

En el pinar se ha podido comprobar estadísticamente que no hay diferencias significativas entre un suelo cubierto por restos de ramas del clareo, suelo desnudo y bajo pino (Figura 13 y Tabla 1). Sin embargo, si observamos campañas concretas, parece que los valores promedios de flujo de CO_2 justo debajo de los pinos se incrementan levemente respecto a los otros dos en los tres últimos días de mediciones (Figura 15 a). Esto puede ser debido

a la proximidad de las raíces del árbol en esta zona de medida. Allí, la respiración autótrofa de las raíces se incluye en la respiración total del suelo. Asimismo, hay que tener en cuenta que, a partir de la fotosíntesis, las plantas producen compuestos orgánicos que pasan de las raíces a la rizosfera (parte del suelo inmediata a las raíces de las plantas) y una vez allí los microorganismos heterótrofos del suelo la consumen. Con una mayor cantidad de materia orgánica que descomponer, el aporte de CO₂ a la atmósfera por la respiración de estos microorganismos se verá también incrementado (Atkin et al., 2000; Field et al., 2000).

La temperatura y la humedad de suelo no han afectado significativamente a la respiración del suelo de los dos ecosistemas estudiados. Este resultado nos lleva a pensar que los flujos de carbono analizados dependen en mayor parte de otros factores no medidos en este estudio, como puede ser el tipo de suelo o diferentes poblaciones de microorganismos que puedan habitar en él. Aunque en el suelo de pinar estudiado no se aprecie relación alguna de los flujos con estas variables ambientales (Figura 17), en el robledal de Cañañer sí que hemos observado una leve dependencia de los flujos con las variables ambientales (Figura 18). A mayor temperatura y menor humedad de suelo, aumenta la emisión de CO₂ y la asimilación de CH₄, como cabía esperar. Esta relación sí se ha observado en otros estudios, donde se demuestra una muy fuerte dependencia de los flujos de carbono con la temperatura y la humedad de suelo. Por ejemplo, en un bosque de coníferas de Sierra Nevada se registraron ajustes de flujo de CO₂ frente a la temperatura de suelo medida a 10 centímetros de profundidad con $R^2 > 0.8$ (Qi & Xu, 2001).

Por otro lado, señalar que llama la atención el hecho de que en el robledal se registre el mismo rango de temperatura en suelo cubierto que en suelo desnudo (Figura 14 c), ya que este último, al contrario que el primero, está expuesto directamente al sol. En el pinar ocurre igual (Figura 13 c), sin embargo, no nos sorprende, ya que toda la zona queda sombreada gracias a las copas de los árboles. Asimismo, es interesante comentar el amplio rango de temperaturas que se registra frente a la poca variabilidad en los flujos de suelo durante todo el periodo de medida, lo cual probablemente pueda deberse a la existencia de otros factores que limitan la respiración del suelo.

Estos resultados podrán completarse y analizarse con más profundidad en un futuro ya que lo que aquí tratamos forma parte de un estudio preliminar, que comenzó en marzo y que continuará con el fin de estudiar otros factores y de tener un mayor rango temporal con el que estudiar el cambio estacional de flujos de carbono entre otras variables. Además, se prevé que la región mediterránea que estudiamos sufra una pronunciada disminución de las precipitaciones junto con un aumento de las temperaturas en los próximos años (Giorgi & Lionello, 2008; Savi et al., 2016), lo cual hace aún más interesante el estudio de la evolución de los flujos de carbono, así como de las posibles medidas que se pueden llevar a cabo para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero.

6. Conclusiones

La respuesta de dos ecosistemas forestales de clima mediterráneo al clareo y a la gestión de los residuos que se ha llevado a cabo en ellos, ha sido distinta en cuanto a la respiración del suelo. En el pinar (*Pinus sylvestris*) no ha provocado efectos significativos entre los flujos de carbono ya que obtenemos valores promedios casi idénticos en las distintas zonas tratadas. Sin embargo, en el robledal (*Quercus pyrenaica*) hemos comprobado que la hojarasca del suelo incrementa notablemente los flujos de CO₂ y CH₄ respecto a los medidos en suelo desnudo.

Aunque estadísticamente no sea significativo, es cierto que los flujos de CO₂ emitido justo debajo de los pinos parecen despuntar durante los últimos días de medidas. Junto con las temperaturas más elevadas, creemos que el papel de las raíces de los árboles en estas zonas juega un papel fundamental.

Por otro lado, hemos visto que la temperatura y la humedad de suelo no dominan los flujos de manera relevante en ninguno de los dos ecosistemas estudiados, aunque sí se aprecia un incremento en la emisión de CO₂ y en la asimilación de CO₄ en las últimas campañas de medidas, coincidiendo con el aumento de las temperaturas y la disminución de la humedad. Es por ello por lo que se piensa que existen otros elementos que condicionan en mayor medida la respiración del suelo en estos bosques.

Los procesos de clareo son necesarios para regenerar la superficie forestal perdida y mejorar la calidad de los bosques. Así como para estudiar el efecto que puedan producir en la respiración del suelo, la cual abarca una gran serie de factores que aquí no se han medido pero que con su estudio completarían nuestros resultados, como, por ejemplo, analizar la hojarasca del robledal o estudiar el flujo de carbono subterráneo que a menudo es ignorado (Aun et al., 2021). La respuesta de los flujos de suelo a los diferentes tratamientos que se puedan aplicar en los ecosistemas forestales se está convirtiendo en un tema, cada vez, más recurrente, pero aún es bastante desconocido y queda mucho por investigar.

7. Referencias

- Álvarez-Sánchez, J., & Harmon, M. E. (2003). *Ecología del suelo en la selva tropical húmeda de México* (J. Álvarez-Sánchez & E. Naranjo-García, Eds.; Primera). Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Biología, Facultad de Ciencias.
- Anthony, C. (1983). The Biochemistry of Methylootrophs. In *FEBS LETTERS* (Vol. 160, Issue 1).
- Atkin, O. K., Edwards, E., & Loveys, B. R. (2000). Response of root respiration to changes in temperature and its relevance to global warming. In *REVIEW New Phytol* (Vol. 147).

- Aun, K., Kukumägi, M., Varik, M., Becker, H., Aosaar, J., Uri, M., Morozov, G., Buht, M., & Uri, V. (2021). Short-term effect of thinning on the carbon budget of young and middle-aged Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands. *Forest Ecology and Management*, 492. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119241>
- Azizi-Rad, M., Guggenberger, G., Ma, Y., & Sierra, C. A. (2022). Sensitivity of soil respiration rate with respect to temperature, moisture and oxygen under freezing and thawing. *Soil Biology and Biochemistry*, 165, 108488. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108488>
- Bond-Lamberty, B., Wang, C., & Gower, S. T. (2004). A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration? *Global Change Biology*, 10(10), 1756–1766. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00816.x>
- Chen, W., Wolf, B., Yao, Z., Brggemann, N., Butterbach-Bahl, K., Liu, C., Han, S., Han, X., & Zheng, X. (2010). Annual methane uptake by typical semiarid steppe in Inner Mongolia. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 115(15). <https://doi.org/10.1029/2009JD013783>
- Core Writing Team, Pachauri, R. K., & Meyer, L. (2014). *IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report*.
- de Cara García, J. A. (2004). *Características ecológicas y climáticas de los pinares ibéricos de Pinus Sylvestris L.*
- Field, C. B., Ball, J. T., & Berry, J. A. (2000). *Photosynthesis: principles and field techniques*.
- Giorgi, F., & Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63(2–3), 90–104. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.09.005>
- Gómez-Aparicio, L., Zavala, M. A., Bonet, F. J., & Zamora, R. (2009). Are pine plantations valid tools for restoring Mediterranean forests? An assessment along abiotic and biotic gradients. *Ecological Applications*, 19(8), 2124–2141. <https://doi.org/https://doi.org/10.1890/08-1656.1>
- Gower, S. T. (2003). Patterns and Mechanisms of the Forest Carbon Cycle. *Annual Review of Environment and Resources*, 28(1), 169–204. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.050302.105515>
- Harazono, Y., Iwata Hiroki, Sakabe, A., Ueyama, M., Takahashi, K., Nagano, H., Nakai, T., & Kosugi, Y. (2015). Effects of water vapor dilution on trace gas flux, and practical correction methods. *Journal of Agricultural Meteorology*, 71(2), 65–76. <https://doi.org/10.2480/agrmet.D-14-00003>
- Hollander, M., Wolfe, D. A., & Chicken, E. (1999). *Nonparametric Statistical Methods* (Tercera). Wiley.

- Junta de Andalucía. Consejería de agricultura, ganadería, pesca y desarrollo sostenible. (n.d.). *Carpeta informativa del Parque Nacional Parque Natural de Sierra Nevada*.
- LI-7810 Trace Gas Analyzer. Instruction Manual. (2021). In *LI-COR*.
- López-Serrano, F. R., Rubio, E., Dadi, T., Moya, D., Andrés-Abellán, M., García-Morote, F. A., Miettinen, H., & Martínez-García, E. (2016). Influences of recovery from wildfire and thinning on soil respiration of a Mediterranean mixed forest. *Science of the Total Environment*, *573*, 1217–1231. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.242>
- Marañón-Jiménez, S., Castro, J., Kowalski, A. S., Serrano-Ortiz, P., Reverter, B. R., Sánchez-Cañete, E. P., & Zamora, R. (2011). Post-fire soil respiration in relation to burnt wood management in a Mediterranean mountain ecosystem. *Forest Ecology and Management*, *261*(8), 1436–1447. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.01.030>
- Mazza, G., Agnelli, A. E., Cantiani, P., Chiavetta, U., Doukalianou, F., Kitikidou, K., Milios, E., Orfanoudakis, M., Radoglou, K., & Lagomarsino, A. (2019). Short-term effects of thinning on soil CO₂, N₂O and CH₄ fluxes in Mediterranean forest ecosystems. *Science of The Total Environment*, *651*, 713–724. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.241>
- Morote, F. A. G., Abellán, M. A., Rubio, E., García, E. M., Saucedo, F. G., Córdoba, M. I. P., & Serrano, F. R. L. (2022). Productivity and Seasonality Drive Total Soil Respiration in Semi-Arid Juniper Woodlands (*Juniperus thurifera* L., Southern Spain). *Forests*, *13*(4). <https://doi.org/10.3390/f13040538>
- Ojeda, L. R. (2007). *Probabilidad y estadística básica para ingenieros con el soporte de MATLAB para cálculos y gráficos estadísticos*.
- Page, M. C., Braver, S. L., & MacKinnon, D. P. (2003). *Levine's Guide to SPSS for Analysis of Variance* (2nd ed.).
- Qi, Y., & Xu, M. (2001). Separating the effects of moisture and temperature on soil CO₂ efflux in a coniferous forest in the Sierra Nevada mountains. In *Plant and Soil* (Vol. 237).
- Quinn, G. P., & Keough, M. J. (2002). *Experimental design and data analysis for biologists*. Cambridge University Press.
- Quinto Mosquera, H., Ramos Palacios, Y. A., & Abadía Bonilla, D. (2007). Cuantificación de la caída de hojarasca como medida de la productividad primaria neta en un bosque pluvial tropical en Salero, Chocó, Colombia. *Revista Institucional Universidad Tecnológica Del Chocó D.L.C.*, 28–41.
- Savi, F., di Bene, C., Canfora, L., Mondini, C., & Fares, S. (2016). Environmental and biological controls on CH₄ exchange over an evergreen Mediterranean forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, *226–227*, 67–79. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.05.014>

Sierra Nevada. Diversidad biológica. (n.d.). Ministerio Para La Transición Ecológica y El Reto Demográfico.

SoilFluxPro Software. Instruction Manual. (n.d.). In *LI-COR*.

Thomas, S. C., Halpern, C. B., Falk, D. A., Liguori, D. A., & Austin, K. A. (1999). Plant diversity in managed forests: understory responses to thinning and fertilization. *Ecological Society of America*.

Using the Smart Chamber. Soil Gas Flux Survey Chamber. (2021). In *LI-COR*.

Valbuena-Carabaña, M., & Gil, L. (2014). Efectos de la gestión selvícola pasada y presente sobre la diversidad genética actual y futura de *Quercus pyrenaica* Willd. en Sierra Nevada. *Ecosistemas*.