

**Medición de la Respiración del Suelo en
Ecosistemas Mediterráneos
Con Sistemas de Cámaras y Analizadores Tipo
IRGA**

Luis Miguel Oviedo Bocanegra

Tutor: Andrew S. Kowalski

Departamento de Física Aplicada. Universidad de Granada.

Tutor: Andrew S. Kowalski

**Proyecto de Investigación. Master de Geofísica y Meteorología
2006/2007. Universidad de Granada.**

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Calentamiento Global y CO ₂	1
1.2. El papel fundamental de suelo los ecosistemas terrestres.	2
1.3. Nuestra Aportación: Flujos de CO ₂ de suelo en ecosistemas mediterráneos	5
2. INSTRUMENTACIÓN Y METODOLOGÍA.....	7
2.1. Instrumentación	7
2.2. Teoría de medición de aparatos dotados de IRGA.....	9
2.3. Cómo calculan los instrumentos el flujo de CO ₂ de suelo?.....	10
2.4. Emplazamientos e instalaciones.....	13
2.4.1. Lanjarón.....	13
2.4.2. La Cortijuela.....	16
2.5. Tipos de campañas.....	17
3. RESULTADOS.....	20
3.1. Resultados de las comparativas.....	20
3.1.1. A. La Cortijuela.....	20
3.1.2. B. Lanjarón.....	22
3.2. Resultados de las medidas espaciales.....	23
3.2.1. A. La Cortijuela.....	23
3.2.2. B. Lanjarón.....	25
4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	26
5. REFERENCIAS.....	28

Medición de la Respiración del Suelo en Ecosistemas Mediterráneos Con Sistemas de Cámaras y Analizadores Tipo IRGA

Luis Miguel Oviedo Bocanegra

Departamento de Física Aplicada. Universidad de Granada.

Tutor: Andrew S. Kowalski

Abstract. La respiración de suelo es la mayor componente de la respiración del ecosistema. En este estudio se han revisado conceptos fundamentales de los instrumentos más importantes a la hora de medir respiración de suelo de una forma directa: Dynamic Closed Chamber. Se han comparado dos instrumentos, el Li-8100 (Li-Cor Lincoln, NE, Li) y el EGM-4 (PP-Systems, Hitchin, UK, PPs). Respecto al Li, el PPs ha subestimado el flujo en un sitio y sobreestimado en otro. Esta diferencia ha podido deberse a la variabilidad en el contenido de agua del suelo. Posteriormente se comentan algunos resultados obtenidos usando estos dos instrumentos y aplicando la corrección diferente para cada emplazamiento.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Calentamiento Global y CO₂

El Calentamiento Global (Global Warming) es en la actualidad uno de los mayores problemas mundiales que preocupan tanto a gran parte de la comunidad científica, como a los sectores gubernamental, empresarial y social. Dicha preocupación se constató con el protocolo de Kioto. A partir de él, la comunidad científica comenzó a investigar con más empeño los mecanismos que regulan los ciclos de dichos gases en el planeta

(Matear RJ, Hirst AC, 1999; Mitchell JFB, Johns TC, Gregory JM, et al., 1995; Vitousek PM, Aber JD, Howarth RW, et al., 1997). Debido a la implicación del hombre en la emisión dióxido de carbono a la atmósfera, el ciclo que regula dicho gas necesita especial atención. El ciclo del carbono, que es el movimiento global del carbono entre el ambiente abiótico y los organismos, es la suma de los flujos de cuatro importantes depósitos: reservas de carbón orgánico, la atmósfera, los océanos y la biosfera terrestre. Dentro de este ciclo, podemos dividir en tres partes bien diferenciadas:

- Uno es la emisión de dióxido de carbono a la atmósfera de origen antropogénico por el uso de combustibles fósiles y la modificación del uso del suelo.
- El otro es el que equilibra el CO₂ que el océano capta de la atmósfera con el que libera hacia ella, generando un flujo negativo (captación por parte del océano)
- El tercero es el que equilibra la fotosíntesis con la emisión de dióxido de carbono hacia la atmósfera mediante la respiración: respiración de los seres vivos y respiración del suelo.

1.2 El papel fundamental de los ecosistemas terrestres

Las emisiones promedio de CO₂ debido a la actividad humana superan la suma de la acumulación en la atmósfera y los flujos hacia los océanos y la litosfera, siendo necesario un sumidero de 2-4 GtC/yr para equilibrar el balance de carbono. Los ecosistemas terrestres podrían ser los que actúan como sumideros de CO₂. La relación entre producción de carbono y descomposición de materia orgánica determina si un sistema es un sumidero o es una fuente de CO₂ atmosférico (Pumpanen et al 2004). Se estima que una tercera parte de las emisiones a la atmósfera por parte del uso de combustibles fósiles es asimilada por los ecosistemas terrestres. (Schimel et al., 2001). Estudios isotópicos soportan esta misma teoría: el ecosistema terrestre es el responsable de que la tasa de incremento de CO₂ en la atmósfera no sea tan elevada como era de esperar (Houghton, 2002).

Numerosos estudios han tenido como objetivo tratar de descubrir qué tipo de ecosistemas terrestres son aquellos que ejercen un papel fundamental como sumidero de CO₂:

- En bosques templados: *Wofsy, S. C., M. L. Goulden, et al. (1993).*
- En bosques tropicales: *Grace, J., J. Lloyd, et al. (1995).*
- En espartal: *Suyker, A. E. and S. B. Verma (2001).*
- En matorral: *Serrano-Ortiz, P., A. S. Kowalski, et al. (2005).*
- En desierto: *Hastings, S. J., W. C. Oechel, et al. (2005).*
- En cultivo: *Anthoni, P. M., A. Freibauer, et al. (2004).*

El flujo neto¹ de CO₂ es la variable que se usa para estudiar los intercambios entre los ecosistema terrestre y la atmósfera (net ecosystem exchange, NEE). Se puede decomponer en: flujo debido a la actividad fotosintética que fija el CO₂ atmosférico y flujo debida a la respiración que libera CO₂ a la atmósfera. La respiración del ecosistema (TER o “Total Ecosystem Respiration”) se compone de la respiración de la cobertera foliar, del tejido leñoso y de las raíces de los árboles (AR, o respiración autotrófica del suelo) así como de la respiración de los microorganismos del suelo (respiración heterotrófica del suelo, HR) (*Janssens & Lankreijer et al. 2001*). La suma entre las respiraciones autotróficas y la heterotrófica del suelo es lo que se denomina SR o **Respiración de Suelo (Soil Respiration)**

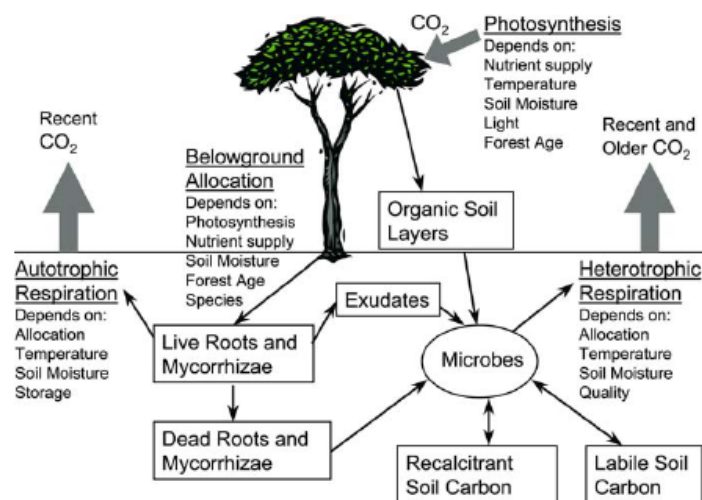


IMAGEN 1 Esquema extraído de Ryan amp Law (2005)

¹ Se define como flujo de CO₂ de suelo a la cantidad de dióxido de carbono que se intercambia entre la atmósfera y el suelo medido por unidad de superficie y por unidad de tiempo. Las unidades que se utilizan más habitualmente son $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$

La respiración del suelo es la componente que más aporta a la respiración total, del ecosistema, (*Janssens & Lankreijer et al. 2001; Nay and Bormann, 2000; Ryan and Law, 2005; Schlesinger and Andrews, 2000, Rey et al., 2002*). Es fundamental medirla con precisión porque la materia orgánica del suelo al contener más del doble de carbono del que se encuentra en la atmósfera, pequeños cambios en este almacén de CO₂ pueden repercutir fuertemente en la concentración de dióxido de carbono atmosférico (*Post et al., 1982; Jenkinson, 1991*) Es sabido que la respiración de suelo depende de la temperatura y humedad del suelo, por ello, un aumento de la temperatura en el clima puede provocar un aumento en el flujo de CO₂ de suelo (retroalimentación positiva, *Jenkinson et al., 1991*) Estudios se oponen a esta teoría sosteniendo que la respiración de suelo únicamente depende de la temperatura del mismo (*Lloyd & Taylor, 1994*), no siendo cierto en los ecosistemas mediterráneos, el cual es altamente sensible al contenido en agua del suelo (*Amundson et al., 1989, Kaye & Hart, 1998*)

A pesar de la relevancia que está adquiriendo el suelo en el balance del carbono, aún existen muchas lagunas de conocimiento en ecosistemas donde las sequías y la falta de agua son una constante, en particular en ecosistemas mediterráneos (*Reiger & Schlesinger, 1995; West et al., 1994; Raich & Potter, 1995*) Aunque el 35% de la superficie terrestre global pertenece a ecosistemas áridos y semiáridos, y supone el 16% de la biomasa global total (*Atjay et al., 1979; Shmida, 1985; Emanuel et al., 1985*), estos ecosistemas han sido de poco interés, y gran parte de los estudios se han centrado en bosques y en cultivo, dejando a otro tipo de ecosistemas que pueden jugar un papel importante en el futuro balance del ciclo del carbono.

Existen varios métodos para medir flujos de CO₂, con grandes diferencias en precisión, resolución espacial y temporal y aplicabilidad. Aquí comentaremos las tres técnicas más comunes:

- Static Closed Chamber (o SCC): en ellos, una cámara se cierra herméticamente sobre una porción de suelo durante un tiempo determinado (normalmente entre 20 y 60 minutos). Pasado ese tiempo, el aire se extrae se analiza en otro analizador de gas externo.

- Dynamic Closed Chamber, o DCC. Este tipo de instrumentos se diferencia del anterior en que el aire se mezcla dentro de todo el sistema de medición, haciéndolo pasar por un IRGA (definir) u otro tipo de analizador. Este tipo de instrumentos es más reciente que los de tipo SCC.
- Eddy Covariance (EC) Este sistema está compuesto de un anemómetro sónico y un IRGA, a la vez que se miden la velocidad del viento en las tres componentes espaciales y la proporción de CO₂ en el aire a alta frecuencia (10 Hz o más)

Las técnicas con cámaras estáticas sirven tanto para medir CO₂ por absorción como por colecta. El método de “soda lime” se usa frecuentemente porque es económico, fácil de usar y particularmente adecuado cuando la variabilidad espacial es alta. De todas maneras, los instrumentos con cámaras estáticas tienden a subestimar flujos altos, y se han considerado de peor calidad que los instrumentos con cámaras dinámicas.

Se han desarrollado dos líneas con cámaras dinámicas usando Infrared gas analyzer (IRGA). En cámaras cerradas con sistema IRGA el aire circula a lo largo de un circuito entre la cámara y el IRGA externo. Los sistemas de cámara abierta (open-chamber system) tienen un flujo constante de aire a través de la cámara, y la proporción de CO₂ dentro y fuera se vigila constantemente. En estos sistemas, el aire no circula, pero se desplaza hacia la atmósfera. Los sistemas “open chamber” son extremadamente sensibles a diferencias de presión entre la cámara y la atmósfera.

En sistemas de cámara cerrada, el balance de presión entre la cámara y la atmósfera se consigue gracias a un tubo a adecuadamente diseñado, capaz de minimizar las fugas. Otro problema de importancia relacionado con los sistemas con cámara es la eliminación de la turbulencia ambiental. (*Janssens et al, 2000*)

1.3 Nuestra Aportación: Flujos de CO₂ de suelo en ecosistemas mediterráneos

Dada la necesidad de aunar datos de diferentes ecosistemas mediterráneos en el Este de Andalucía, al haber realizado mediciones con diferentes instrumentos, era imprescindible realizar una ínter comparación de instrumentos para la futura unificación de datos e ínter comparación entre lugares de estudio. Además, debido al carácter directo que tienen las medidas de flujo de CO₂ con cámaras de suelo, éstas ayudarán a

mediciones de tipo Eddy Covariance para ayudarle en validación de datos e información adicional.

Otro objetivo de nuestro trabajo era encontrar patrones específicos de comportamiento en lo que a flujo de CO₂ se refiere en parcelas donde se están llevando a cabo diferentes experimentos de estrategias post incendio (Lanjarón) y de escenarios de cambio climático (La Cortijuela)

2. INSTRUMENTACIÓN Y METODOLOGÍA

2.1 Instrumentación

Los instrumentos que vamos a usar son de la categoría DCC (Dynamic Closed Chamber) y los dos disponen de un IRGA

LI-8100 (Li)

El Li-8100 (Li-Cor Lincoln, NE), es un sistema automatizado portátil preparado para comunicación inalámbrica que se compone de dos dispositivos: una cámara de suelo con una bomba de aire que la hace subir y bajar y una unidad de control donde se encuentra el IRGA. Las dimensiones de la cámara son de $15.2 \times 15.2 \times 25.4$ cm. El volumen total del sistema es de 1105,2 cm³.



IMAGEN 2 Li-8100 (Li-Cor Lincoln, NE)

PP-Systems(PPs)

EGM-4 (PP-Systems, Hitchin, UK) (PPs de ahora en adelante) junto con una cámara de respiración de suelo SRC-1 (PP-Systems, Hitchin, UK). La cámara es cilíndrica con unas dimensiones de 15 de alto por 10 cm. de diámetro. Viene equipado con un ventilador para mezclar el aire.



IMAGEN 3 PP-Systems, Hitchin, UK

Para la consistencia de las mediciones, es necesario utilizar unos cilindros o “collares” de PVC de 10 centímetros de alto, que se introducen en el suelo a una profundidad de 6-7 cm.

Hay varias diferencias de configuración entre los instrumentos (Tabla 1), aunque su filosofía sea la misma. Quizás la diferencia más importante entre los dos instrumentos sea la capacidad del Li de medir vapor de agua, de la cual el PPs carece. Más adelante explicaremos con más detalle que supone esta diferencia.

TABLA 1. Li vs PPs

Characteristic	Li-8100 (Li)	PP-System(PPS)
Precision	1,5%	1%
Funcionamiento	Automatizado	Manual
Aproximación	lineal o exponencial	lineal o cuadrática
Rango de medidas	0- 3 000 ppm	Rango de medidas de CO ₂ :0-100 000 ppm
Tipo IRGA	Rayo infrarrojo no dispersivo	Rayo infrarrojo no dispersivo
Longitud de onda IRGA	Desconocido	4.26 μm
Movimiento del aire	Bomba de aire	Ventilador
Instrumentación en la cámara	No	No
Instrumentación en IRGA Bench	Termómetro, Barómetro	Barómetro
Rectificación por humedad	Si	No

2.2 Teoría de medición de aparatos dotados de IRGA

IRGA o Infra-red Gas Analyzer es un haz de luz infrarroja que incide sobre una muestra de aire dentro de un recinto o “IRGA bench”. Como el dióxido de carbono tiene una banda de absorción muy fuerte a en el infrarrojo, los IRGA’s emiten de forma importante a ese espectro de onda. Dependiendo de dicha absorción, la radiación que llega a un sensor decrece y se puede conocer que cantidad de moléculas de CO₂ existe en la muestra de aire.

Según la Ley de Beer-Bouguer-Lambert,

$$\frac{dI_{\lambda}}{I_{\lambda}} = -k_{a\lambda}\rho ds$$

siendo ρ la densidad del medio.

Integrando sobre el camino atravesado,

$$I_{\lambda}(s_1) = I_{\lambda}(0) \exp\left\{-\int_0^{s_1} k_{a\lambda}\rho ds\right\} = I_{\lambda}(0)e^{-\tau_{\lambda}}$$

Si el medio es homogéneo, $k_{a\lambda}$ no depende del camino recorrido,

$$I_{\lambda}(s_1) = I_{\lambda}(0)e^{-k_{a\lambda}u}, \text{ con } u = \int_0^{s_1} \rho ds$$

Para conocer el coeficiente de absorción del CO₂, necesitamos saber la masa óptica u . Este dato es conocido, es la longitud del banco óptico del IRGA.

Sabiendo la radiación emitida y recibida en el sensor, podemos conocer el coeficiente de absorción $k_{a\lambda}$ y así calcular la proporción de CO₂ en la muestra de aire.

Para expresar la cantidad de un componente traza presente en un fluido, además de la densidad, podemos usar otras series de variables. En la Tabla 2 se resumen las definiciones de las variables usadas para expresar la cantidad de CO₂ presente en relación al aire atmosférico así como las condiciones o procesos bajo las que resultan conservativas.

TABLA 2. Variables para la medición de CO₂

Variable	Densidad de CO₂ ρ_c	Razón de mezcla c	Fracción molar χ	Fracción molar por aire seco χ_d
Definición	Masa de CO ₂ por unidad de volumen de aire	Masa de CO ₂ por masa de aire seco	Moles de CO ₂ por moles de aire total	Moles de CO ₂ por mol de aire seco
Unidades (SI)	Kg m ⁻³	kg kg ⁻¹	mol mol ⁻¹	mol mol ⁻¹ (de aire seco)
Evapotranspiración (difusión de vapor de agua)	No conservativo	Conservativo	No conservativo	Conservativo

2.3 ¿Cómo calculan los instrumentos el flujo de CO₂ de suelo?

El flujo se puede definir como, $F_c = \frac{\Delta\rho V}{\Delta t A}$, una masa de aire que pasa por un área en un tiempo determinado. Para que el flujo esté bien definido, ρ tiene que estar medido en unidades de densidad (unidad de masa por unidad de volumen).

Los instrumentos de tipo IRGA son capaces de medir variaciones ρ_c . El problema medir ρ_c es que si hay aumentos de vapor de agua en la muestra de aire, sus moléculas desplazarán a las de CO₂, provocando una subestimación de la densidad de CO₂, como podemos comprobar en la tabla. Además, el vapor de agua es absorbente a varias franjas de longitud de onda en el infrarrojo, entre la que se encuentra cercano a 4 micrómetros, lo que provocaría una sobreestimación de la proporción de CO₂ presente en la muestra de aire. Necesitamos pues una variable que no se vea perturbada por la presencia de vapor de agua. Por este inconveniente en el diseño de este tipo de analizadores, los sistemas Li y PPs recurren a soluciones distintas:

En vez de usar ρ_c , para calcular el flujo de CO₂ el sistema Li utiliza la variable χ_d , fracción molar por aire seco, que como hemos visto se conserva por difusión de vapor de agua. Se define como $\chi_d = 29/44 c$, porque, según la Ley de los Gases Ideales,

$$\rho_c = \frac{P_c}{R_c T}, \text{ y } \rho_d = \frac{P_d}{R_d T}$$

Luego

$$\frac{\rho_c}{\rho_d} = \frac{P_c/R_c T}{P_d/R_d T} = \frac{P_c}{P_d} k, \Rightarrow \chi_d = cK$$

Siendo,

P_c, P_d	Presión parcial de CO ₂ y de aire seco
T	Temperatura del aire
R_c, R_d	Constante de los gases ideales para el CO ₂ y el aire seco
ρ_c	Densidad del CO ₂
ρ_d	Densidad del aire seco.

$K = k^{-1} = 29/44$, la relación entre las masas moleculares, y $\frac{P_c}{P_d} = \chi_d$ la fracción molar de aire seco (ppm) (gracias a la Ley de las Presiones Parciales)

Esta variable no se ve perturbada por la adición de vapor de agua, ya que es función de la razón de mezcla, que es independiente de éste.

Para calcular χ_d , se siguen varios pasos

1. El Li mide Presión y Temperatura dentro de la cámara, con ella obtienen la densidad del aire.
2. Gracias a su IRGA, el Li mide densidad del CO₂ ρ_c .
3. Usando otra vez el IRGA, también mide ρ_w , y dado que $\rho_w = \rho \chi_w$, calcula la fracción molar de vapor de agua.
4. Al ser $\rho = \rho_d + \rho_c + \rho_w$, obtenemos la densidad del aire seco.
5. Con $\frac{\rho_c}{\rho_d} K = \chi_d, \Rightarrow \chi_d = c \frac{29}{44}$, ya tenemos lo que buscábamos.

Una vez calculada el incremento de la fracción molar, el Li usa la siguiente fórmula para el cálculo del flujo:

$$F_c = \frac{10VP_0 \left(1 - \frac{W_0}{1000}\right)}{RS(T_0 + 273,15)} \frac{\partial \chi_d}{\partial t}$$

donde,

F_c es el flujo de CO₂ medido en $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

V es el volumen del instrumento (cm^3)

P_0 es la presión inicial (kPa)

W_0 es la fracción molar del vapor de agua ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)

T_a es la temperatura del aire

S es el área de la cámara

$\frac{\partial \chi_d}{\partial t}$ es la variación de fracción molar de CO₂ corregido por vapor de agua.

Para calcular el flujo con esta fórmula, necesitamos conocer los valores iniciales de P , T , χ_w y χ_d . Los tres primeros son fácilmente calculables, calculando el corte con la recta de regresión con el eje $t=0$. Para calcular χ_d usa aproximación exponencial $\chi_d(t) = \chi_d^x + (\chi_d^0 - \chi_d^x)e^{-a(t-t_0)}$ siendo χ_d^x el parámetro de la asíntota, y a el parámetro del ajuste.

Hemos visto como calcula el Li el flujo de CO₂, veremos ahora como lo calcula el PPs:

El PPs no puede calcular la densidad de vapor de agua, no tiene instrumento que lo haga. Sí que puede calcular la densidad del aire, ya que dentro del banco óptico tiene un barómetro, y el aparato ajusta la temperatura a 45°C. Así pues, el PPs no da valores χ en vez de χ_d .

A pesar de que el PPs calcula el flujo, nosotros lo hacemos usando como dato χ , medido en ppm, y haciendo la siguiente transformación:

1 ppm CO₂ = 1 $\mu\text{mol/mol}$ aire

1 mol gas \approx 22.414 l en STP.

$$1ppmCO_2 = 1 \frac{\mu mol CO_2}{mol aire} \times \frac{1 mol aire}{22.414 l aire} \times \frac{1 l aire}{0.001 m^3} = 44,6199 \mu mol CO_2 m^{-3} aire$$

$$CO_2 flux (\mu mol m^{-2} s^{-1}) = \frac{\Delta CO_2 (\mu mol m^{-3})}{\Delta t (s)} \times \frac{volumen camara (m^3)}{superficie collar (m^2)}$$

Aquí está la diferencia más importante que podemos encontrar entre el PPs y el Li, y es que el PPs, al no tiene un medidor de humedad que pueda rectificar por vapor de agua las mediciones de densidad CO₂, las muestras de aire con vapor de agua hace que el Li mida valores altos pero buenos, y el PPs subestime la densidad de CO₂.

Fórmulas de rectificación por volumen

Tuvimos que recalcular el flujo para añadir al volumen total del sistema el que cada collar aporta. También hay que rectificar por el área del collar, ya que es distinto al área de la cámara. Así pues a la fórmula del flujo para ambos instrumentos, tiene que dividirse por el volumen del sistema/Área cámara y multiplicarse por el volumen total/área del collar, siendo volumen total = volumen cámara + volumen collar.

Durante la investigación, se ha trabajado en dos diferentes emplazamientos, que describiremos a continuación:

2.4 Emplazamientos e instalaciones

Lanjarón

La zona de estudio está situada en la loma de Lanjarón, emplazado en el Parque Natural de Sierra Nevada, reserva de la Biosfera en el SE de la Península Ibérica. La zona sufrió un incendio en el verano de 2005, y posteriormente se practicaron varios tratamientos post-incendios para optimizar la recuperación de la biodiversidad y vegetación de la zona. Las estrategias que se realizaron son las siguientes:

- **Tratamiento Ramas:** Corte de todos los árboles, desramado y troceado de los troncos en 2-3 trozos con objeto de facilitar el contacto con el suelo. La biomasa dejada in situ con este tratamiento es igual a la del tratamiento Control, pero con árboles tumbados.
- **Tratamiento Control:** Madera dejada en pie, sin tumbar (no intervención).
- **Tratamiento Extracción:** Corte de todos los árboles, retirada de los troncos, y ramas trituradas según procedimientos habituales.

Hay dos localizaciones objeto de estudio, a dos alturas diferentes: Parcela 1 a una altura de 1700 metros y Parcela 4 a una altura de 2200 metros sobre el nivel del mar. Sobre ambas se realizaron las mismas estrategias post-incendio. La vegetación predominante de la zona es Pino silvester (*Pinus silvester*) y matorral mediterráneo de bajo porte.

Configuración de la instalación

Se instalaron 80 collares de 10,5 cm. de diámetro, y 9 cm. de altura a una profundidad de 6 cm. Hay 40 collares en “Ramas”, y 20 en “Control”, y 20 en “Extracción”. La configuración de los collares es según dos transectos, de 10 collares cada uno, (excepto en ramas con 20 cada), habiendo en cada terraza un collar de cada transecto. Las terrazas tienen una diferencia altitudinal de 1 metro aproximadamente. La distancia entre los transectos es de 10 m y la distancia entre collares de un mismo transecto es 5 m. Los transectos fueron colocados orientados en sentido creciente de cada colina. La distribución de los collares fue:

- 40 collares en la zona de tratamiento “Ramas” con 20 collares debajo de ramas y otros 20 en suelo desnudo;
- 20 collares en “Control”, y
- 20 en el tratamiento “Extracción”



IMAGEN 4 Tratamiento Ramas, Parcela 4. En rojo, la dirección de los transectos de collares



IMAGEN 5 Tratamiento Control, Parcela 1. En rojo, la dirección de los transectos de collares



IMAGEN 6 Tratamiento Extracción, Parcela 4. En rojo, la dirección de los transectos de collares

La Cortijuela

En el Jardín Botánico de La Cortijuela (dentro del Parque Natural de Sierra Nevada, 1600 m), se encuentra un recinto de 12 ha vallado, donde aparecen porciones de bosque, matorral y claros. Se está llevando un experimento que cruza dos factores fundamentales: agua, con 3 niveles (riego, control, reducción del 35%), y luz, con 3 niveles (bosque, matorral caducifolio y claros sin vegetación). Cada 20 días se suministra agua a los cuadros de riego. La reducción de agua de los cuadros de exclusión se lleva a cabo gracias a una estructura sobre el mismo, con unas listas de metacrilato que reducen la cantidad de precipitación. Esta instalación está preparada para realizar medidas de CO₂ con cámaras de suelo.

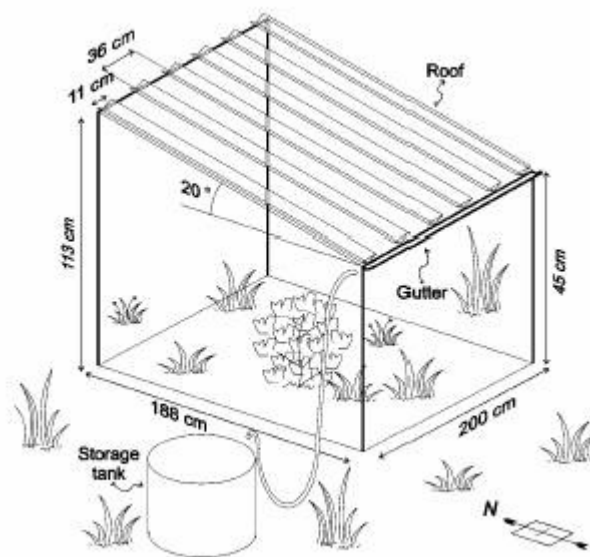


IMAGEN 7 Esquema de un cuadro de exclusión de riego, emplazado en La Cortijuela.

Configuración de la instalación: Hay 162 collares repartidos en los tres ecosistemas y en los tres tratamientos de la siguiente forma:

- 54 collares en Open
- 54 collares en Bosque
- 54 collares en Matorral

La configuración de los mismos es en cuadros de 2x2 metros, separados entre ellos una distancia de unos 20 cm., habiendo tres collares en cada cuadro, mayoritariamente situados en tres de las esquinas. En los tres ecosistemas hay 18 collares en riego, 18 en control y 18 en exclusión.

2.5 Tipos de campañas

A día de hoy se han realizado multitud de salidas de campo que describiremos a continuación.

Campaña de instalación de collares: Consiste en seleccionar la zona de investigación, definir los criterios de posicionamiento de los collares en el suelo, teniendo en cuenta la vegetación, altura media de la zona, configuración del paisaje, etc. El número de collares a instalar es variable e inversamente proporcional al grado de uniformidad del

lugar. Esta forma de proceder tiene como objetivo representar fielmente la variabilidad de la zona, y abarcar la máxima superficie posible. Se han realizado instalaciones de collares en dos emplazamientos: **Lanjarón y La Cortijuela**.

- Comparativas de instrumentos: Campañas de comparación de instrumentos para poder unificar los datos de los dos instrumentos y poder realizar comparaciones de ecosistemas y tratamientos. Durante la misma se miden con ambos instrumentos de forma secuencial en los mismos collares. Ambos instrumentos miden el flujo de CO₂ durante 90 segundos. El número de medidas simultáneas deben ser lo mayor posible, siempre mayor de 10. La diferencia de tiempo entre mediciones puede ser de 1 a 5 minutos. Hasta el momento se han realizado dos campañas de comparación: el 26 de Julio del 2007 en La Cortijuela, y el 31 de Octubre en Lanjarón.

En La Cortijuela se midieron 54 collares en los tres distintos emplazamientos (open, matorral y bosque en ese orden) y con 18 representantes de cada tratamiento. Se tuvieron que descartar todas las medidas de Open debido a un fallo de instrumentación. Se realizó posteriormente un análisis de outliers, con el paquete estadístico Statistica 6.0. Los datos descartados se alejaban más de dos veces la desviación típica de la serie. Después de este análisis, 29 fueron los datos que hemos usado, de los cuales 10 eran de exclusión, 10 de riego y 9 de control.

En Lanjarón se midieron 54 collares, repartidos en 20 bajo ramas, 20 en suelo desnudo y 14 en Control. Después de desechar datos por erróneos y del posterior análisis de outliers, 48 fueron los datos que restaron, siendo 16 bajo rama, 12 de Control y 20 de suelo desnudo.

- Campañas de medidas espaciales: Provistos de los dos instrumentos PPs y Li, medimos cada collar simultáneamente para poder cubrir la mayor parte de terreno. Las mediciones tienen una duración de 90 segundos. A la misma vez se toman datos de temperatura de suelo a una profundidad de entre 5-7 cm., medición de la cobertura vegetal verde (viva), muerta o suelta, y altura libre al suelo de los collares para la posterior corrección del flujo por el volumen del

collar. Hasta el momento, este tipo de campañas han tenido lugar en **Lanjarón y La Cortijuela**.

- Campañas de medidas temporales: Usamos la capacidad automática del Li para que realice medidas de un único collar durante 24 horas. La campaña se basa en elegir adecuadamente un collar según varios factores (flujo medio de anteriores campañas espaciales similar al flujo medio, collar representativo de la zona en la que se mide) y preparar el suministro externo de energía del aparato para recogerlo al día siguiente (una batería de coche). Este tipo de campañas han tenido lugar en La Cortijuela y en Lanjarón.

3. RESULTADOS

Vamos a presentar algunos datos de interés obtenidos durante las campañas. Por su importancia reflejaremos los resultados en las dos campañas de comparación de instrumentos, y posteriormente veremos datos de campañas espaciales en Lanjarón y La Cortijuela.

3.1 Resultados de las Comparativas

A. *Li frente a PPs en La Cortijuela*

Se realizó una primera comparativa de instrumentos en La Cortijuela, el día 26 de Julio de 2007. La desviación de la relación 1 a 1 varía según los distintos tratamientos de Riego: desde +6,3% hasta -4% en Exclusión (Tabla 3).

TABLA 3. *Relaciones y correlaciones entre los sistemas Li y PPs*

La Cortijuela	Relativo al Li	R ²
Control	1,0067	0,8412
Bajo Rama	<u>1,0634</u>	<u>0,7394</u>
Suelo desnudo	0,9604	0,8651
Mixto	0,9412	0,8631

A pesar de esto, al unificar los datos, se determina que el sistema PPs subestima las medidas de referencia (tomando como reales las medidas proporcionadas por el Li). Se obtuvieron muy buenos resultados en esta comparativa (Imagen 8) donde los resultados del sistema PPs eran un 6,6% más bajos, junto a una correlación muy alta con un R² de 0,8997 a un 95% de confianza. (n=29).

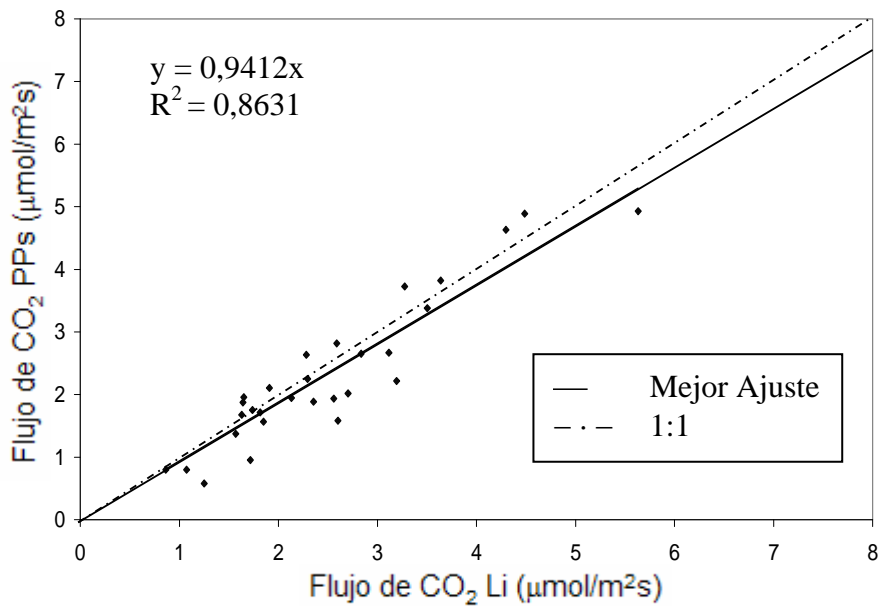


IMAGEN 8 Mejor aproximación a los datos obtenidos por ambos instrumentos en La Cortijuela, y su relación con la bisectriz $y=x$. La aproximación lineal se ha forzado a pasar por el cero.

Para comprender mejor la comparación entre los instrumentos, hallamos las medias de los flujos en cada uno de los tratamientos de riego durante la jornada de comparación. que sistemáticamente (pero no significativamente) el promedio de las medidas tomadas por el sistema Li era más alto que el PPs: diferencias a favor del Li de $0,075 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ en Exclusión, $0,13 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ en Control y $0,315 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ en Riego. (Imagen 8)

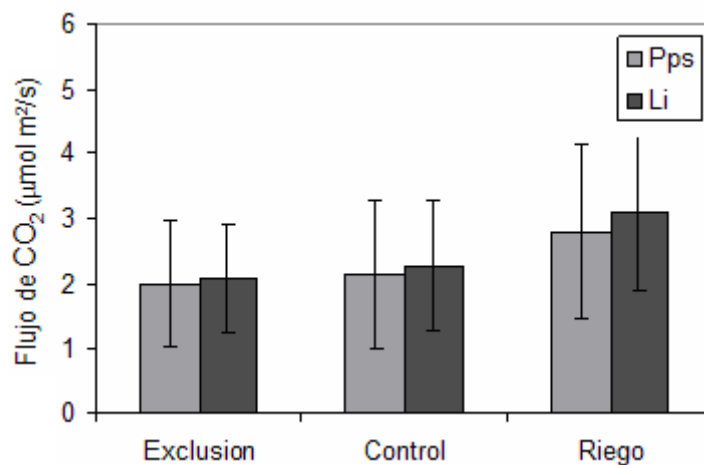


IMAGEN 9 Flujo medio ($n=29$) (\pm desviación típica) diferenciado por tratamientos de riego en La Cortijuela en la campaña de comparación del 31 de Octubre 2007.

B. Li frente a PPs en Lanjarón

En Lanjarón se realizó una segunda campaña de comparación, ésta el 31 de Octubre. En esta ocasión, los datos del sistema PPs, en media, fueron mas altos que los del Li, esta vez un 6,7% (Imagen 10). Ambos métodos están muy bien correlados ($R^2 = 0,868$, $n=48$)

TABLA 4. Relaciones y correlaciones entre los sistemas Li y PPs

Lanjarón	Relativo al Li	R ²
Control	1,0134	0,9477
Bajo Rama	1,1557	0,837
Suelo desnudo	1,0208	0,8416
Mixto	1,0675	0,868

Las diferencias entre el Li y el PPs varían con el tipo de tratamiento. Las diferencias van desde +15% bajo rama, hasta +1,3% en Control. Si se unifican todos los datos, se induce que el PPs mide un 6,7% más que el sistema Li(Tabla 4)

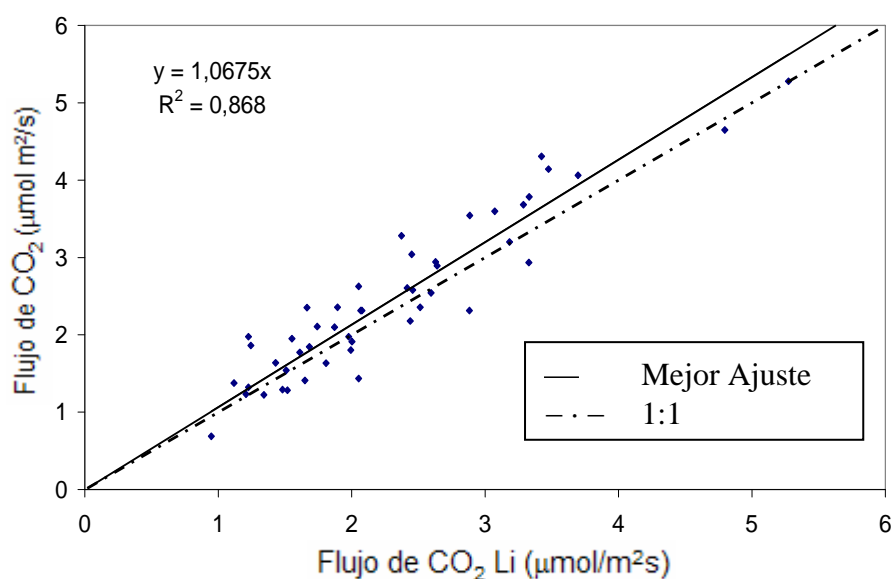


IMAGEN 10 Mejor aproximación a los datos obtenidos por ambos instrumentos en Lanjarón, y su relación con la bisectriz $y=x$. La aproximación lineal se ha forzado a pasar por el cero

En este ecosistema, al contrario de lo que ocurrió en La Cortijuela, el PPs da valores más altos tanto en Bajo rama como en suelo desnudo. No así en Control, aunque las diferencias son mínimas diferencias a favor del PPs de $0,47 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ en collares “bajo ramas”, $0,036 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ en suelo desnudo y $-0009 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ en Control (Imagen 11).

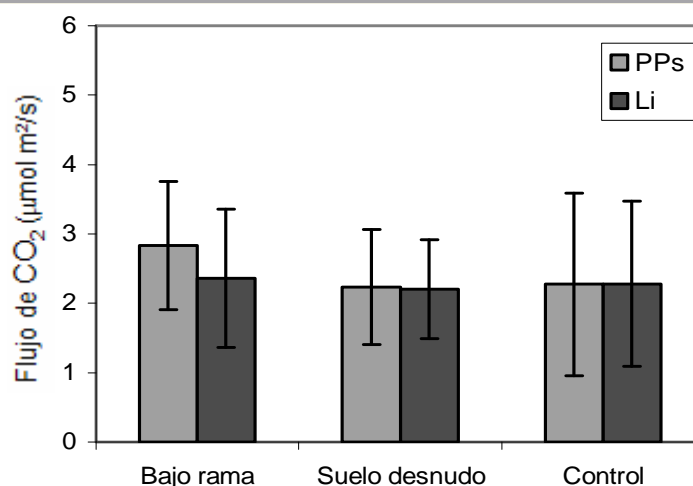


IMAGEN 11 Flujo medio (n= 29) (\pm desviación típica) medido para diferentes tratamientos de riego en La Cortijuela en la campaña de comparación del 31 de Octubre 2007.

3.2 Resultados de campañas de medidas espaciales

Una vez realizadas las correcciones que las campañas de comparación nos ha determinado, ilustraremos algunos resultados que se han obtenido durante el verano del 2007.

A. La Cortijuela

Desde Julio de 2007 se han ido realizando diversas medidas en esta zona de actuación para comprobar como afectaba los días de riego al flujo de CO₂ de suelo. Se realizó un ciclo de 3 días de medidas, 16, 18 y 20 de Julio. De acuerdo con el periodo de riego, el día 16 fue el día mas seco (el último riego fue 20 días atrás), el 18 fue el día después del riego, y el 20 habían pasado 3 días desde el último riego.

Sistemáticamente, sin tener en cuenta la zona de luz en la que se hagan las mediciones, el flujo aumenta con el aumento del riego (Tabla 5, Imagen 13). En open, por ejemplo, el flujo de CO₂ pasa a ser de 2.26 en exclusión, a 2.33 en control y 3.31 en riego.

TABLA 5. Medias de flujos de suelo dependiendo de las distintas zonas de tratamiento de luz y de los tratamientos de riego, durante el ciclo de tres días

Tratamientos	open	matorral	bosque
Exclusión	2,26	1,77	2,14
Control	2,33	1,76	2,19
Riego	3,31	2,22	3,87

Según vemos en la Imagen 12 e Imagen 13, el día después del riego fue el día en el que hubo más respiración, aumentando el flujo en un 11% en Exclusión, 20% en Control y 40% de Riego.

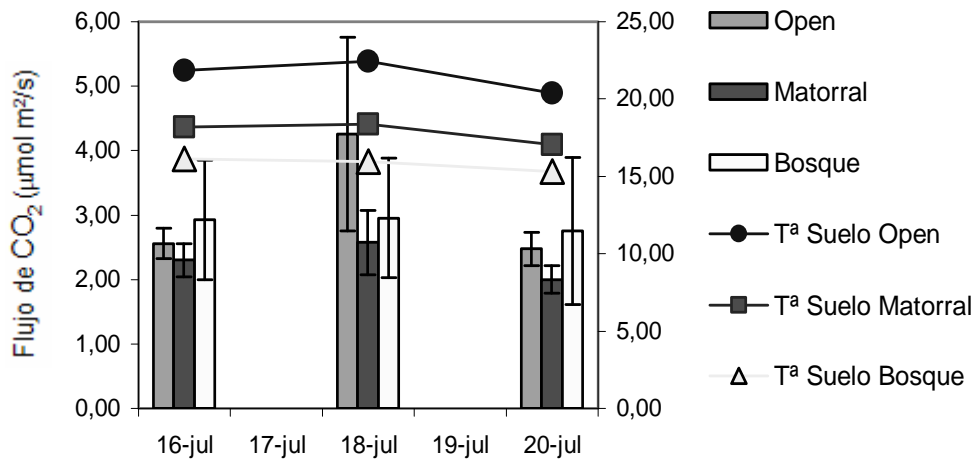


IMAGEN 12 Media de flujos de CO₂ (\pm desviación típica) y Temperaturas de suelo a 6 cm. de profundidad medio según los tratamientos de luz durante los tres días que se recorrió el ciclo de riego: día más seco, día más húmedo y dos días después del día más húmedo.

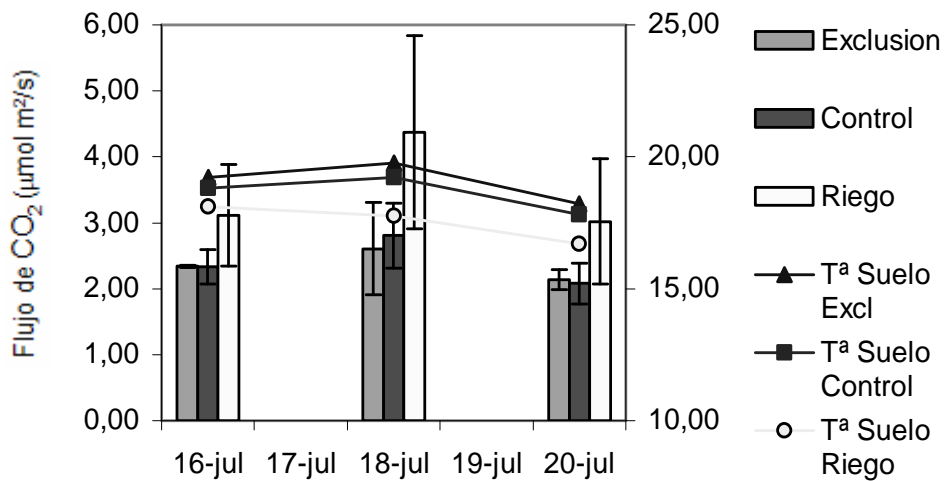


IMAGEN 13 Media de flujos de CO₂ (\pm desviación típica) y Temperaturas de suelo a 6 cm. de profundidad la 10 según los tratamientos de agua durante los tres días que se recorrió el ciclo de riego: día mas seco, día mas húmedo y dos días después del día más húmedo.

B. Lanjarón

Desde Junio de 2007 se han ido realizando varias campañas de medidas espaciales en la loma de Lanjarón. Después de medir durante la época estival, con las primeras lluvias, el flujo de todos los tratamientos se incrementó notablemente. El cambio mas notable se sufrió en Ramas, con un aumento por un factor de cuatro el flujo de la campaña anterior, (Tabla 5) y un decremento de la temperatura de 13°C. (Tabla 8). Después de este incremento, un mes mas tarde, estos valores tan altos no se mantuvieron, pero más altos que en el verano, de 0,68 a 2,20 en ramas, 0,49 a 2,16 en Control después de un mes de las primeras lluvias. Extracción fue el único tratamiento que sus valores fueron más bajos que en verano (de 1,12 a 0,83) según los datos de la Tabla 6.

TABLA 6. Valores medios del flujo ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) y de la temperatura del suelo a 6cm antes y después de las lluvias según los tratamientos selvícolas post-incendio. Parcela 1

Flujos Parcela 1 ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	30/8	25/9	Incremento (%)
Ramas	1,46	6,03	413%
Control	1,71	5,60	326%
Extracción	1,71	4,84	283%

TABLA 7. Valores medios del flujo ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) antes y después de las lluvias según los tratamientos selvícolas post-incendio. Parcela 4

Flujos Parcela 1 ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	30/8	25/9	Incremento (%)	30/10
Ramas	0,68	4,13	611%	2,20
Control	0,49	4,27	874%	2,16
Extracción	1,12	4,64	413%	0,83

TABLA 8. Valores medios de la temperatura del suelo a 6cm (°C) antes y después de las lluvias según los tratamientos selvícolas post-incendio. Parcela 1

Temperatura Parcela 1 ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	30/8	25/9	Diferencia (°C)
Ramas	30	17	-13°C
Control	26	18	-8°C
Extracción	26	21	-5°C

TABLA 9. Valores medios de la temperatura del suelo a 6cm (°C) antes y después de las lluvias según los tratamientos selvícolas post-incendio. Parcela 4

Temperatura Parcela 4 ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	30/8	25/9	Diferencia (°C)
Ramas	23	11	-12°C
Control	22	12,5	-9,5°C
Extracción	19,5	13,5	-6°C

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En La Cortijuela, los distintos tratamientos dan distintas rectas de regresión, pero la regresión mixta coincide con los valores medios de flujo obtenido. Según la recta de regresión, los datos del PPs subestiman en un 6,6% y se confirma si miramos el flujo medio en cada uno de los tratamientos de agua, que siempre es menor en el PPs que en el Li. (Imagen 14)

Dentro de La Cortijuela, las diferencias más grandes se encuentran en Riego. El inconveniente del sistema PPs de no medir el contenido en vapor de agua puede ser la respuesta a esta mayor diferencia.

En Lanjarón, en todos los tratamientos selvícolas post-incendio la regresión induce que el PPs mide flujos más altos que el Li, un 15 % en Ramas y solo un 1,3 % de sobreestimación en Control. La diferencia mayor en Ramas puede deberse a la configuración del Li y del PPs: el Li es más hermético y el acople de la cámara sobre el collar es mejor. Estos fallos no ocurren en el resto de tratamientos ya solamente en los collares que están bajo ramas la presencia de las mismas dificulta el acople de las cámaras.

Aunando los datos de las dos comparativas, globalmente el PPs subestima en La Cortijuela y sobreestima en Lanjarón la referencia del modelo Li.

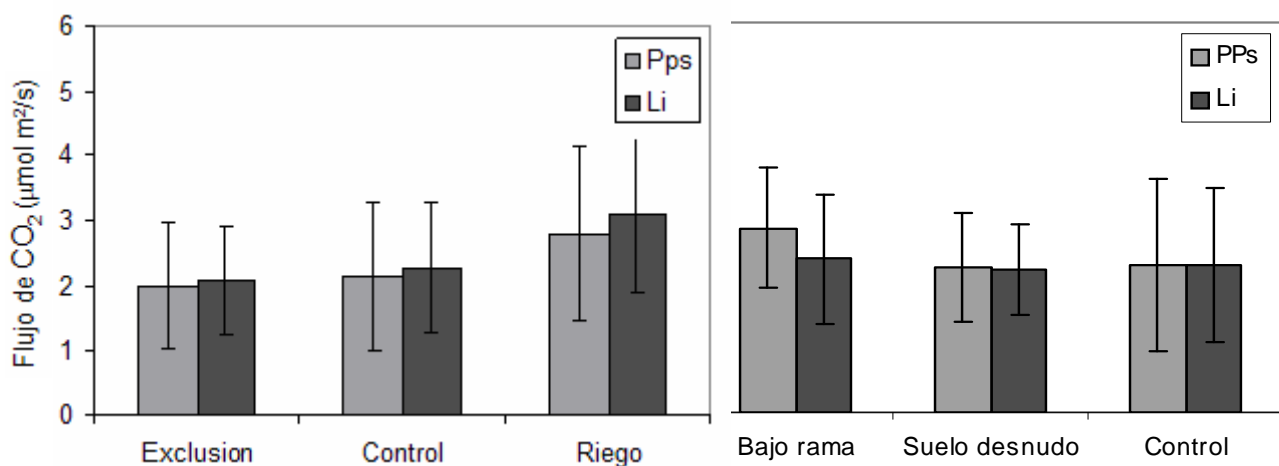


IMAGEN 14 Media de flujos de CO₂ (± desviación típica) de las comparativas en La Cortijuela (izqda) y en Lanjarón (dcha).

Estas diferencias se mantendrán pequeñas siempre y cuando la evaporación sea baja. Futuras investigaciones podría encaminarse a corrección por humedad de las mediciones de flujo de CO₂.

Una vez evaluados los dos instrumentos, a la hora de compartir datos obtenidos con ambos instrumentos, sería conveniente antes de realizar cualquier unificación de datos de ambos instrumentos sería altamente recomendable una primera campaña de comparación.

Aún así, el PPs es casi 5 veces más barato que el Li, y la diferencia de precio y de calidad no se refleja en los datos. A pesar de toda la instrumentación que el sistema Li usa para medir, las diferencias no son altas, siendo incluso inapreciables en algunas zonas (e.g. tratamiento control en Lanjarón, diferencia a favor del PPs de 1,3% solamente.) Pero para poder utilizar el PPs con una mayor fiabilidad, sería conveniente modificar la cámara del PPs para tratar de hacerlo lo más hermético posible a la entrada/salida del aire.

Con respecto a las medidas espaciales, en La Cortijuela, el flujo aumenta con el riego y con la luz (a más riego, más flujo, y cuanto más luz haya, mayor es el flujo) Parece ser que el aumento de luz y de agua beneficia a algunos de los componentes de la respiración de suelo (vida microbiana, raíces, plantas de suelo). En Lanjarón, lo más notable es el aumento tan grande de flujo que se produjo con las primeras lluvias. A pesar de no tener todavía pluviómetros instalados ni de respiración de suelo, es más que probable que el aporte de agua con las precipitaciones sea la causa de dicho aumento. Ambos efectos pueden estar relacionados con el efecto Birch (the Birch Effect), y hay comentarios acerca de la misma respuesta del flujo en varios artículos (e.g., *Schwinnig et al. 2004, Rey et al, 2002, Jarvis et al., 2007*)

De cara a ampliar el conocimiento en este campo, se debería investigar la relación de la humedad del suelo en Lanjarón y su relación con el flujo cuando no existe relación clara con la temperatura. Cuantificar la fotosíntesis en todos los tratamientos; intentar diferenciar entre la respiración autotrófica/heterotrófica (exclusión de raíces, por ejemplo). Es fundamental que en el futuro, el cálculo del PPs se corrija, ya que no se hicieron correcciones por presión atmosférica media y temperatura del aire.

También se continuarán las medidas de flujos en parcelas con tratamientos post-incendios para evaluar la evolución estacional y anual. Ya que en la Parcela 4 se colocará una torre de instrumentación específica para la técnica Eddy Covariance, las campañas de medición con cámaras servirán para respaldarlas y aumentar así la información en este emplazamiento.

5. REFERENCIAS

1. Janssens, I. A., H. Lankreijer, Et Al. (2001). "Productivity Overshadows Temperature In Determining Soil And Ecosystem Respiration Across European Forests." *Global Change Biology* 7: 269 - 278.
2. Houghton, R. A. & Woodwell, G. M. (1989). *Global Climatic Change*. *Sci. Amer.*, 4, 36--44.
3. Vitousek Pm, Aber Jd, Howarth Rw, Et Al. Human Alteration Of The Global Nitrogen Cycle: Sources And Consequences *Ecological Applications* 7 (3): 737-750 Aug 1997
4. Mitchell Jfb, Johns Tc, Gregory Jm, Et Al. Climate Response To Increasing Levels Of Greenhouse Gases And Sulfate Aerosols. *Nature* 376 (6540): 501-504 Aug 10 1995
5. Matear Rj, Hirst Ac Climate Change Feedback On The Future Oceanic CO₂ Uptake *Tellus Series B-Chemical And Physical Meteorology* 51 (3): 722-733 Jul 1999
6. Pendall E Where Does All The Carbon Go? The Missing Sink - Tracing Carbon In Elevated CO₂ Experiments: A Workshop On Isotopic Analyses Of Where The Carbon Is Going, Durham, Nc, Usa, October 2001. *New Phytologist* 153 (2): 207-210 Feb 2002
7. Schwinning S, Sala OE (2004) Hierarchy of responses to resource pulses in arid and semi-arid ecosystems. *Oecologia*.
8. Wofsy, S. C., M. L. Goulden, et al. (1993). "Net Exchange of CO₂ in a Mid-Latitude Forest." *Science* 260: 1314 - 1317.
9. Grace, J., J. Lloyd, et al. (1995). "Fluxes of carbon dioxide and water vapour over an undisturbed tropical forest in south-west Amazonia." *Global Change Biology* 1: 1 - 12.
10. Suyker, A. E. and S. B. Verma (2001). "Year-round observations of the net ecosystem exchange of carbon dioxide in a native tallgrass prairie." *Global Change Biology* 7: 279 - 289.
11. Serrano-Ortiz, P., A. S. Kowalski, et al. (2005). "Seasonal variation in net ecosystem carbon exchange, photosynthesis and respiration in a montane shrubland ecosystem." *Geophysical Research Abstracts* 7(00444): SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU05-A-00444
12. Hastings, S. J., W. C. Oechel, et al. (2005). "Diurnal, seasonal and annual variation in the net ecosystem CO₂ exchange of a desert shrub community (*Sarcocaulis*) in Baja California, Mexico." *Global Change Biology* 11: 927-939, doi: 10.1111/j.1365-2486.2005.00951.x.
13. Anthoni, P. M., A. Freibauer, et al. (2004). "Winter wheat carbon exchange in Thuringia, Germany." *Agricultural and Forest Meteorology* 121: 55 - 67.
14. J. Pumpanen et al. Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO₂ efflux *Agricultural and Forest Meteorology* 123 (2004) 159-176
15. Schimel, D. S., and Coauthors, 2001: Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, 414, 169-172.

16. Houghton, R.A. 2002. Terrestrial carbon sink. *Biologist*, 49: 155-160.
17. Michael G. Ryan and Beverly E. Law (2005) Interpreting, measuring, and modeling soil respiration” *Biogeochemistry* 73: 3–27
18. Rey, A., et al. ,Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy. *Global Change Biology*, 8: 851-866.
19. Raich JW, Potter CS (1995) Global patterns of carbon-dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 9, 23-26
20. Janssens I.A., Kowalski A.S., Longdoz B. and Ceulemans R. 2000. Assessing forest soil CO₂ efflux: an in situ comparison of four techniques. *Tree Physiol.* 20: 23–32.
21. Jarvis et al., (2007) Drying and wetting of Mediterranean soils stimulates decomposition and carbon dioxide emission: the “Birch effect”. *Tree Physiology* 27, 929–940
22. Atjay GL., Ketner P. and Duvigneaud P. (1979) Terrestrial primary production and phytomass. In: *The Global Carbon Cycle SCOPE 13* (eds Bolin B, Degens E, Kempe S, Ketner P), pp. 129–182. John Wiley & Sons, Chichester.
23. Shmida A. (1985) Biogeography Of The Desert flora. In: *Hot Deserts And Arid Shrublands. Ecosystems Of The World*, Vol. 12a (Eds Evenari M, Noy-Meir I, Goodall Dw), Pp. 23–77. Elsevier, Amsterdam.
24. Nay Sm., Bormann Bt., Soil Carbon Changes: Comparing Flux Monitoring And Mass Balance In A Box Lysimeter Experiment *Soil Science Society Of America Journal* 64 (3): 943-948 May-Jun 2000
25. Schlesinger Wh., Andrews Ja., Soil Respiration And The Global Carbon Cycle *Biogeochemistry* 48 (1): 7-20 Jan 2000
26. Lloyd J., Taylor Ja. On The Temperature-Dependence Of Soil Respiration *Functional Ecology* 8 (3): 315-323 Jun 1994
27. Amundson Rg. A Comparison Of Soil Climate And Biological-Activity Along An Elevation Gradient In The Eastern Mojave Desert. *Oecologia* 80 : 395 1989
28. Emanuel Wt. Climatic-Change And The Broad-Scale Distribution Of Terrestrial Ecosystem Complexes. *Climatic Change* 7 : 29 1985
29. Kaye Jp., Hart Sc. Restoration And Canopy-Type Effects On Soil Respiration In A Ponderosa Pine-Bunchgrass Ecosystem. *Soil Science Society Of America Journal* 62 (4): 1062-1072 Jul-Aug 1998
30. West Ne, Stark Jm, Johnson Dw, Et Al. Effects Of Climatic-Change On The Edaphic Features Of Arid And Semiarid Lands Of Western North-America. *Arid Soil Research And Rehabilitation* 8 (4): 307-351 Oct-Dec 1994