

C-02-2023

Comunicación científico-técnica

Estimación de la huella de carbono para el cultivo del brócoli con sistema de riego localizado

Carbon footprint estimation of drip irrigated broccoli

Autores: Sevilla, A.¹; Arias, R.¹; Morcillo, M.¹; Del Castillo, A.¹; Ballesteros, R.¹

¹ Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), Instituto de Desarrollo Regional (IDR), Paseo de los estudiantes, s/n, 02006, Albacete. agustin.sevilla@uclm.es, rocio.arias@uclm.es, manuel.morcillo@uclm.es, amaro.castillo@uclm.es, rocio.ballesteros@uclm.es

Resumen:

La neutralidad climática exige una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y un aumento del secuestro de dióxido de carbono (CO₂). Estableciéndose el límite temporal de 2050 para conseguir la neutralidad de emisiones.

El objetivo de este trabajo es la estimación del balance o huella de carbono de un cultivo hortícola para consumo en fresco, como el brócoli, a partir de la estimación de las emisiones de GEI derivadas de la actividad agrícola y el secuestro de CO₂ asociado a este cultivo.

La parcela de estudio es una parcela comercial localizada en Tarazona de la Mancha (Albacete, España) en la unidad hidrogeológica 08.29 y perteneciente a la Comunidad de Regantes y Sociedad Agraria de Transformación SORETA. Se trasplantó la variedad de brócoli parthenon regado mediante riego localizado y cuyo destino fue la industria para consumo en fresco. El trasplante se realizó el día 20.08.2022 y la cosecha con una única corta el 25.11.2022.

En lo que a emisiones de GEI respecta, en el estudio de la huella de carbono en esta parcela se distinguió entre las labores de la maquinaria, el riego y la fertilización. Para la primera es fundamental conocer el consumo de combustible de cada labor que se realiza, para así poder extrapolarlo a GEI. Mientras que, para el riego, se necesita saber cuál es la potencia hidráulica requerida por el sistema para que, conocidos los períodos de riego, estimar la energía consumida por el sistema, que combinada con las emisiones de Red Eléctrica Española (REE) permitirá conocer las emisiones de GEI asociadas al riego en dicho periodo de tiempo. Mientras que en el secuestro de GEI es esencial el proceso de la fotosíntesis llevado a cabo por el cultivo que inmoviliza carbono en su estructura, por lo que es imprescindible cuantificar los residuos que quedan en la parcela.

Los resultados arrojan un balance positivo (en el que el secuestro es mayor que las emisiones de CO₂) (considerando alcance 1 y alcance 2): resultando unas emisiones de 3179,09 kg CO₂



equivalente y un secuestro de 3348,79 kg CO₂ equivalente para toda la parcela, lo que arroja un balance de 169,70 kg CO₂ equivalente secuestrado.

Palabras clave: gases de efecto invernadero (GEI), secuestro de carbono

Abstract:

Climate neutrality requires a reduction in greenhouse gas (GHG) emissions and an increase in carbon dioxide (CO₂) sequestration. Establishing the time limit of 2050 to achieve emissions neutrality.

The objective of this work is the estimation of the balance or carbon footprint of a horticultural crop for fresh consumption, such as broccoli, based on the estimation of GHG emissions derived from agricultural activity and the sequestration of CO₂ associated with this crop.

The study plot is a commercial plot located in Tarazona de la Mancha (Albacete, Spain) in the hydrogeological unit 08.29 and belonging to the Community of Irrigators and Agrarian Transformation Society SORETA. The Parthenon broccoli variety was transplanted, irrigated through drip irrigation and whose destination was the industry for fresh consumption. The transplant was carried out on 08/20/2022 and the harvest with a single cut on 11/25/2022.

As far as GHG emissions are concerned, in the study a distinction was made between the work of machinery and irrigation. It is essential to know the fuel consumption of each task carried out, in order to extrapolate it to GHG. While, for irrigation, it is necessary to know what the hydraulic power required by the system is so that, knowing the irrigation periods, estimate the energy consumed by the system, which combined with the emissions of the Spanish Electrical Grid (SEG) will allow knowing GHG emissions associated with irrigation in that period of time. While in GHG sequestration, the photosynthesis process carried out by the crop, which immobilizes carbon in its structure, it is essential to quantify the waste left on the plot.

The results show a positive balance (in which sequestration is greater than CO₂ emissions) (considering scope 1 and scope 2): resulting in emissions of 3179.09 kg CO₂ equivalent and sequestration of 3348.79 kg CO₂ equivalent for the entire plot, which gives a balance of 169.70 kg CO₂ equivalent sequestered.

Keywords: greenhouse gas (GHG), carbon footprint.

1. Introducción

El brócoli es un cultivo hortícola de gran importancia en el regadío, puesto que para el año 2021 contaba con 31941 hectáreas en riego que supusieron una producción de 527915 toneladas (MAPA, 2021). Además, si a esto se suma que la agricultura es de los pocos sectores capaces de fijar GEI, y que las políticas europeas establecen el año 2050 como fecha límite para alcanzar la neutralidad de emisiones, el brócoli se convierte en un cultivo fundamental para conseguir dicho objetivo.

La forma más precisa de estimar las emisiones de GEI es medirlos directamente con diferentes aparatos (colocados en tubos de escape, chimeneas, etc.), pero al ser esto muy caro y difícil de implementar, se calcula con diferentes factores de emisión asociados a dichas actividades.

El objetivo de este estudio cuantificar el balance de carbono en un cultivo de brócoli regado por goteo de dosis variable. Para realizar esta cuantificación se considerarán tanto el alcance 1 como el 2.

2. Materiales y métodos

2.1. Zona de estudio y generalidades

El estudio se llevó a cabo durante el año 2022 en una parcela de 1,67 hectáreas de las que se cultivaron 1,47 hectáreas con brócoli (*Brassica oleracea* L.) de la variedad parthenon, y perteneciente a la Sociedad Agraria de Transformación SORETA, en el término municipal de Tarazona de la Mancha (Albacete). El marco de plantación del cultivo es de 0,70 m x 0,40 m, coincidente con la separación de ramales y distancia entre emisores, respectivamente.

La parcela dispone de un sistema de riego localizado de dosis variable que aporta una mayor pluviosidad a las zonas menos productivas, y una menor pluviosidad a las zonas más productivas, en función de una clasificación basada en el NDVI de un cultivo precedente establecido para el año 2021. Esto se consigue empleando emisores de 2,00 l·h⁻¹ para la zona menos productiva, y emisores de 1,60 l·h⁻¹ para las zonas más productivas, buscando esto igualar la producción de la zona menos productiva a la producción de la zona más productiva. El manejo del riego se hizo con dos sectores de cuatro subunidades cada uno. Siendo el total de volumen aplicado para toda la parcela de 4727 m³ (3215,65 m³). Siendo la producción total de la parcela de 19354,24 kg (13166,15 kg·ha⁻¹).

Este trabajo se ha desarrollado siguiendo la metodología marcada por el Greenhouse Gas Protocol Corporate Standard (GHG Protocol) y por el Intergovernmental Panel on Climate Change 2006 (IPCC 2006), siendo los protocolos más usados a escala internacional para cuantificar y gestionar las emisiones de GEI.

Se establece la parcela donde se encuentra establecido el cultivo de brócoli como límite organizativo. Además, se fijan las emisiones directas de GEI (alcance 1) y las emisiones indirectas de GEI asociadas a la electricidad (alcance 2), definidas estas en el GHG protocol, como límites operativos.

2.2. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)

Para la cuantificación de las emisiones de GEI es fundamental conocer las actividades que los producen y los factores de emisión asociados a dichas actividades. A continuación, se muestran las actividades emisoras de GEI englobadas dentro del alcance al que pertenecen.

Alcance 1: emisiones directas de GEI (se producen dentro de la organización)

Combustión móvil

Ocasionada por los equipos de tracción encargados de realizar las labores propias del cultivo de brócoli, siendo estas las mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1. Labores realizadas al cultivo de brócoli en estudio.

pala	Labor	Observaciones
24/05/2022	Pasada con cultivador	
24/05/2022	Pasada con fresadora	
19/08/2022	Labrado entre ramales	
19/08/2022	Aplicación 15-15-15	680 kg·ha ⁻¹
16/09/2022	Tratamiento con herbicida	
03/10/2022	Aplicación de urea	340 kg·ha ⁻¹
10/11/2022	Aplicación tratamientos	

Para calcular estas emisiones, se necesita conocer el consumo de combustible realizado, al no disponer directamente de este dato, se calcula el consumo horario en l·h⁻¹ para cada una de las labores. Para ello, se emplea la ecuación recomendada por Boto Fidalgo et al., (2005).

Mostrándose el consumo horario para cada tipo de labor en la Tabla 2.

Tabla 2. Consumos horarios para cada una de las labores. Donde A es tipo de apero, T es textura, P es profundidad, M es marcha de la caja de cambios, R es régimen del motor y C_h es consumo horario.

Labor	N _{tractor} (kW)	A	T	P	M	R	C _h (l·h ⁻¹)
Pasada con cultivador	110,40	2	2	2	2	2	16,62
Pasada con fresadora	110,40	3	2	2	1	3	19,82
Labrado entre ramales	58,88	2	2	2	1	2	7,14
Aplicación 15-15-15	58,88	1	2	0	3	1	5,51
Tratamiento con herbicida	58,88	1	2	0	3	1	5,51
Aplicación de urea	58,88	1	2	0	3	1	5,51
Aplicación tratamientos	58,88	1	2	0	3	1	5,51

Para calcular el consumo en $l \cdot ha^{-1}$ de cada una de las labores, se procede a calcular la capacidad de trabajo de cada una de las labores, empleando la Ecuación 1.

$$C_T \left(\frac{ha}{h} \right) = \frac{a(m) \cdot v \left(\frac{km}{h} \right)}{10}$$

(Ec. 01)

Donde:

- C_T : capacidad de trabajo, $ha \cdot h^{-1}$
- a : anchura, metros
- v : velocidad, $km \cdot h^{-1}$

En la Tabla 3 se muestra la capacidad de trabajo para cada una de las labores.

Tabla 3. Capacidad de trabajo para cada una de las labores. Donde C_T es capacidad de trabajo.

Labor	Velocidad ($km \cdot h^{-1}$)	Anchura (m)	C_T ($ha \cdot h^{-1}$)
Pasada con cultivador	7,00	3,50	2,45
Pasada con fresadora	5,00	3,00	1,50
Labrado entre ramales	4,00	1,50	0,60
Aplicación 15-15-15	8,00	18,00	14,40
Tratamiento con herbicida	8,00	18,00	14,40
Aplicación de urea	8,00	18,00	14,40
Aplicación tratamientos	8,00	18,00	14,40

Dividiendo el consumo horario por la capacidad de trabajo, se obtiene el consumo en $l \cdot ha^{-1}$ (Tabla 4).

Tabla 4. Consumo horario para cada una de las labores en $l \cdot ha^{-1}$. Donde C_T es capacidad de trabajo, C_h es consumo horario, C_s consumo por superficie

Labor	C_T ($ha \cdot h^{-1}$)	C_h ($l \cdot h^{-1}$)	C_s ($l \cdot ha^{-1}$)
Pasada con cultivador	2,45	16,62	6,78
Pasada con fresadora	1,50	19,82	13,21
Labrado entre ramales	0,60	7,14	11,89
Aplicación 15-15-15	14,40	5,51	0,38
Tratamiento con herbicida	14,40	5,51	0,38
Aplicación de urea	14,40	5,51	0,38
Aplicación tratamientos	14,40	5,51	0,38

El consumo en $l \cdot ha^{-1}$ multiplicado por las emisiones del gasoil agrícola (2,702 $kg CO_2$ equivalente l^{-1} para el año 2022 según el Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico, MITECO) permite obtener las emisiones por superficie para cada una de las labores, multiplicando por la superficie, se obtienen las emisiones en $kg CO_2$ equivalente liberadas en esa labor.

Fertilización

En la mayoría de los suelos, un incremento del nitrógeno disponible aumenta las tasas de nitrificación y desnitrificación que, a su vez, incrementa la producción de N₂O. El aumento del nitrógeno del suelo en este estudio ha sido debido a los fertilizantes sintéticos y al nitrógeno aportado por la materia orgánica del suelo.

Para la parcela en estudio se aplicaron un total de 380,00 kg de nitrógeno procedente de fertilizante sintético, y 45,97 kg de nitrógeno procedente de la mineralización de la materia orgánica.

Para el cálculo de las emisiones directas, se emplea la Ecuación 2 (De Klein et al., 2006).

$$N_2O_{Directas} - N = [F_{SN} + F_{SOM}] \cdot EF_1$$

(Ec. 02)

Donde:

- N₂O_{Directas}-N: emisiones directas anuales de N₂O-N producidas a partir de suelos gestionados, kg de N₂O-N
- F_{SN}: cantidad anual de nitrógeno aplicado a los suelos en forma de fertilizante sintético, kg N
- F_{SOM}: cantidad anual de nitrógeno aportado por la materia orgánica del suelo, kg N
- EF₁: factor de emisión para emisiones de N₂O de aportes de nitrógeno, kg de N₂O-N·(kg de N)⁻¹

Utilizando un factor de emisión de 0,01 (De Klein et al., 2006). Además, las emisiones directas anuales de N₂O-N se multiplicarán por 44/28 para pasarlas a N₂O, y por 298 para pasarlo a unidades de CO₂ equivalente (Munera Mendoza, 2019).

Para el cálculo de las emisiones indirectas por volatilización, se empleará la Ecuación 3 (De Klein et al., 2006).

$$N_2O_{(ATD)} - N = F_{SN} \cdot Frac_{GASF} \cdot EF_4$$

(Ec. 03)

Donde:

- N₂O_(ATD)-N: cantidad anual de N₂O-N producida por deposición atmosférica de nitrógeno volatilizado de suelos gestionados, kg N₂O-N
- F_{SN}: cantidad anual de nitrógeno aplicado a los suelos en forma de fertilizante sintético, kg N
- Frac_{GASF}: fracción de nitrógeno de fertilizantes sintéticos que se volatiliza como NH₃ y NO_x, kg N volatilizado·(kg N aplicado)⁻¹
- EF₄: factor de emisión correspondiente a las emisiones de N₂O de la deposición atmosférica de nitrógeno en los suelos y las superficies del agua, kg N-N₂O·(kg NH₃-N+NO_x-N volatilizado)⁻¹

Utilizando una fracción de nitrógeno de fertilizantes sintéticos que se volatiliza como NH_3 y NO_x de 0,1 y un factor de emisión de 0,01 (De Klein et al., 2006). Además, las emisiones directas anuales de $\text{N}_2\text{O}-\text{N}$ se multiplicarán por 44/28 para pasarlas a N_2O , y por 298 para pasarlo a unidades de CO_2 equivalente (Munera Mendoza, 2019).

Para el cálculo de las emisiones indirectas por lixiviación, se empleará la Ecuación 4 (De Klein et al., 2006).

$$N_2O_{(L)} - N = (F_{SN} + F_{SOM}) \cdot \text{Frac}_{LIXIVIACIÓN-(H)} \cdot EF_5$$

(Ec. 04)

Donde:

- $N_2O_{(L)}-\text{N}$: cantidad anual de $\text{N}_2\text{O}-\text{N}$ producida por lixiviación y escurrimiento de agregados de N a suelos gestionados en regiones donde se producen estos fenómenos, kg $\text{N}_2\text{O}-\text{N}$
- F_{SN} : cantidad anual de nitrógeno aplicado a los suelos en forma de fertilizante sintético, kg N
- F_{SOM} : cantidad anual de nitrógeno aportado por la materia orgánica del suelo, kg N
- $\text{Frac}_{LIXIVIACIÓN-(H)}$: fracción de todo el nitrógeno agregado en suelos gestionados en regiones donde se produce lixiviación/escurrimiento, kg N·kg de agregados de N^{-1}
- EF_5 : factor de emisión para emisiones de N_2O por lixiviación y escurrimiento de nitrógeno, kg $\text{N}_2\text{O}-\text{N}$ ·kg N por lixiviación y escurrido⁻¹

Utilizando una fracción de todo el nitrógeno agregado en suelos gestionados en regiones donde se produce lixiviación/escurrimiento de 0,30 y un factor de emisión de 0,0075 (De Klein et al., 2006). Además, las emisiones directas anuales de $\text{N}_2\text{O}-\text{N}$ se multiplicarán por 44/28 para pasarlas a N_2O , y por 298 para pasarlo a unidades de CO_2 equivalente (Munera Mendoza, 2019).

Las emisiones de CO_2 por la fertilización con urea pueden estimarse mediante la Ecuación 5.

$$\text{Emisión } CO_2 - C = M \cdot EF$$

(Ec. 05)

Donde:

- Emisión de CO_2-C : emisiones anuales de carbono por aplicación de urea, kg de CO_2-C
- M: cantidad anual de fertilización con urea, kg urea
- EF: factor de emisión kg CO_2-C ·kg urea⁻¹

Se considera un factor de emisión de 0,20 (De Klein et al., 2006), y las emisiones anuales de CO_2-C por aplicación de urea se multiplican por 44/12 para pasarlo a CO_2 .

Alcance 2: emisiones indirectas de GEI (se producen fuera de la organización) asociadas a la generación de la electricidad adquirida

Como emisiones de alcance 2 se tienen las debidas a la generación de la electricidad producida fuera, y consumida en la parcela de estudio.

La presión en cabecera necesaria para que el gotero más desfavorable del sector 1 autocompense es de 14,37 metros, mientras que para el sector 2 es de 17,99 metros, estando considerados en los datos de presión las pérdidas de carga ocasionadas por el filtro. El caudal del sector 1 es de $50,46 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, y el del sector 2 es de $40,47 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Empleando la Ecuación 6, se calcula la potencia necesaria para dar un riego correcto en cada sector.

$$N(kW) = \frac{\gamma \left(\frac{kN}{m^3} \right) \cdot Q \left(\frac{m^3}{h} \right) \cdot H(m)}{3600}$$

(Ec. 06)

Donde:

- N: potencia, kW
- γ : peso específico del agua, $kN \cdot m^{-3}$
- H: presión, m
- Q: caudal, $m^3 \cdot h^{-1}$

Siendo la potencia necesaria en cabecera para regar correctamente el sector 1 de 1,976 kW, y para regar el sector 2 de 1,984 kW.

Puesto que se conoce la potencia necesaria para cada sector y la duración de los riegos en cada uno, se calcula la energía necesaria para cada riego. Además, REE nos facilita las emisiones en $\text{kg CO}_2 \text{ eq} \cdot \text{kWh}^{-1}$ para el día y tramo horario que se desee, y puesto que se conocen los tramos horarios en los que se realizaron los riegos, se es capaz de conocer las emisiones de cada riego en kg CO_2 equivalente.

2.3. Secuestro de dióxido de carbono (CO_2)

Se realizaron muestreos después de la cosecha para conocer la biomasa que quedó en la parcela, diferenciando en tallo y raíces. Estas muestras se introdujeron en una estufa hasta que su peso seco permanecía constante y se calculó el peso medio por raíz y tallo, además se conocía que en la parcela existían 45993 plantas de brócoli, permitiendo conocer la masa seca total de raíces y la masa seca total de tallo, siendo de 1660,30 kg de masa seca para raíz y de 541,24 kg de masa seca para tallo. Puesto que para brócoli de la variedad parthenon en raíz el carbono es el 41,48% de la masa seca y en tallo el carbono es el 41,50% de la masa seca (Carvajal, 2010), se calculó el carbono secuestrado.

3. Resultados y discusión

En este apartado se muestran las emisiones de GEI dentro de cada uno de los alcances, y el secuestro de carbono efectuado por el cultivo de brócoli.

Alcance 1: emisiones directas de GEI

Combustión móvil

Tabla 5. Emisiones en kg CO₂ equivalente para cada una de las labores. Donde C_s es consumo de combustible por superficie, E es emisiones de CO₂ equivalente por superficie, S es superficie de cultivo, E son las emisiones totales de la labor.

Labor	Fecha	C _s (l·ha ⁻¹)	E (kg CO ₂ eq·ha ⁻¹)	S cultivo (ha)	E _{totales} (kg CO ₂ eq·año ⁻¹)
Pasada con cultivador	24/05/22	6,78	18,33	1,67	30,67
Pasada con fresadora	24/05/22	13,21	35,69	1,67	59,73
Labrado entre ramales	19/08/22	11,89	32,14	1,47	47,25
Aplicación 15-15-15	19/08/22	0,38	1,03	1,47	1,52
Tratamiento con herbicida	16/09/22	0,38	1,03	1,47	1,52
Aplicación de urea	03/10/22	0,38	1,03	1,47	1,52
Aplicación tratamientos	10/11/22	0,38	1,03	1,47	1,52

En la Tabla 5 se muestra las emisiones de CO₂ equivalente para cada una de las labores agrícolas realizadas en el cultivo de brócoli, siendo el total de todo 143,73 kg CO₂ equivalente.

Fertilización

En la Tabla 6 se muestran las emisiones producidas por los fertilizantes aplicados en la parcela.

Tabla 6. Emisiones ocasionadas por la fertilización.

Emisiones directas por fertilización, kg CO ₂ equivalente	1994,78
Emisiones indirectas por volatilización, kg CO ₂ equivalente	177,94
Emisiones indirectas por lixiviación, kg CO ₂ equivalente	448,82
Emisiones por fertilización con urea, kg CO ₂ equivalente	366,67

El total de las emisiones por la aplicación de fertilizantes en la parcela es de 2988,21 kg de CO₂ equivalente.

Alcance 2: emisiones indirectas de GEI asociadas a la generación de la electricidad adquirida

Se dieron un total de 44 riegos cubriendo el 100% de las necesidades del cultivo, y no aplicándose riego deficitario, lo que supuso unas emisiones de 47,15 kg de CO₂ equivalente.

Secuestro de CO₂ por parte del cultivo

El secuestro de CO₂ realizado por la parte de cultivo que quedó en la parcela fue de 2525,21 kg de CO₂ secuestrado por parte de la raíz, y 823,58 kg de CO₂ secuestrado por parte del tallo, lo que supone un secuestro total de 3348,79 kg de CO₂.

Balance

En la Tabla 7 se muestra que el cultivo de brócoli considerando el alcance 1 y alcance 2, ha sido capaz de secuestrar más CO₂ que el emitido a la atmósfera, siendo el secuestro en 169,70 kg de CO₂ mayor que las emisiones.

Tabla 7. Resumen emisiones y secuestro de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Emisiones, kg CO ₂ eq	Alcance 1	Combustión móvil	143,73
		Directas por fertilización	1994,78
		Indirectas por volatilización	177,94
		Indirectas por lixiviación	448,82
		Por fertilización con urea	366,67
	Alcance 2	Electricidad	47,15
Secuestro, kg CO ₂			3348,79
Balance (Secuestro-Emisiones), kg CO ₂ eq			169,70

4. Conclusiones

A la vista de los resultados se observa que las emisiones de GEI producidas por el consumo de energía eléctrica y combustión móvil es muy pequeño con respecto del total de las emisiones, siendo la mayor parte de las emisiones ocasionadas por la fertilización. Observándose que el brócoli es un cultivo capaz de retener gran cantidad de GEI.

5. Referencias

- Boto Fidalgo, J. A., Pastrana Santamarta, P., & Suárez de Cepeda Martínez, M. (2005). *Consumos energéticos en las operaciones agrícolas en España*. www.idae.es
- Carvajal, M. (2010). *Investigación sobre la absorción de CO₂ por los cultivos más representativos*.
- De Klein, C., Novoa, R. S. A., Ogle, S., Smith, K. A., Rochette, P., Wirth, T. C., McConkey, B. G., Mosier, A., & Rypdal, K. (2006). *Capítulo 11: Emisiones de N₂O de los suelos gestionados y emisiones de CO₂ derivadas de la aplicación de cal y urea*.
- MAPA. (2021). *Anuario de estadística*.
- Munera Mendoza, Á. (2019). *Determinación de la huella de carbono derivada del consumo de energía eléctrica convencional para el uso de agua de riego*.