

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA  
AGRONÒMICA I DEL MEDI NATURAL



## EVALUACIÓN DE CAMBIOS AMBIENTALES SOBRE EL BALANCE DE CARBONO Y NITRÓGENO EN EL SUELO

**TRABAJO FIN DE MÁSTER EN  
INGENIERÍA AGRONÓMICA**

**ALUMNO/A:**

Dña. Kimberly Dailyn Campoverde León

**TUTOR ACADÉMICO:**

Prof. D. Antonio Luis Lidón Cerezuela

**Curso Académico: 2018/2019**

**VALENCIA, Julio de 2019**

# EVALUACIÓN DE CAMBIOS AMBIENTALES SOBRE EL BALANCE DE CARBONO Y NITRÓGENO EN EL SUELO

## Resumen:

El creciente aumento de la contaminación de origen agrícola en la Comunitat Valenciana, como consecuencia del inadecuado manejo de la fertilización orgánica y mineral, hace necesario estudiar cómo se producen algunos de los procesos relacionados con el N en el suelo, entre los que se encuentra la mineralización de la materia orgánica (añadida y presente en forma de humus). Estos procesos de transformación están en gran medida influenciados por las condiciones microclimáticas del suelo, en concreto por su temperatura y humedad, las cuales pueden variar en el futuro, tal y como pronostican diferentes modelos climáticos en base a diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera. En este trabajo se han evaluado los cambios más relevantes producidos en los componentes del ciclo del nitrógeno y carbono en una rotación de cultivos en la zona de la huerta de Valencia atendiendo a diferentes escenarios de cambio climático. Para ello, se han utilizado dos modelos de simulación del sistema suelo-agua-planta, LEACHM y EU-Rotate\_N que han sido previamente calibrados para el cultivo de coliflor. Para realizar los pronósticos a corto, medio y largo plazo el modelo climático utilizado ha sido MPI-ESM-LR-CSC-REMO2009 bajo dos escenarios de emisiones denominados RCP 4.5 y RCP 8.5. Los modelos LEACHM y EU-Rotate\_N se han comportado como herramientas válidas para pronosticar posibles cambios en los componentes de los ciclos de C y N ante variaciones climáticas, pero necesitan de una adecuada calibración y validación. El modelo EU-Rotate\_N resultó más adecuado a la hora de simular la rotación de cultivos porque permitió comprobar el crecimiento óptimo del cultivo. Los cambios en los componentes de ambos ciclos se hacen evidentes a medio y largo plazo y son más acentuados en el escenario RCP 8.5. Los cambios de temperatura pronosticados aumentaron el contenido de N mineral en el perfil de suelo como consecuencia de un incremento de la mineralización de la materia orgánica. Las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de la respiración del suelo variaron en la rotación estudiada entre un 5 y un 12% según el modelo de simulación utilizado. En las condiciones de cultivo estudiadas (2013-2015) fue preciso redimensionar el riego, no solo a nivel de dosis de agua aplicada sino también en su frecuencia, para asegurar niveles óptimos de producción en los tres cultivos. Así mismo, ante el aumento de la mineralización fue posible reducir el abonado mineral sin afectar a la producción, mitigando con ello las pérdidas por lixiviación y las pérdidas gaseosas de N. En futuros trabajos sería necesario determinar el intervalo óptimo de aplicación de las enmiendas orgánicas y el posible uso de enmiendas con características diferentes a la de la gallinaza, con el fin de mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub> por parte del suelo.

**Palabras clave:** escenarios climáticos, ciclo del C, ciclo del N, LEACHM, EU-Rotate\_N

**ALUMNO/A:** Dña. Kimberly Dailyn Campoverde León

**TUTOR ACADÉMICO:** Prof. D. Antonio Lidón Cerezuela

**Curso Académico:** 2018/2019

**Valencia, Julio de 2019**

# EVALUATION OF ENVIRONMENTAL CHANGES ON THE CARBON AND NITROGEN BALANCE IN THE SOIL

## **Abstract:**

The inadequate management of organic and mineral fertilization implies an increase in groundwater pollution from agricultural sources in the Valencian Community. Therefore, it is necessary to study how some of the processes related to N occur in the soil. One of these processes is the mineralization of soil organic matter (added and present as humus). These processes are largely influenced by the microclimatic conditions of the soil, in particular by soil temperature and humidity, which can change over time according to the forecasts of different climatic models. These models are based on different scenarios of greenhouse gas emissions into the atmosphere. In this study, the most relevant changes produced in the components of the nitrogen and carbon cycle in a crop rotation in the area of Valencia have been evaluated in response to different scenarios of climate change. Two calibrated models of the soil-water-plant system, LEACHM and EU-Rotate\_N, have been used in a cauliflower crop. The climate model MPI-ESM-LR-CSC-REMO2009 has been used for obtain the climate data under two emission scenarios (RCP 4.5 and RCP 8.5) in the short, medium and long term. Both models have behaved as valid tools to predict possible changes in the components of the C and N cycles due to climatic variations, but the EU-Rotate\_N model was more appropriate when simulating crop rotation because it allowed checking the optimal crop production. The changes observed in the components of both cycles become evident in the medium and long term and are more pronounced in the RCP 8.5 scenario. Temperature changes increased the content of mineral N in the soil profile because of an increase in the mineralization of organic matter. CO<sub>2</sub> emissions from soil respiration varied in the rotation between 5 and 12% according to the simulation model used. Under the conditions studied in the period 2013-2015, a new schedule of irrigation was required to ensure optimum levels of production in the three crops. In addition, it was possible to reduce mineral fertilizer without affecting production, mitigating leaching and gaseous losses of N from soil-plant system. In future studies, it would be necessary to determine the optimum range and quality of organic amendments in order to mitigate CO<sub>2</sub> emissions by the soil.

**Keywords:** climate scenarios, carbon cycle, nitrogen cycle, LEACHM, EU-Rotate\_N

**STUDENT:** Dña. Kimberly Dailyn Campoverde León

**ACADEMIC SUPERVISOR:** Prof. D. Antonio Lidón Cerezuela

**Academic Year:** 2018/2019

**Valencia, July of 2019**

# AGRADECIMIENTOS

*A mi tutor Antonio, por ayudarme en la consecución de este trabajo y despertar aún más si cabe mi interés por el cambio climático.*

*A mi madre, por enseñarme a perseguir mis sueños a base de esfuerzo y perseverancia.*

*A mi padre, por inculcarme el valor de las pequeñas cosas y del trabajo minucioso.*

*A mi hermano Carlos, por todas las risas y los buenos ratos de complicidad.*

*A Diego, por ser mi gran compañero de vida y mi apoyo incondicional.*

*Y como no podían faltar...a mi Sky e Iris, que con cada travesura gatuna animáis el día a cualquiera.*

*A todos vosotros, gracias de corazón.*

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.1. LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL DERIVADA DEL SECTOR AGRÍCOLA</b> .....	1
<b>1.2. MANEJO DE LA FERTILIZACIÓN EN EL SUELO</b> .....	1
1.2.1. Actividad agrícola y problemática ambiental en la Comunitat Valenciana.....	2
<b>1.3. CICLOS DEL CARBONO Y DEL NITRÓGENO EN LOS SISTEMAS AGRÍCOLAS</b> .....	4
1.3.1. Ciclo del carbono en el suelo.....	4
1.3.2. Ciclo del nitrógeno en el suelo .....	5
<b>1.4. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y LA HUMEDAD DEL SUELO SOBRE LA DINÁMICA DE LA MATERIA ORGÁNICA</b> .....	6
1.4.1. Efecto del incremento de los gases de efecto invernadero en el suelo.....	7
1.4.2. Escenarios de cambio climático .....	8
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	10
<b>3. MATERIAL Y MÉTODOS</b> .....	11
<b>3.1. MODELOS DE SIMULACIÓN</b> .....	11
3.1.1. MODELO LEACHM .....	11
3.1.2. EU-Rotate_N.....	14
<b>3.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS</b> .....	16
<b>3.3. CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN</b> .....	18
3.3.1. Herramientas para la evaluación de los modelos .....	19
3.3.2. Evaluación de los modelos en una rotación de cultivos .....	20
<b>3.4. EVALUACIÓN DE ESCENARIOS CLIMÁTICOS FUTUROS</b> .....	21
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	23
<b>4.3. CALIBRACIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS MODELOS</b> .....	23
4.3.1. LEACHM.....	23
4.3.2. EU-Rotate_N.....	24
4.3.3. Comparación de los dos modelos para el cultivo de la coliflor.....	25
4.3.4. Comparación de los modelos en una rotación de cultivos .....	26
<b>4.4. EVALUACIÓN DE LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS FUTUROS</b> .....	27
4.4.1. Cambios en las variables de T <sup>a</sup> .....	27
4.4.2. Variación de N y C con el modelo LEACHM.....	28
4.4.3. Variación de N y C con el modelo EU-Rotate_N.....	32
<b>4.5. ALTERNATIVAS DE MEJORA</b> .....	35
<b>4. CONCLUSIONES</b> .....	37
<b>5. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	38

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de las transformaciones de la materia orgánica del suelo .....	1
Figura 2. Zonas vulnerables a la contaminación por nitratos procedentes de fuentes agrarias en la Comunitat Valenciana. Fuente: Visor GVA (2018) .....	3
Figura 3. Ciclo del carbono en el suelo. Adaptado de: UNCCD, 2015 .....	4
Figura 4. Ciclo del nitrógeno en el suelo. Fuente: Jaramillo, 2016 .....	5
Figura 5. Diagrama esquemático de los ciclos de retroalimentación positiva y la expansión de las tierras áridas debido al cambio climático y la disminución de CO <sub>2</sub> . Fuente: FAO, 2017.....	7
Figura 6. Principales componentes y procesos descritos por LEACHM .....	11
Figura 7. Ciclo del carbono considerado en LEACHM .....	12
Figura 8. Ciclo del nitrógeno considerado en LEACHM.....	13
Figura 9. Organización de los principales submódulos del modelo EU-Rotate_N. Fuente: “Brief Description of The Eu-Rotate_N model” en <a href="http://www.warwick.ac.uk/go/eurotaten">www.warwick.ac.uk/go/eurotaten</a> ; adaptado por Jaramillo (2015).....	14
Figura 10. Compartimentos y procesos del ciclo del carbono considerados en EU-Rotate_N...	15
Figura 11. Compartimentos y procesos del ciclo de nitrógeno considerados en EU-Rotate_N .	15
Figura 12. Respiración diaria en el modelo EU-Rotate_N para el cultivo de la coliflor .....	24
Figura 13. Simulación del N <sub>min</sub> y lixiviación acumulada en los modelos LEACHM y EU-Rotate_N para el período completo de la coliflor .....	25
Figura 14. Simulación de la lámina y el drenaje acumulado en los modelos LEACHM y EU-Rotate_N para el período completo de la coliflor.....	25
Figura 15. Simulación del N <sub>min</sub> en los modelos LEACHM y EU-Rotate_N para la rotación de cultivos del periodo 2013-2015.....	26
Figura 16. Simulación de la lixiviación en los modelos LEACHM y EU-Rotate_N para la rotación de cultivos del año 2013-2015 .....	26
Figura 17. Lámina y drenaje acumulado simulados con LEACHM y EU-Rotate_N para la rotación de cultivos del periodo 2013-2015.....	27
Figura 18. Respiración acumulada simulada por LEACHM y EU-Rotate_N para la rotación de cultivos del período 2013-2015.....	27
Figura 19. Simulación del N <sub>min</sub> en distintos períodos para un escenario RCP 4.5 utilizando el modelo LEACHM .....	28
Figura 20. Simulación del N <sub>min</sub> en distintos períodos para un escenario RCP 8.5 utilizando el modelo LEACHM .....	29
Figura 21. Simulación de la lixiviación acumulada en distintos períodos para un escenario RCP 4.5 (izq.) y RCP 8.5 (dcha.) utilizando el modelo LEACHM .....	29
Figura 22. Simulación de la respiración acumulada (C <sub>ra</sub> ) en distintos períodos para un escenario RCP 4.5 (izq.) y RCP 8.5 (dcha.) utilizando el modelo LEACHM .....	30
Figura 23. Variación del contenido de humus (C <sub>h</sub> ) para los distintos escenarios según el modelo LEACHM .....	31
Figura 24. Simulación del N <sub>min</sub> en distintos períodos para un escenario RCP 4.5 utilizando el modelo EU-Rotate_N .....	32
Figura 25. Simulación del N <sub>min</sub> en distintos períodos para un escenario RCP 8.5 utilizando el modelo EU-Rotate_N .....	32
Figura 26. Simulación de la lixiviación acumulada en distintos períodos para un escenario RCP 4.5 (izq.) y RCP 8.5 (dcha.) utilizando el modelo EU-Rotate_N.....	33
Figura 27. Simulación de la respiración acumulada (C <sub>ra</sub> ) en distintos períodos para un escenario RCP 4.5 (izq.) y RCP 8.5 (dcha.) utilizando el modelo EU-Rotate_N .....	34

Figura 28. Variación del contenido de carbono del humus (Cha) para los distintos escenarios según EU-Rotate_N. ....	34
---	----

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cronograma de los períodos de evaluación de la mineralización de N en la parcela Paterna II_ cultivada con coliflor.....	16
Tabla 2. Condiciones iniciales y propiedades fisicoquímicas del suelo de la parcela Paterna II.	17
Tabla 3. Características de los tratamientos en función de los abonados.....	17
Tabla 4. Parámetros hidráulicos utilizados en EU-Rotate_N. Fuente: Jaramillo (2015) .....	17
Tabla 5. Parámetros específicos del cultivo de coliflor en EU-Rotate_N. Fuente: Jaramillo (2015) .....	18
Tabla 6. Cronograma del ensayo de mineralización de gallinaza (15/07/13 – 10/09/13).....	19
Tabla 7. Cronograma del ensayo de mineralización durante el cultivo (10/09/13 - 04/03/14) .	19
Tabla 8. Cronograma del ensayo de mineralización de los restos de cosecha (04/03/14-15/05/14) .....	19
Tabla 9. Rotación seleccionada para la simulación.....	20
Tabla 10. Cronograma para los cultivos de calabaza y cebolla (2014-2015) .....	21
Tabla 11. Constantes de mineralización utilizadas en LEACHM.....	23
Tabla 12. Índices estadísticos para evaluar los resultados de las simulaciones en LEACHM.....	23
Tabla 13. Parámetros que se calibraron en EU-Rotate_N. Fuente: Jaramillo, 2015.....	24
Tabla 14. Variación de Nmin predicha por LEACHM para los distintos escenarios temporales considerados .....	29
Tabla 15. Variación de la lixiviación acumulada para los distintos períodos y escenarios simulada con LEACHM .....	30
Tabla 16. Otros componentes del balance de N simulados por LEACHM para los diferentes escenarios.....	30
Tabla 17. Variación de la respiración acumulada (Cra) para los distintos escenarios predicha por LEACHM.....	31
Tabla 18. Variación del contenido de carbono del humus en el suelo (Cha) para los distintos escenarios según LEACHM .....	31
Tabla 19. Variación del carbono de la materia orgánica añadida (Cmo) para los distintos escenarios según LEACHM .....	31
Tabla 20. Variación de Nmin para los distintos escenarios en EU-Rotate_N.....	32
Tabla 21. Variación de la lixiviación acumulada para los distintos escenarios según EU-Rotate_N .....	33
Tabla 22. Otros componentes del balance de N según el modelo EU-Rotate_N.....	33
Tabla 23. Variación de Cra para los distintos escenarios en EU-Rotate_N .....	34
Tabla 24. Variación del carbono del humus (Cha) para los distintos escenarios según EU-Rotate_N .....	34
Tabla 25. Variación de Cmo para los distintos escenarios en EU-Rotate_N.....	35
Tabla 26. Producción de materia seca (t/ha) considerando los ajustes de riego y fertilización.	35
Tabla 27. Componentes del ciclo del N y del C considerando los ajustes de riego y fertilización .....	35
Tabla 28. Balance de materia orgánica en los diferentes escenarios considerando los ajustes de riego y fertilización.....	36

# **1. INTRODUCCIÓN**



## 1.1. LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL DERIVADA DEL SECTOR AGRÍCOLA

La contaminación ambiental constituye una problemática prioritaria para la sociedad actual, ya que supone un riesgo para la salud de los seres vivos que habitan los ecosistemas contaminados. Se origina principalmente por causas derivadas de la actividad humana, como pueden ser las ligadas al sector agrario, el cual ha contribuido en gran medida a la contaminación de los recursos naturales.

El sector agrario representa dentro del conjunto de sectores difusos, el segundo en emisiones de gases de efecto invernadero ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  y  $\text{CH}_4$ ), detrás del sector transporte. En España durante el año 2016, el 17% de las emisiones de  $\text{CO}_2$  (33,75 Mt  $\text{CO}_2$  eq.) correspondieron al sector de la agricultura y ganadería. Sin embargo, es el único sector capaz de producir emisiones (uso de combustibles fósiles, manejo del suelo y uso de fertilizantes, quema de residuos agrícolas, emisiones ganaderas), y de ejercer como sumidero de  $\text{CO}_2$  a través de los procesos de fijación y asimilación que tienen lugar en el suelo y en los cultivos.

Otro de los problemas medioambientales y de salud pública más graves a los que se enfrenta la agricultura moderna es la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas por nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ). Esta contaminación se produce principalmente, por un exceso en la fertilización nitrogenada de los cultivos y por la inadecuada gestión de los residuos procedentes de las explotaciones ganaderas, siendo especialmente problemático en áreas con régimen de precipitaciones bajo o muy bajo y con agricultura intensiva (MITECO, 2016a).

## 1.2. MANEJO DE LA FERTILIZACIÓN EN EL SUELO

La creciente demanda de alimentos debido al imparable aumento de la población global unido con el carácter limitado de la superficie agrícola hace necesario el mantenimiento e incremento de los rendimientos en los cultivos. Para ello, se deben emplear técnicas que permitan practicar una agricultura productiva, pero también sostenible, en la que los abonos se empleen de forma racional, con máxima eficiencia y respeto al medio ambiente con el fin de garantizar la fertilidad del suelo y su valor agronómico, presente y futuro. Dicha fertilización racional debe conjugar el uso de fertilizantes orgánicos y minerales, de forma que se complementen (MARM, 2009).

Los fertilizantes orgánicos aportan nutrientes, aunque actúan, sobre todo, mejorando las propiedades fisicoquímicas de los suelos y su actividad biológica. Todos los recursos orgánicos que estén al alcance del agricultor (subproductos ganaderos, residuos vegetales, compost, etc.) pueden incorporarse al suelo en cantidades adecuadas, previendo su mineralización y la cantidad de nutrientes que pueden liberar en cada momento. Estas aportaciones anuales deben ser tenidas en cuenta a la hora de realizar el abonado mineral (MARM, 2009).

En la figura 1, se pueden observar los cambios que sufre la materia orgánica del suelo; existe una primera transformación más o menos rápida dependiendo de la calidad de la materia orgánica añadida, que la convierte en humus, seguida de una descomposición, mucho más lenta que lleva hasta la liberación de los nutrientes. La fertilidad de un suelo depende, en buena parte, del mantenimiento de un balance del humus equilibrado.



Figura 1. Esquema de las transformaciones de la materia orgánica del suelo

En el caso de los fertilizantes minerales, el proceso de fabricación consiste en la transformación de diferentes elementos presentes en la naturaleza, en nutrientes asimilables por las plantas. Generalmente, son de acción rápida y estimulan el crecimiento y vigor de las plantas cuando se aplican. Por contra, una aplicación excesiva puede ocasionar que las sales químicas del fertilizante lleguen a producir daños a la planta, además de aumentar la presencia de sales tóxicas en el suelo (MARM, 2009).

En España pueden comercializarse exclusivamente aquellos productos que cumplan con lo indicado en el Reglamento (CE) nº 2003/2003 relativo a los abonos y en el Real Decreto 506/2013, sobre productos fertilizantes. Tradicionalmente, los fertilizantes minerales se pueden presentar en forma sólida o líquida, clasificándose en los siguientes grandes grupos: i) nitrogenados simples; ii) fosfatados simples; iii) potásicos simples; iv) abonos compuestos; v) abonos con nutrientes secundarios y vi) abonos con micronutrientes (MARM, 2009).

### **1.2.1. Actividad agrícola y problemática ambiental en la Comunitat Valenciana**

El clima predominante en la Comunitat Valenciana es el mediterráneo y se distingue por suaves inviernos, la irregularidad de sus precipitaciones con máximos relativos en otoño y primavera, y una fuerte sequía estival. La temperatura media anual oscila entre los 11 y los 17°C aumentando de forma progresiva desde el interior hacia la costa (GVA, 2013).

Una de las características de la producción agrícola valenciana, es su carácter intensivo que ha permitido durante años, obtener una elevada productividad por unidad de superficie, muy superior a la media española. Sin embargo, estas prácticas conllevan a su vez, un uso intensivo de insumos (agua, fertilizantes, y fitosanitarios) que a la larga y, en determinadas circunstancias, pueden resultar perjudiciales para la fertilidad del suelo y para los cultivos

En este contexto, la incorporación de enmiendas orgánicas permite reducir notablemente el aporte de fertilizantes, lo que supone una estrategia de manejo sostenible de la explotación, con lo que además de reducir al máximo la generación de residuos, contribuye al incremento de la calidad del suelo. El aporte de materia orgánica al suelo es una práctica muy interesante para conservar el equilibrio húmico de los suelos de la forma más natural y económica posible, ya que con esta práctica se devuelve al suelo una parte importante de los nutrientes que se han extraídos en el desarrollo del cultivo. Sin embargo, el resultado de esta práctica agronómica depende de las condiciones ambientales y de la calidad del material incorporado. El ciclo del carbono en el suelo está intrínsecamente relacionado con las condiciones ambientales (temperatura y precipitación). Dependiendo de las condiciones en las que se realice el aporte de materia orgánica, el suelo puede actuar como sumidero de carbono siendo parte de la solución medioambiental, o puede ser parte del problema al actuar como fuente de dióxido de carbono (UNCCD, 2015).

Otro rasgo de la producción agrícola en la CV, es la gran implantación del sistema de riego localizado, que alcanza una superficie de 206.800 ha, lo que representa el 70,9% de la superficie total regada. Los cultivos principales en regadío pertenecen al grupo de los cítricos, mandarino y naranjo, con el 91,9% y 94,1%, respectivamente, de superficie en regadío, seguido del viñedo y el olivar, que, si bien la mayor parte de su superficie es de secano, la suma de ambos representa el 13,6% de la superficie total de regadío. El arroz y el caqui, con 15.796 y 15.486 ha en regadío respectivamente, ocupan el quinto y sexto lugar en cuanto a superficie regada (MAPA,2018).

Estos datos, demuestran la gran dependencia hídrica de la agricultura valenciana, cuya escasa dotación natural de recursos hídricos (por razones de tipo climático e hidrográfico) y la sobreexplotación de los acuíferos, hace necesario la adopción de medidas preventivas para el mantenimiento de este valioso recurso.

Precisamente, uno de los problemas que más afectan a la calidad del agua en la Comunitat Valenciana es la contaminación por nitratos. Su presencia natural en las aguas superficiales o subterráneas es consecuencia del ciclo natural del nitrógeno, sin embargo, en determinadas zonas ha habido una alteración de este ciclo en el sentido de que se ha producido un aumento en la concentración de nitratos, debido fundamentalmente a un excesivo uso de abonos nitrogenados y a su posterior lavado por las aguas de lluvia o riego (Palomares, 2013).

Con la finalidad de reducir la contaminación del agua por nitratos de origen agrícola y prevenirla en el futuro se desarrolló la Directiva 91/676/CEE. La implementación de dicha directiva implica la definición del Decreto 86/2018, de 22 de junio, del Consell, por el que se designa municipios como zonas vulnerables a la contaminación de las aguas por nitratos procedentes de fuentes agrarias. Dicho decreto, señala que *“el agua subterránea es el recurso hídrico más sensible a la contaminación porque, aunque es difícil de contaminar, cuando esta se produce, su recuperación al estado inicial es lenta y complicada. Esto se debe a que su ritmo de renovación es muy lento, y el tiempo de permanencia de un contaminante puede ser de varios años. Por estos factores, el efecto de las acciones preventivas no se llega a reflejar hasta pasados unos años”*.

En la figura 2, se puede observar aquellas zonas cuyas aguas subterráneas superan, o se considera que puedan llegar a superar, una concentración de nitratos de 50 mg/L (límite máximo establecido para su consumo humano). Las superficies de terreno cuya escorrentía o filtración profunda pueda influir en el estado de las aguas superficiales o subterráneas declaradas como afectadas se designan como zonas vulnerables.



Figura 2. Zonas vulnerables a la contaminación por nitratos procedentes de fuentes agrarias en la Comunitat Valenciana. Fuente: Visor GVA (2018)

En el último decreto 86/2018, se denominaron zonas vulnerables un total de 290 municipios, Siendo su repartición provincial: 37 en Castellón, 182 en Valencia, y 71 en la provincia de Alicante. La legislación vigente también establece para estas zonas vulnerables un Programa de Actuación, de obligado cumplimiento, en el que se implementan una serie de medidas relacionadas con la fertilización nitrogenada mineral, el aporte de enmiendas orgánicas, el riego y el manejo de los cultivos, encaminadas a reducir la concentración de nitrato de las aguas subterráneas en dichas zonas vulnerables.

### 1.3. CICLOS DEL CARBONO Y DEL NITRÓGENO EN LOS SISTEMAS AGRÍCOLAS

#### 1.3.1. Ciclo del carbono en el suelo

El ciclo del carbono en el suelo (figura 3) se inicia con la fijación de dióxido de carbono atmosférico (fotosíntesis), siendo asimilado por las plantas y convirtiéndose a formas orgánicas, utilizadas para el crecimiento o como fuente de energía (respiración). Posteriormente, el material orgánico muerto, procedente del cultivo o de enmiendas orgánicas, es colonizado por diversos microorganismos del suelo, los cuales obtienen energía a partir de la descomposición oxidativa de las moléculas orgánicas complejas. Durante esta descomposición, aproximadamente la mitad del carbono es mineralizado y liberado nuevamente a la atmósfera en forma de CO<sub>2</sub> (Jaramillo, 2016).

Las principales fuentes de emisiones de CO<sub>2</sub> en los sistemas agrícolas son: a través de la respiración de las plantas, la oxidación del carbono orgánico del suelo y de los residuos del cultivo, y el uso de combustibles fósiles para la maquinaria agrícola. Los suelos también pueden ser productores de CH<sub>4</sub>, por ejemplo, en los humedales o los cultivos de arroz (CIMYTT, 2015).

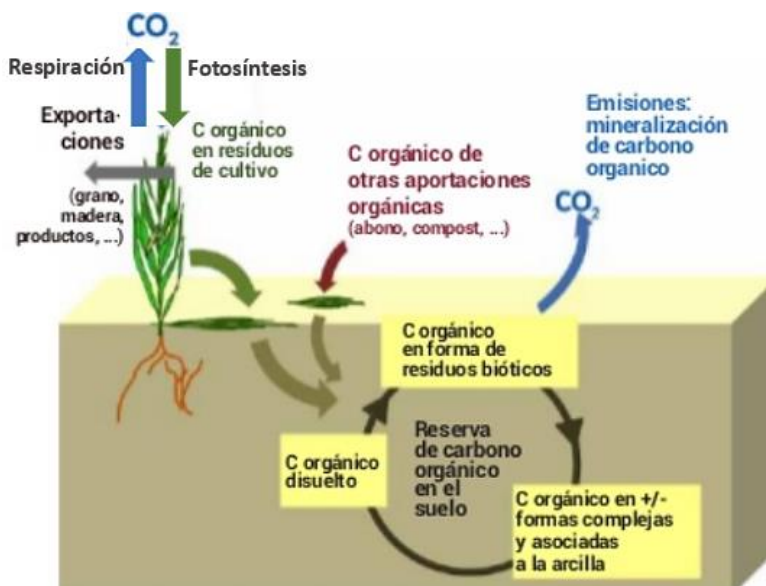


Figura 3. Ciclo del carbono en el suelo. Adaptado de: UNCCD, 2015

García (2018) indica que “la funcionalidad de los suelos depende en gran medida de su contenido en materia orgánica y, en concreto, del carbono orgánico que incorpora, ya que inciden positivamente sobre diversas propiedades (incluida la biodiversidad) de dichos suelos, así como sobre su fertilidad y productividad”. Es decir, que el ciclo del carbono es fundamental para que el suelo pueda cumplir todas sus funciones y es el responsable del adecuado funcionamiento de los ciclos biogeoquímicos del resto de elementos.

La reserva de carbono orgánico de un suelo (COS) es el resultado del balance en el tiempo entre las ganancias y las pérdidas del sistema, y depende sobre todo de las condiciones climáticas (principalmente la temperatura) y las propiedades del suelo. De manera, que los pronósticos de aumento de temperatura en una situación de cambio climático no es el único factor que puede hacer que el suelo pase de ser un sumidero de carbono a una fuente de emisiones. La forma en la que se maneje el suelo también influye en la cantidad de carbono que éste puede retener.

Se puede incrementar la materia orgánica en el suelo mediante ciertas prácticas agronómicas asociadas a la agricultura de conservación que comportan el laboreo mínimo o no laboreo y el uso de una cobertura vegetal continua y protectora formada por materiales vegetales vivos o muertos sobre la superficie del suelo (FAO,2002).

Diversos autores señalan el potencial de secuestro del COS como clave para mitigar el cambio climático al reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a través de la gestión sostenible del suelo (Jones *et al.*, 2005; Batjes,1998; Burbano, 2018). Se ha estimado que las mayores cantidades de COS se almacenan en la capa de permafrost de las regiones muy frías del hemisferio norte, con alrededor de 190 Pg C en los primeros 30 cm del suelo, principalmente en suelos de turba. En esas zonas, el carbono se acumula en los suelos en grandes cantidades debido a las bajas temperaturas que conducen a una baja actividad biológica y una descomposición lenta de la materia orgánica. Por el contrario, en regiones secas y cálidas como el desierto del Sahara, el crecimiento de las plantas es naturalmente escaso y sólo una pequeña cantidad de carbono entra en el suelo y queda fijado en él (FAO, 2018).

### 1.3.2. Ciclo del nitrógeno en el suelo

El ciclo del nitrógeno en el suelo (figura 4) es más complejo que el del carbono y comprende principalmente la fijación de nitrógeno, la mineralización, la nitrificación, la desnitrificación y la oxidación anaeróbica del ión amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) (Gutiérrez *et al.*,2012).

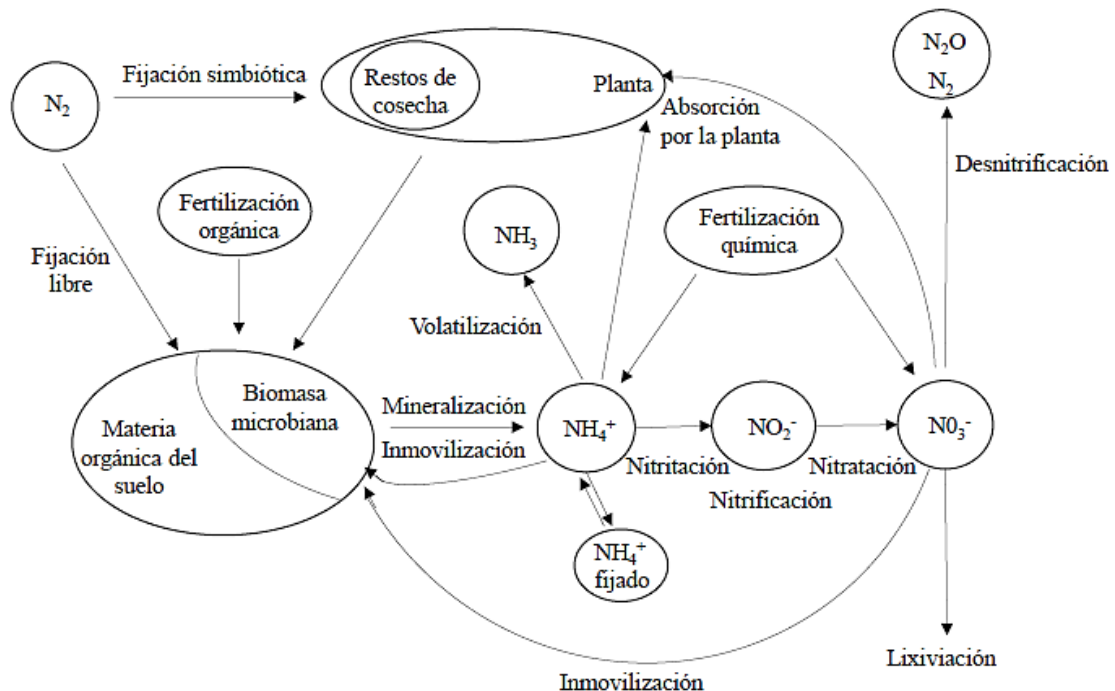


Figura 4. Ciclo del nitrógeno en el suelo. Fuente: Jaramillo,2016

La fijación de N<sub>2</sub> atmosférico es llevado a cabo por organismos procarióticos en vida libre o en simbiosis con las leguminosas. El nitrógeno en forma de ión amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) en el suelo puede estar sujeto a inmovilización por los microorganismos del suelo, absorción por la planta, fijación en las interláminas de algunas arcillas, volatilización en forma de amoníaco y oxidación a nitrato (nitrificación). El nitrógeno en forma de ión nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) por su parte también puede ser inmovilizado por la biomasa microbiana del suelo, absorbido por la planta, lixiviado o volatilizado (desnitrificación). Pero el nitrógeno en el suelo se encuentra mayoritariamente en forma orgánica, sujeta a procesos de transformación por parte de los microorganismos del suelo derivando en formas disponibles para la planta en el proceso denominado mineralización (Jaramillo, 2016).

Aunque normalmente se habla del componente orgánico como una única fracción, recientemente se ha propuesto que para interpretar los mecanismos y proponer modelos de la dinámica del nitrógeno, es necesario tener en cuenta las diferentes fracciones orgánicas o compartimentos, considerando que la temperatura, el tamaño de partícula de los residuos, la agregación, el tipo de suelo, la humedad, los procesos de aerobiosis y anaerobiosis y los restos vegetales, también tienen efectos sobre la dinámica del nitrógeno (Gutiérrez *et al.*, 2012).

Los ciclos del carbono y del nitrógeno están ligados por medio de los reservorios en el cultivo y la materia orgánica del suelo. Ello queda patente en parámetros como la relación C/N del suelo, indicador de la potencialidad para transformar la materia orgánica en nitrógeno mineral. Se considera que una relación C/N entre 10 y 12 produce una correcta liberación de nitrógeno, mientras que valores por encima o por debajo de esta cifra, provocan liberaciones muy escasas o excesivas. Adicionalmente, el aumento de la materia orgánica del suelo puede acelerar la dinámica del nitrógeno y, aumentar las emisiones de N<sub>2</sub>O, un gas de efecto invernadero. Estas emisiones pueden variar en función de las prácticas de labranza y de la tasa de aplicación del nitrógeno (UNCCD, 2015).

### **1.4. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y LA HUMEDAD DEL SUELO SOBRE LA DINÁMICA DE LA MATERIA ORGÁNICA**

Los factores involucrados en la actividad microbiana (temperatura, pH, humedad, disponibilidad de O<sub>2</sub>, nutrientes inorgánicos, accesibilidad al sustrato, etc.) influyen en la descomposición de la materia orgánica del suelo, tanto de los residuos frescos añadidos al suelo como los compuestos orgánicos humificados (Ordóñez *et al.*, 2008). La humedad y la temperatura se encuentran entre las variables más determinantes, porque influyen tanto en el desarrollo de la vegetación como en la actividad de los microorganismos, que son factores muy críticos de la formación del suelo. Según Kononova (1975), la intensidad máxima de la descomposición de la materia orgánica se produce en condiciones de temperatura moderada (alrededor de 30°C) y con un contenido de humedad de alrededor del 60-80% de la capacidad máxima de retención de agua del suelo.

La humedad del suelo depende entre otros factores, de la precipitación y la evapotranspiración en un momento determinado. La máxima cantidad de agua que un suelo puede retener depende de la textura y estructura del suelo, su contenido de materia orgánica y la profundidad de las raíces. Los suelos con una elevada cantidad de materia orgánica tienen capacidad para almacenar grandes volúmenes de agua. Esto es beneficioso no solo durante los períodos de sequías, sino también cuando se producen lluvias intensas porque el suelo reduce las inundaciones y la escorrentía y ralentiza el vertido de agua a los arroyos.

Debido al cambio climático, se prevén temperaturas más altas que conllevarían un mayor déficit de presión de vapor y demanda de evaporación, y una menor humedad del suelo que puede conducir a su vez, a un impacto aún más fuerte de las temperaturas extremas. Este hecho provocaría una expansión de las tierras áridas y reduciría sus reservas de COS al incrementarse su descomposición microbiana. Diversas fuentes apuntan a que el aumento de las temperaturas estimulará la pérdida neta de carbono del suelo a la atmósfera, lo que conducirá a una retroalimentación positiva del ciclo clima-carbono terrestre (figura 5) que podría acelerar el cambio climático. Por último, la degradación de las tierras junto a una mayor frecuencia de eventos extremos (precipitación extrema y sequía), puede intensificar la tasa y la susceptibilidad a la erosión, la salinización y otros procesos de degradación acelerados, lo que conduce a nuevas pérdidas de carbono (FAO, 2017).

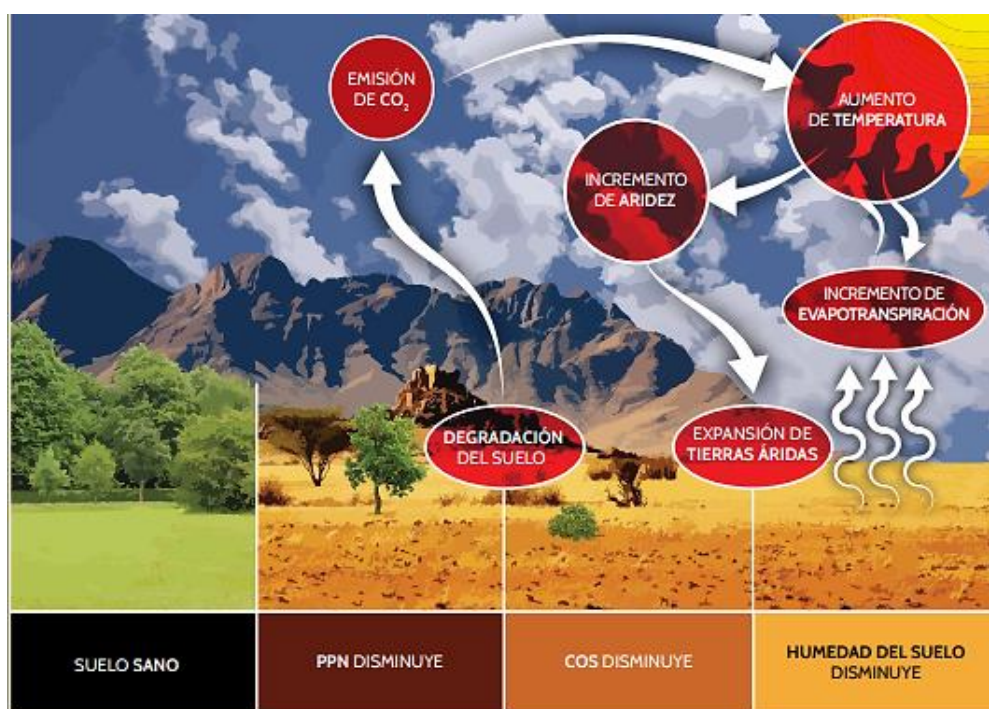


Figura 5. Diagrama esquemático de los ciclos de retroalimentación positiva y la expansión de las tierras áridas debido al cambio climático y la disminución de COS. Fuente: FAO, 2017

Técnicas como el no laboreo (agricultura de conservación) así como el uso de enmiendas orgánicas, permite absorber y almacenar más carbono y, por consiguiente, sintetizar más materia orgánica, lo que a largo plazo aumenta su capacidad productiva, y al mismo tiempo disminuye el CO<sub>2</sub> que se libera a la atmósfera. Sin embargo, la magnitud de la respuesta varía considerablemente en función de las condiciones edafológicas y climáticas (FAO, 2017).

#### 1.4.1. Efecto del incremento de los gases de efecto invernadero en el suelo

Los incrementos antropogénicos en el CO<sub>2</sub> atmosférico pueden impulsar una mayor productividad primaria neta (PPN), que representa el principal insumo de carbono al suelo, siempre y cuando no existan limitaciones de nutrientes y agua. Se espera que este aumento de la PPN estimule el crecimiento de las plantas, pero en última instancia, puede suponer una retroalimentación negativa sobre el CO<sub>2</sub> atmosférico a través de mayores aportaciones de COS. De hecho, la teoría de la limitación progresiva de los nutrientes enuncia que las respuestas de la PPN al CO<sub>2</sub> elevado estarán limitadas por el suministro de nutrientes del suelo, particularmente nitrógeno. Todavía no está claro si los aumentos en la PPN se traducirán en un mayor almacenamiento de COS.

Los estudios de enriquecimiento de CO<sub>2</sub> en aire libre a menudo no observan cambios en el COS a pesar del aumento de la PPN, posiblemente debido al aumento de las tasas de pérdida de los insumos de carbono o al aumento de la descomposición del COS a través del efecto impulsor. Por último, la acumulación de COS bajo niveles elevados de CO<sub>2</sub> puede ser difícil de medir debido a la heterogeneidad espacial en las reservas de COS y la corta escala temporal de los experimentos en relación con los tiempos de retorno del COS (FAO, 2017).

### 1.4.2. Escenarios de cambio climático

Las proyecciones regionalizadas de cambio climático (también llamados escenarios) proporcionan información detallada sobre las mejores estimaciones del clima futuro en una determinada región, y constituyen un elemento imprescindible para llevar a cabo las evaluaciones de impactos y vulnerabilidad en los distintos sectores sensibles a las condiciones climáticas, y por tanto para diseñar políticas adecuadas de adaptación a sus efectos y mitigación de los mismos.

Las proyecciones regionalizadas de cambio climático se obtienen a partir de las proyecciones calculadas con modelos climáticos globales a las que se aplican técnicas de regionalización para obtener resultados a menor escala, necesarios para el análisis de los posibles impactos. Las técnicas de regionalización se agrupan en dos grandes grupos: estadísticas y dinámicas (AEMET, 2019).

La predicción de los efectos compuestos del cambio climático en los suelos es extremadamente difícil debido a las complejas interacciones entre temperatura y humedad, aumento de la productividad y de la descomposición, y variaciones según las regiones y los tipos de suelo (FAO, 2017).

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) es una entidad científica que tiene por objeto proporcionar información objetiva, clara, equilibrada y neutral del estado actual de conocimientos sobre el cambio climático a los responsables políticos y otros sectores interesados. Según MITECO (2016b) en su quinto informe de evaluación del IPCC, predice que aquellos escenarios base en los que no se apliquen medidas adicionales para mitigar el cambio climático, la temperatura media global se incrementará para 2100 entre 3,7 y 4,8°C comparado con los niveles preindustriales. Por otra parte, aquellos escenarios, en los que se simula una importante reducción de las emisiones antropogénicas de GEI con el fin de no superar los de 2°C respecto a niveles preindustriales, se caracterizan por concentraciones en 2100 entre 430 y 480 ppm CO<sub>2eq</sub>. Este escenario resulta poco realista, ya que requiere para 2050 unas emisiones globales hasta un 70% menores que en 2010, y para 2100 unas emisiones casi nulas. Por ello, los pronósticos se basan en diferentes escenarios de emisiones, de más optimistas a más pesimistas.

El procedimiento para obtener escenarios de emisiones se modificó en el último informe del IPCC (AR5), considerando las denominadas sendas representativas de concentración (RCP en inglés) que describen diferentes proyecciones para las emisiones y concentraciones de gases de efecto invernadero y aerosoles y para usos del suelo a lo largo del siglo XXI. Los RCP representan el forzamiento radiativo total, es decir, la diferencia entre la insolación absorbida por la Tierra y la energía irradiada de vuelta al espacio. Para el año 2100, se plantea un RCP 4.5 (4,5 W/m<sup>2</sup>) como un escenario de estabilización y un RCP 8.5 (8,5 W/m<sup>2</sup>) como un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero. Las RCP incluyen además escenarios de fuerte reducción de las emisiones (RCP 2.6) y un escenario intermedio (RCP 6.0). Los escenarios de referencia, en los que no se controlan las emisiones, se sitúan entre RCP 6.0 y RCP 8.5. Las



proyecciones muestran un aumento de las temperaturas a lo largo del siglo XXI en todos los escenarios de emisiones evaluados. Es muy probable que las olas de calor se produzcan con más frecuencia y que sean de más duración, y que los eventos extremos de precipitación sean más intensos y frecuentes en muchas regiones. El océano continuará calentándose y acidificándose y el nivel medio global del mar continuará aumentando (MITECO, 2016b).

En España, el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) constituye el marco para la integración de las iniciativas de adaptación al cambio climático. El PNACC tiene entre sus objetivos la generación y puesta a disposición pública de una colección de escenarios que proyectan cómo se manifestará el cambio climático a lo largo del siglo XXI en España, proporcionando la información básica para todos aquellos interesados en realizar evaluaciones sectoriales de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático. Recientemente ha visto la luz una nueva versión de los escenarios PNACC, denominada PNACC-2017, en la que se incluyen las regionalizaciones estadísticas realizadas por AEMET y otros grupos de investigación con la información de los modelos globales utilizados en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC, así como de otros proyectos internacionales recientes como el proyecto CORDEX (MITECO, 2017).

Como se señala en el Plan de Adaptación al Cambio Climático de Valencia 2050 (MITECO, 2019), la agricultura y la biodiversidad son sectores vulnerables al cambio climático y se clasificarían dentro de los más vulnerables históricamente y en futuro próximo. Teniendo en cuenta además la dinámica que sigue el clima a nivel global, este trabajo plantea los posibles escenarios que se prevén en un futuro cercano, a medio plazo y a largo plazo para la zona de la huerta de Valencia, municipio costero que asimismo puede verse afectado por el aumento de la temperatura media, la disminución de la precipitación, los eventos climáticos extremos como olas de calor y sequías, y el aumento del nivel del mar. Dichos escenarios climáticos, resultan cruciales para el pronóstico de las reservas de COS (dependientes de los factores ambientales) y el buen entendimiento de los balances de C y N en el suelo, y de esta manera, aportar información a los diversos actores interesados (agricultores, responsables políticos, usuarios de la tierra), para así hacer un uso óptimo del suelo y ofrecer las mejores oportunidades de mitigación del y adaptación al cambio climático, pero también asegurar la producción de alimentos y el suministro de agua suficiente.

## **2. OBJETIVOS**

El presente estudio tiene como objetivo evaluar el modo en que diferentes escenarios de cambio climático pronosticados modificarían las condiciones de temperatura y humedad del suelo, y profundizar, mediante el uso de dos modelos de simulación suelo-planta, en los efectos de dichas variables sobre los procesos de descomposición y mineralización de la materia orgánica del suelo para una rotación de cultivos típica de la huerta de Valencia. Ello conllevará a una mejor comprensión de los balances de C y N, y a una mejora de las prácticas agrícolas encaminadas al mantenimiento del balance de la materia orgánica del suelo.

Para ello, se contemplarán diferentes etapas:

- i) Revisión bibliográfica sobre escenarios de cambio climático y obtención de los datos de temperatura y precipitación pronosticados a corto, medio y largo plazo.
- ii) Calibración de los modelos de simulación del sistema suelo-agua-planta que se utilizan en el trabajo (LEACHMN y EU-Rotate\_N).
- iii) Simulación de los diferentes escenarios climáticos en la rotación de cultivos definida.
- iv) Análisis de resultados, valorándose el contenido en nitrógeno mineral, la lixiviación de nitrato, la respiración del suelo y el contenido en carbono de los distintos compartimentos del suelo, la lámina de agua y el drenaje.
- v) Conclusiones y posibles recomendaciones en el manejo de la fertilización orgánica y mineral.

### **3. MATERIAL Y MÉTODOS**

### 3.1. MODELOS DE SIMULACIÓN

Los modelos de simulación constituyen una herramienta fundamental para entender la complejidad que caracteriza los sistemas ecológicos y ambientales. Un buen modelo es capaz de revelar interacciones entre los diferentes componentes del sistema que no eran evidentes al estudiar cada uno de los procesos separadamente, y permite ensayar experimentos que no se podrían realizar en una situación real (Hernández *et al.*, 2009).

De manera, que la construcción de un modelo de simulación consiste en la individualización de una serie de algoritmos matemáticos, mediante los cuales es posible reproducir de la manera más fiel posible, el comportamiento del sistema examinado, en este caso, de un sistema de producción agrícola. Para conseguir la mayor verosimilitud, el modelo debe someterse previamente a un proceso de calibración y validación, para lo que es necesario disponer de datos de entrada o *inputs* relativos al sistema (clima, suelo, cultivo, nitrógeno) y datos experimentales que permitan la comparación con las salidas u *outputs* del modelo en las distintas simulaciones.

Los dos modelos utilizados, LEACHM y EU-ROTATE\_N, tienen distinto grado de complejidad y lo que se pretende con ellos, es evaluar la posibilidad de ser utilizados para realizar recomendaciones en el manejo de la fertilización, orgánica y mineral, y de los residuos generados en explotaciones agrícolas de similares características a las simuladas en este trabajo.

#### 3.1.1. MODELO LEACHM

LEACHM (Leaching Estimation And CHemistry Model) es un modelo mecanicista de tipo físico el cual describe el régimen de agua y sales, y el transporte de solutos en suelos no saturados o parcialmente saturados (Wagenet and Hutson, 1989). El transporte de agua se resuelve mediante la ecuación de Richards (aunque también incorpora un modelo de capacidad no utilizado en este trabajo), y el transporte de solutos mediante la ecuación de convección-dispersión. Se trata de un modelo bien documentado, fácil de usar y de fácil lectura, que requiere poco tiempo de cálculo, y se encuentra estructurado en subrutinas que facilitan las posibles modificaciones en el caso de disponer del código fuente, ya que se trata de un código cerrado.

La **figura 6** muestra de forma esquematizada los distintos componentes y procesos que conforman el sistema suelo-planta descritos por LEACHM.

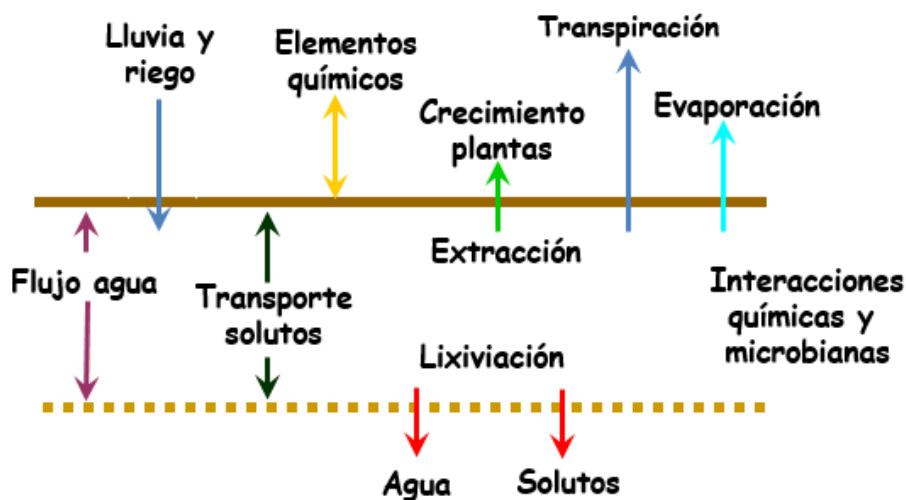


Figura 6. Principales componentes y procesos descritos por LEACHM

### 3.1.1.1. Flujo de agua y transporte de solutos

El modelo aplica la ecuación de Richard (ec.1) para calcular el flujo de agua en suelos no saturados. Esta ecuación de flujo vertical transitorio se deriva de la combinación de la ley de Darcy y de la ecuación de la continuidad, siendo su expresión final la siguiente:

$$\frac{\delta\theta}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta z} \left[ K(\theta) \frac{\delta H}{\delta z} \right] - U(z, t) \quad (ec. 1)$$

donde  $\theta$  es el contenido volumétrico de agua ( $m^3 \cdot m^{-3}$ ),  $H$  es el potencial hidráulico (mm),  $K$  es la conductividad hidráulica ( $mm \cdot d^{-1}$ ),  $t$  es el tiempo (d),  $z$  es la profundidad (mm) y  $U_w$  es un término sumidero que representa la pérdida de agua por unidad de tiempo debida a la transpiración de la planta.

Una vez estimado los flujos de agua, el transporte de solutos se puede estimar usando una solución numérica de la ecuación de convección-dispersión (ec.2) cuya expresión considera la absorción simultánea, las fuentes y los sumideros de solutos.

$$\frac{\delta\theta c}{\delta t} + \frac{\delta(\rho s)}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta z} [\theta D(\theta, q) - qc] - U(z, t) \pm \Phi(z, t) \quad (ec. 2)$$

Donde  $c$  es la concentración total de solutos en fase líquida,  $s$  es la concentración de la fase adsorbida,  $\rho$  es la densidad aparente,  $D(\theta, q)$  es el coeficiente de dispersión efectiva, que incluye la dispersión mecánica y la difusión química,  $q$  es la densidad de flujo de agua,  $U(z, t)$  es la extracción de nitrógeno por la planta y  $\Phi$  es un término que contabiliza las ganancias o pérdidas debidas a las transformaciones del nitrógeno en el suelo

LEACHM concibe el flujo de agua y el transporte de solutos en suelos no saturados como una malla unidimensional con nudos y segmentos para la resolución de las ecuaciones diferenciales por el método de diferencias finitas. Para ello, el perfil es dividido en segmentos horizontales con nudos equidistantes centrados en las celdas y el período de tiempo en pequeños intervalos de 0,05 día. El nudo superior ( $i = 1$ ) y el inferior ( $i = k$ ) están fuera del perfil del suelo y se usan para mantener las condiciones de contorno deseadas.

### 3.1.1.2. Ciclo del carbono en LEACHM

Este modelo contempla tres compartimentos de carbono orgánico (residuos vegetales, humus y enmiendas orgánicas) tal y como se muestra en la figura 7 y considera la descomposición del carbono en el suelo mediante cinéticas de primer orden (ec.3).

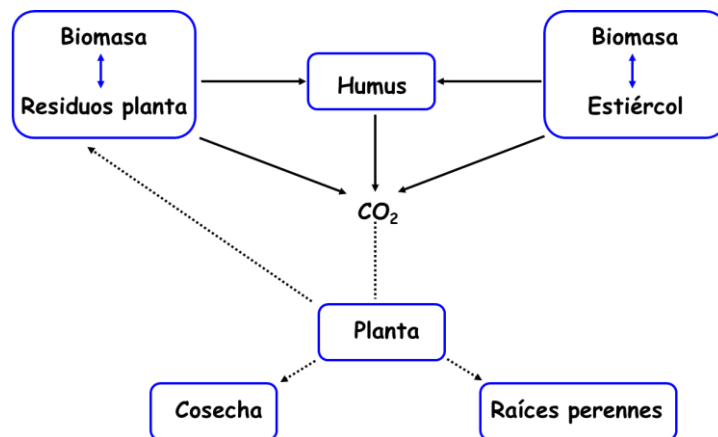


Figura 7. Ciclo del carbono considerado en LEACHM

$$\frac{dC_i}{dt} = -k_{mi} C_i \quad (ec. 3)$$

donde  $C_i$  representa el contenido de carbono orgánico de cada uno de los compartimentos,  $k_{mi}$  la tasa de mineralización de cada compartimento y  $t$  el tiempo. Se asume que el carbono orgánico en el suelo se transforma en humus, es asimilado por la biomasa microbiana del suelo y parte se pierde como  $CO_2$ , durante la respiración heterótrofa.

La relación entre los tres compartimentos queda definida por el factor de eficiencia y por el factor de humificación. El factor de eficiencia ( $f_e$ ) es la fracción de C mineralizado que se convierte en humus y biomasa en lugar de  $CO_2$  (ec.4), mientras que el factor de humificación ( $f_h$ ) define las cantidades relativas de humus y biomasa producidas (ec.5).

$$f_e = \frac{C_{humus} + C_{biomasa}}{C_{humus} + C_{biomasa} + CO_2} \quad (ec. 4)$$

$$f_h = \frac{C_{humus}}{C_{humus} + C_{biomasa}} \quad (ec. 5)$$

### 3.1.1.3. Ciclo del nitrógeno en LEACHM

El ciclo de nitrógeno es algo más complejo que el de carbono. La figura 8 muestra los tres compartimentos de nitrógeno orgánico (humus, enmiendas orgánicas, residuos vegetales), los tres compartimentos de nitrógeno mineral (urea, amonio y nitrato), los principales procesos de transformación y los flujos de nitrógeno entre compartimentos. Las líneas discontinuas representan el proceso de inmovilización.

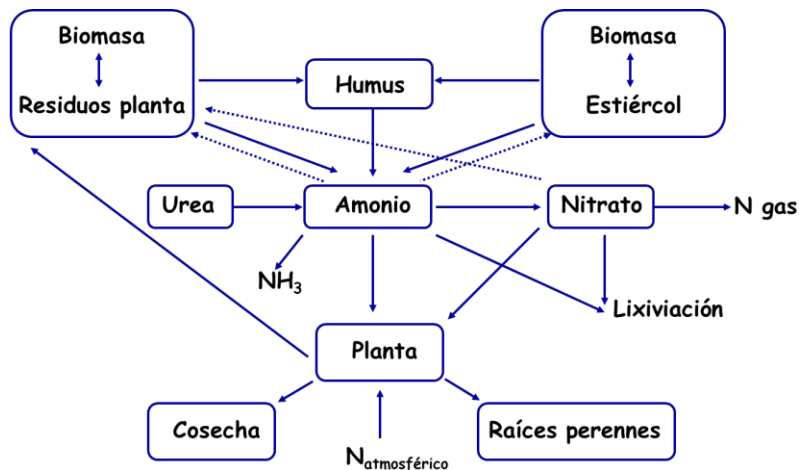


Figura 8. Ciclo del nitrógeno considerado en LEACHM

Los principales procesos de transformación del nitrógeno contemplados en LEACHM son:

- i. **Mineralización:** al igual que el carbono, va a depender del contenido de nitrógeno orgánico  $N_i$  presente en cada uno de los compartimentos, de la tasa de mineralización  $K_{mi}$  de cada compartimento y de  $t$  el tiempo transcurrido. Este proceso es descrito por una cinética de primer orden.
- ii. **Nitrificación:** el paso de  $NH_4^+$  a  $NO_3^-$ , va a depender de la proporción entre el contenido de nitrato y el de amonio, de la tasa de nitrificación  $K_{nit}$ , de la máxima relación  $NO_3^-/NH_4^+$ ,  $r_{máx}$  y del tiempo  $t$  transcurrido.
- iii. **Desnitrificación:** la conversión de  $NO_3^-$  a óxidos de nitrógeno y  $N_2$  (gas), va a depender del contenido inicial de nitrato en el suelo, de la tasa de desnitrificación  $K_{desnit}$ , de una constante de saturación  $C_{sat}$  y del tiempo  $t$  transcurrido.
- iv. **Volatilización:** para la conversión de  $NH_4^+$  a  $NH_3$  (gas), el modelo sigue una cinética de primer orden respecto de la concentración de amonio presente en la superficie del suelo.

### 3.1.2. EU-Rotate\_N

El modelo EU-Rotate\_N se desarrolló en 2010 en el marco de un proyecto de investigación europeo como una herramienta para la evaluación y mejora de los impactos ambientales y del rendimiento económico de diferentes rotaciones de cultivos en sistemas de producción convencionales y ecológicos. Puede aplicarse a un total de 70 cultivos herbáceos caracterizados mediante diferentes parámetros de cultivo para las condiciones de los países de la Unión Europea.

EU-Rotate\_N describe el desarrollo y la producción de diferentes cultivos hortícolas, así como la dinámica del agua y del nitrógeno en el suelo, considerando un espesor de 2 metros y utilizando una división del perfil en capas de 5 cm de espesor. Se trata de un modelo bidimensional, que permite una mayor flexibilidad a la hora de simular diferentes sistemas y prácticas de cultivo, como es la presencia de caballones, diferentes sistemas de riego y abonado o la posibilidad de cultivos mult cosecha (Rahn *et al.*, 2010).

El modelo se estructura en una serie de submódulos que simulan el crecimiento radicular y la parte aérea del cultivo, la mineralización de N procedente de la materia orgánica del suelo, de los abonados orgánicos y de los residuos del cultivo, la absorción de N por la planta, y el balance entre disponibilidad y demanda de N para regular el crecimiento. Estos procesos se ven afectados por factores ambientales tales como la lluvia, la temperatura y la radiación.

En la figura 9, se puede observar de forma esquematizada el orden en el que operan los distintos submódulos en el modelo EU-Rotate\_N y que requiere entre otros, de información sobre las propiedades del suelo, residuos de cultivos precedentes, fertilizantes, riegos, cultivo y datos climáticos.

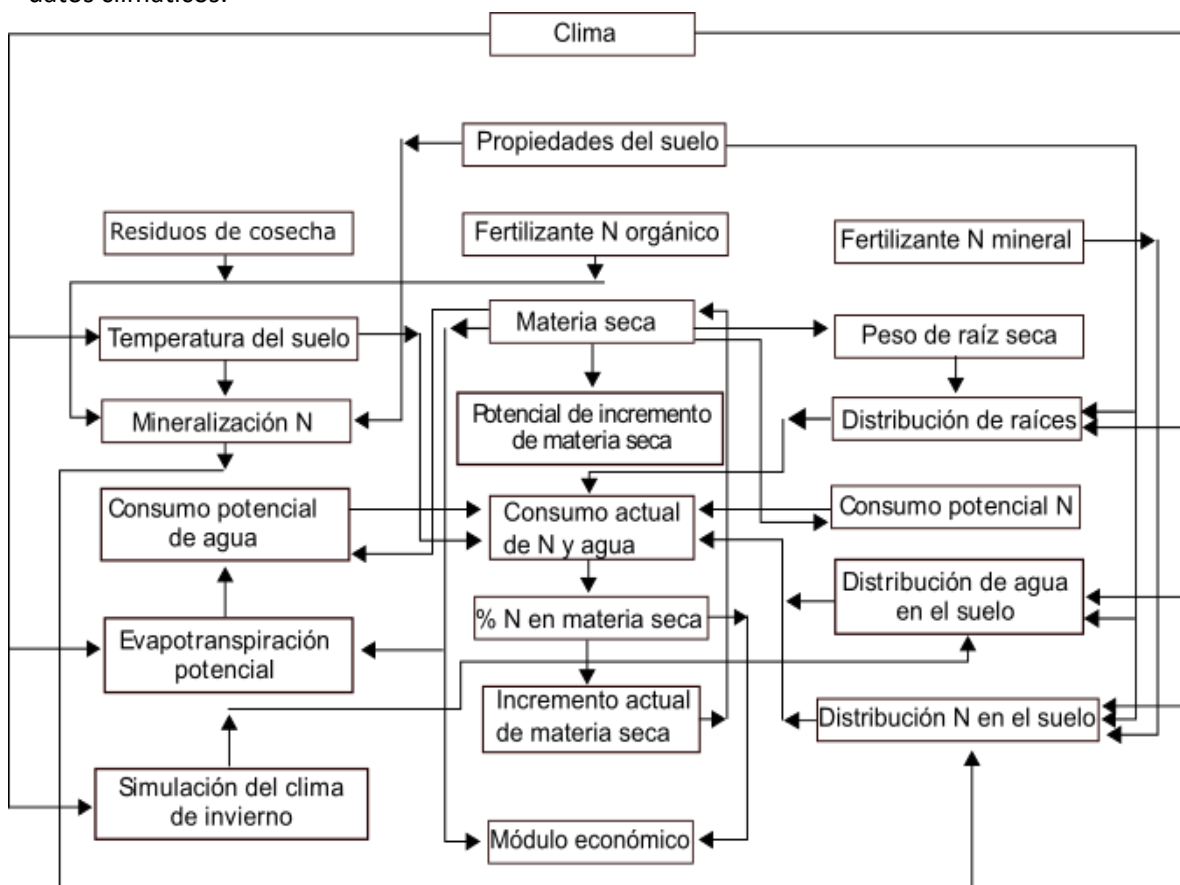


Figura 9. Organización de los principales submódulos del modelo EU-Rotate\_N. Fuente: "Brief Description of The Eu-Rotate\_N model" en [www.warwick.ac.uk/go/eurotaten](http://www.warwick.ac.uk/go/eurotaten); adaptado por Jaramillo (2015)



La mineralización del nitrógeno a partir de la materia orgánica del suelo se basa en el enfoque adoptado en el modelo DAISY (Hansen *et al.*, 1990), el cual considera tres compartimentos orgánicos (humus del suelo, biomasa microbiana y materia orgánica añadida) que se descomponen a dos velocidades (lenta y rápida). La descomposición sigue una cinética de primer orden siendo las tasas de descomposición afectadas de la temperatura y de la humedad del suelo. En las figuras 10 y 11, se muestran los compartimentos y procesos considerados por el modelo en el caso del ciclo del carbono y del nitrógeno, respectivamente.

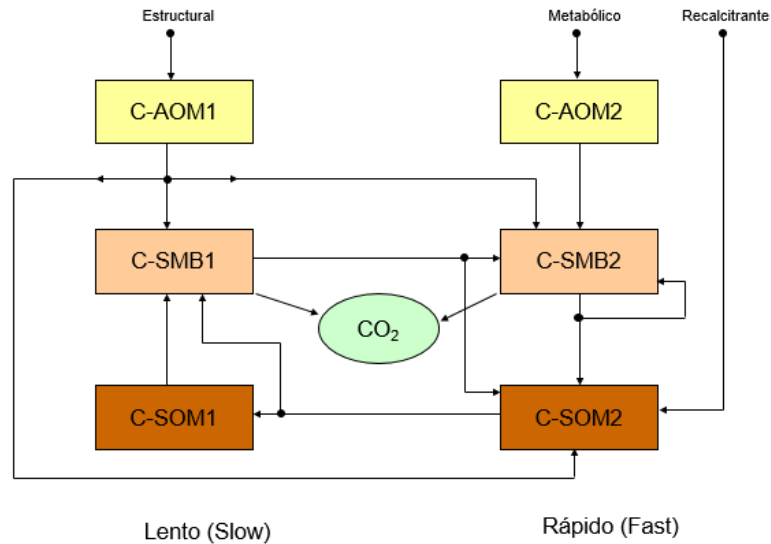


Figura 10. Compartimentos y procesos del ciclo del carbono considerados en EU-Rotate\_N

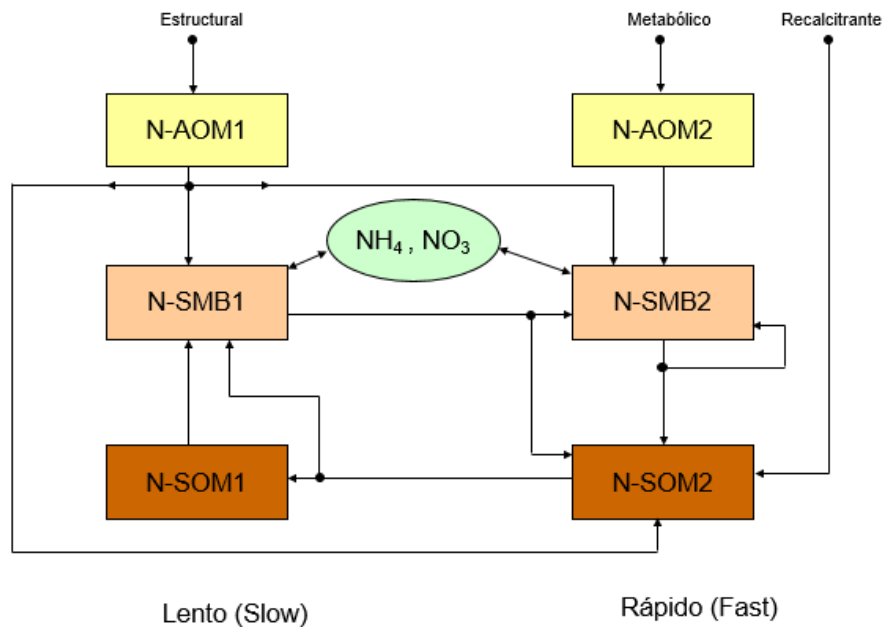


Figura 11. Compartimentos y procesos del ciclo de nitrógeno considerados en EU-Rotate\_N

La nitrificación sigue la cinética de Michaelis-Menten. El proceso de desnitrificación sigue una ecuación similar siendo dependiente de la concentración de nitrato del suelo. El modelo EU-Rotate\_N también considera la volatilización del amoníaco después de la incorporación de una enmienda orgánica o del aporte de abonos amoniacales, según el modelo descrito por Søgaard *et al.*, (2002).

### 3.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS

Los datos experimentales partieron de la información recogida en la tesis doctoral “Mineralización de la gallinaza y de los restos de cosecha en el suelo. Aplicación al cultivo de la coliflor en la Huerta de Valencia” (Jaramillo, 2015). La evaluación (calibración y validación) de los dos modelos utilizados en el presente estudio, se realizó tomando los datos procedentes de la parcela denominada Paterna II (39°29’ N, 0°26’ W) situada en la huerta de Valencia. El período utilizado para la evaluación de los modelos fue el comprendido entre el 15 de julio de 2013 y el 15 de mayo de 2014 (tabla 1), un período de 10 meses que abarcaba el aporte de gallinaza antes del cultivo de coliflor, el propio cultivo que se llevó a cabo entre septiembre y marzo, y el posterior enterrado de los restos de cosecha hasta el inicio del siguiente cultivo.

Tabla 1. Cronograma de los períodos de evaluación de la mineralización de N en la parcela Paterna II\_ cultivada con coliflor

Jul.	Ag.	Sp.	Oct.	Nov.	Dic.	En.	Fb.	Mz.	Ab.	My.	
Mineralización de gallinaza		Mineralización del suelo durante el cultivo de coliflor						Mineralización restos de cosecha de coliflor			
15/07/13- 10/09/13		10/09/13-04/03/14						04/03/14-15/05/14			

Las simulaciones realizadas comprendían los siguientes cuatro tratamientos: i) con aporte de gallinaza y con incorporación de los restos de cosecha de coliflor (CG-CR), ii) con aporte de gallinaza y sin incorporación de los restos de cosecha de coliflor (CG-SR), iii) sin aporte de gallinaza y considerando la incorporación de los restos de cosecha (SG-CR) y iv) sin aporte de gallinaza y sin incorporación de los restos de cosecha (SG-SR). Las simulaciones se hicieron para el espesor de 0-45 cm, por ser la zona donde se produce el grueso de la mineralización, y considerando tres capas de suelo de 15 cm.

Para poder comparar los resultados de mineralización de los modelos y así realizar la calibración de los modelos, se utilizaron las siguientes medidas obtenidas en la parcela Paterna II: el contenido de nitrógeno mineral del suelo, la tasa de respiración del suelo, la lámina de agua en el perfil, y el drenaje y la lixiviación de nitrato a 45 cm de profundidad.

Los datos climáticos para el período simulado se obtuvieron del IVIA, concretamente de la estación meteorológica de Manises escogida por su proximidad a la zona de ensayo. El modelo LEACHM requiere de los valores diarios de precipitación y de los valores semanales de evapotranspiración, temperatura media y amplitud térmica. A diferencia de LEACHM que se estructura en un único fichero para la entrada de datos, EU-Rotate\_N se estructura en subrutinas, por lo que se introduce toda la información climática diaria en el fichero específico denominado *\*clima*, el cual requiere datos diarios de al menos temperatura, precipitación y evapotranspiración, aunque puede utilizar otros datos meteorológicos como viento y radiación.

Así mismo, ambos modelos requieren principalmente de *inputs* relativos a las condiciones iniciales de humedad del suelo y de cada uno de los compartimentos del carbono y nitrógeno del suelo, así como datos relativos al cultivo (coliflor en este caso) y su manejo (fertilización orgánica y mineral) y las propiedades físicoquímicas del suelo (tabla 2). En el apartado Anexos, se muestran en detalle los ficheros de entrada utilizados en ambos modelos.

Tabla 2. Condiciones iniciales y propiedades fisicoquímicas del suelo de la parcela Paterna II

Capa suelo (cm)	Contenidos iniciales		Propiedades fisicoquímicas e hidráulicas							
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg N/kg)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg N/kg)	Arcilla (%)	Limo (%)	C <sub>org</sub> (%)	Dens ap. (kg /m <sup>3</sup> )	Hum vol (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Coef a (kPa)	Coef b	Kh <sub>sat</sub> (mm/d)
0-15	0,32	17,89	32	43	0,97	1.158	0,1866	-3,27	3,90	500
15- 30	0,32	17,89	34	39	0,94	1.628	0,2623	-5,07	12,94	250
30-45	0,84	13,04	40	40	0,78	1.591	0,3239	-5,07	14,47	75

Durante el ensayo se realizaron hasta un máximo de tres abonados (CG-CR), en función del tratamiento realizado (tabla 3), se produjeron un total de 34 eventos de precipitación y se aplicaron un total de 10 riegos.

Tabla 3. Características de los tratamientos en función de los abonados

Tipo de abonado	CG-CR	CG-SR	SG-CR	SG-SR
Aporte de gallinaza	X	X		
Abonado de cobertera	X	X	X	X
Incorporación de los residuos de coliflor	X		X	

La aplicación de gallinaza fue a razón de 27,6 t ha<sup>-1</sup> (materia fresca), lo que supuso un aporte de 659 kg N<sub>org</sub> ha<sup>-1</sup>, 48 kg N<sub>min</sub> ha<sup>-1</sup> y 4792 kg C<sub>org</sub> ha<sup>-1</sup>. En cuanto al abonado de cobertera de origen 100% amoniacal, supuso un aporte de 90 kg N<sub>min</sub> ha<sup>-1</sup>. El contenido promedio de nitrógeno en los residuos de coliflor utilizados fue de 258 kg N ha<sup>-1</sup> y 3380 kg C ha<sup>-1</sup> de relación C/N igual a 13.

En el caso del modelo EU-Rotate\_N los parámetros hidráulicos del suelo (tabla 4) se obtuvieron de Jaramillo (2015). El coeficiente de drenaje utilizado por el modelo es calculado por defecto, en función de la humedad de saturación y de la humedad a capacidad de campo. No se consideró escorrentía en la parcela, ya que su pendiente era despreciable y la presencia de caballones al final de la misma impedía la salida del excedente de riego de la parcela.

Tabla 4. Parámetros hidráulicos utilizados en EU-Rotate\_N. Fuente: Jaramillo (2015)

Parámetro	Capa suelo (cm)		
	0-15	15-30	30-45
Humedad a saturación ( $\theta_{sat}$ ) (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,451	0,435	0,375
Humedad a capacidad de campo ( $\theta_{cc}$ ) (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,349	0,286	0,300
Humedad a marchitez permanente ( $\theta_{sat}$ ) (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,114	0,185	0,195
Coefficiente de drenaje (valor por defecto)	0,226	0,343	0,200
Agua fácilmente evaporable (mm) (REW)	8,0		
Espesor de la capa de evaporación (m) (Z <sub>e</sub> )	0,1		

Con respecto al cultivo, el marco de plantación para la coliflor fue de 64 cm (ancho entre filas) x 74 cm (distancia entre plantas). También se consideraron que las extracciones por parte del cultivo fueron de 250 kg N ha<sup>-1</sup> y 80 kg P ha<sup>-1</sup>. En el momento del trasplante, la materia seca se consideró de 2,9 kg ha<sup>-1</sup>, con un contenido del 5% en nitrógeno. La producción total de materia seca fue de 10,4 t ha<sup>-1</sup>, con un aprovechamiento del 80% de la biomasa total (fracción cosechada). En la tabla 5, se pueden observar otros de los parámetros utilizados en EU-Rotate\_N, específicos del cultivo que se determinaron de ensayos realizados en el IVIA.

Tabla 5. Parámetros específicos del cultivo de coliflor en EU-Rotate\_N. Fuente: Jaramillo (2015)

Parámetro	Valor IVIA
Parámetros curva crítica N:	
<i>PNINF</i>	3,262
<i>B<sub>o</sub></i>	0,728
Temperatura base (°C) ( <i>Base</i> )	0,0
Período de retraso antes del comienzo del crecimiento (°C día) ( <i>Ddlag</i> )	1
Altura máxima del cultivo (m) ( <i>H<sub>max</sub></i> )	0,7

### 3.3. CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN

La calibración es el proceso de comparar los valores predichos por los modelos con los valores medidos para un mismo período, con el objetivo de ajustar aquellos parámetros del modelo de mayor relevancia para la variable estudiada. En este caso, la calibración se realizó para el cultivo de la coliflor, del cual se dispone de una mayor cantidad de datos experimentales. Además, es un cultivo típico no solo de España, donde se destinan aproximadamente 7.000 hectáreas al cultivo de la coliflor, sino de la Comunitat Valenciana ya que se trata de la segunda zona productora con cerca de un 16% de la superficie cultivada. Se puede considerar un cultivo típico de la zona de la huerta de Valencia, siendo habitual en las rotaciones que realizan los agricultores de la zona.

El primer paso consiste en conocer aquellos parámetros relevantes para los procesos simulados mediante un análisis de sensibilidad. Con ello, se consigue conocer la influencia de las entradas (inputs) en las predicciones del modelo y comprobar, los parámetros que más influyen en las variables medidas de interés, que en este caso son: contenido de N mineral al final del cultivo, lixiviación de nitrato, lámina y drenaje de agua. Cada parámetro es variado en un rango determinado y se valora el impacto de dicho cambio sobre las variables de interés.

En este caso se partía de una calibración previa de los parámetros hidráulicos del suelo y del ciclo del N en ambos modelos, tras un análisis de sensibilidad que determinó los parámetros relevantes (Sánchez, 2015). Por ello, los parámetros que se modificaron en el presente estudio por su influencia sobre los procesos de mineralización y descomposición de la materia orgánica del suelo fueron: la constante de mineralización del humus en el suelo ( $K_{\text{humus}}$ ) y la constante de mineralización de la gallinaza ( $K_{\text{manure}}$ ). Este último parámetro solo intervino en aquellos tratamientos que incorporaban gallinaza.

Dado que existía esta calibración previa del modelo LEACHM para el período completo del cultivo de la coliflor (10 meses), se decidió en esta ocasión realizar en primer lugar una calibración por subperíodos para seguidamente en función de los resultados calibrar el período completo. Con ello, se pretendía saber si de esta forma se obtenía un mejor ajuste en la calibración del modelo. Los subperíodos correspondieron a: la incorporación de la gallinaza, el cultivo de coliflor y la incorporación de los residuos tras la cosecha. La calibración se realizó para cada profundidad de suelo (0-15 cm, 15-30 cm y 30-45 cm), pero finalmente los resultados se expresaron para la capa de suelo de 0-45 cm. En los tres subperíodos comenzó la calibración con los tratamientos sin gallinaza para así obtener la constante de mineralización del humus ( $K_{\text{humus}}$ ), y, en segundo lugar, se utilizaron los tratamientos con gallinaza, para obtener la constante de mineralización de la gallinaza ( $K_{\text{manure}}$ ). Se procedió siguiendo este orden, debido a que en cuanto a mineralización se refiere, los tratamientos SG solo se ven influenciados por la  $K_{\text{humus}}$ , mientras

que los tratamientos CG además de verse afectados por la  $K_{\text{humus}}$  también se ven afectados por la constante  $K_{\text{manure}}$ .

En el caso del modelo EU-Rotate\_N, dado que los resultados de calibración obtenidos por Jaramillo (2015) proporcionaron un buen ajuste, se decidió partir de dichos resultados para realizar las simulaciones del período completo de 10 meses.

En las tablas 6, 7 y 8 pueden observarse las acciones más relevantes llevadas a cabo en la Parcela II para cada subperíodo. En los 10 meses, se realizaron un total de 17 muestreos de suelo, tomándose en cada muestreo distintos puntos de profundidad en el suelo (0-15 cm, 15-30 cm y 30-45 cm). Por otro lado, la mineralización del carbono se estimó empleando un analizador de gas ambiental portátil que permite medir la tasa de  $\text{CO}_2$  en  $\text{g CO}_2 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$ . En total se realizaron 26 medidas de respiración del suelo.

Tabla 6. Cronograma del ensayo de mineralización de gallinaza (15/07/13 – 10/09/13)

Mes Día	Julio			Agosto									Septiembre			
	15	22	29	3	5	14	20	21	26	27	28	29	30	2	6	10
Muestreo	x	x	x			x								x		x
Lectura respiración	x	x	x			x								x	x	x
Labrado	x*				x											
Riego (mm)														146		

\* Incorporación de la gallinaza

Tabla 7. Cronograma del ensayo de mineralización durante el cultivo (10/09/13 - 04/03/14)

Mes Día	Septiembre			Octubre					Noviembre					Diciembre				Enero			Febrero							
	16	23	30	4	7	14	16	24	25	28	29	8	11	22	25	28	10	20	25	27	6	13	24	3	14	15	16	21
Muestreo				x				x					x						x			x						x
Lectura respiración		x	x	x		x				x		x					x		x			x		x	x			x
Abonado							x																					
Recolección																									x	x		
Riego (mm)	110	62					77				99		67		68						90			93				

Tabla 8. Cronograma del ensayo de mineralización de los restos de cosecha (04/03/14- 15/05/14)

Mes Día	Marzo							Abril							Mayo					
	4	6	12	13	20	21	27	28	30	1	3	4	14	21	24	29	30	12	15	
Muestreo	x					x				x					x					Fin
Lectura respiración			x			x		x				x			x					x
Labor profunda	x*								x											
Riego (mm)																	151			

\*Incorporación de los restos de cosecha

Para conocer el comportamiento del nitrógeno mineral en cada uno de los escenarios contemplados se realizaron balances de nitrógeno a partir de los muestreos de suelo, así como balances de agua y/o cloruro para poder determinar la lámina y drenaje de agua y, con este último, determinar la lixiviación de nitrato. Tras la calibración de cada subperíodo, se procede a la calibración y validación del período completo de 10 meses obteniéndose, finalmente, los valores definitivos de las constantes de mineralización ( $K_{\text{humus}}$  y  $K_{\text{manure}}$ ).

### 3.3.1. Herramientas para la evaluación de los modelos

Se utilizaron diferentes estadísticos de entre los propuestos por Willmott (1982) para evaluar el funcionamiento del modelo y su capacidad para predecir el contenido de nitrógeno mineral en el suelo y la lámina de agua. El error medio o diferencia media (ec. 6) de los valores observados (medidos)  $O_i$  frente a los simulados  $S_i$ , definido como:

$$d = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - S_i) \tag{ec.6}$$

Un valor positivo, indica que el modelo infraestima las predicciones de la variable estudiada, y un valor negativo indica que las sobreestima. Este estadístico ayuda en la identificación de las tendencias en las predicciones del modelo, pero no es suficiente para determinar el error por la compensación de valores negativos y positivos. Para solucionar este problema, se utiliza el RMSE (ec.7), definido como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2} \tag{ec.7}$$

que tiene las mismas unidades que los valores observados y simulados, siendo fácil su interpretación. Las grandes diferencias entre valores observados y simulados contribuyen más al valor, teniendo un mayor peso en el estadístico. También se ha utilizado NRMSE (ec.8), que es el valor normalizado de RMSE, definido como:

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}}{\bar{O}} \tag{ec.8}$$

el cual es independiente de las unidades de medida de los datos observados y simulados y puede ser útil para comparar diferentes series de datos. El valor mínimo para este estadístico es 0, siendo también el valor óptimo en una evaluación de la predicción de un modelo. Proporciona una medida del error de la predicción.

Así mismo, se realizó la representación gráfica de los valores medidos frente a los simulados, indicando valores del coeficiente de determinación próximos a 1 una relación lineal perfecta entre los valores observados y simulados. Sin embargo, esto no implica necesariamente que el modelo sea perfecto ya que es insensible a las diferencias proporcionales y aditivas entre valores observados y simulados, por lo que se tiene que utilizar junto a los estadísticos mencionados para evaluar la calidad de la predicción.

### 3.3.2. Evaluación de los modelos en una rotación de cultivos

Tras la evaluación de los modelos para el cultivo de la coliflor, fue necesario evaluar los modelos para una rotación de cultivos típica de la zona. Se optó por una rotación de dos años, comprendiendo un período de simulación comprendido entre julio de 2013 y julio de 2015. Los cultivos considerados en la rotación fueron coliflor, en el período anteriormente mencionado, calabaza (del 1/05/14 al 31/08/14) y cebolla (del 8/10/14 al 15/04/15) (tabla 9). La rotación considera un aporte bianual de gallinaza en el mes de julio, por ello el tratamiento que se tuvo en cuenta para estudiar la rotación fue el que aportaba gallinaza e incorporaba los restos de cosecha (CG-CR), ya que se trata de la situación que incorpora materia orgánica al suelo siendo la más idónea para predecir el comportamiento del suelo respecto del C y N.

Tabla 9. Rotación seleccionada para la simulación

2013						2014												2015						
Jl	Ag	Sp	Oc	Nv	Dc	En	Fb	Mz	Ab	My	Jn	Jl	Ag	Sp	Oc	Nv	Dc	En	Fb	Mz	Ab	My	Jn	Jl
COLIFLOR									CALABAZA						CEBOLLA									

Los datos climáticos necesarios para simular la rotación (período 2014-2015) proceden de la estación de Manises próxima a la parcela Paterna II. Asimismo, la simulación de la rotación requirió de datos de entrada relativos a los cultivos, los abonados y los riegos. De este modo, basándose en los trabajos realizados en el IVIA por el equipo del Dr C. Ramos se obtuvieron los datos necesarios de dosis y calendario de riego y abonado, así como fechas de trasplante y cosecha de los otros dos cultivos, cuyo cronograma se muestra en la tabla 10.

Tabla 10. Cronograma para los cultivos de calabaza y cebolla (2014-2015)

Mes	Mayo	Junio	Julio	Ag	Septiembre	Oc	Nv	Diciembre	En	Febrero	Mz	Ab
Día	15	7 22	10 25		2 28	15		3 30		2 22		
Cultivo	Calabaza					Cebolla						
Abonado	x		x					x		x		
Riego (mm)	60	60 60	70 70		70 70	73		48,3 40		24,9 22,2		

Durante el cultivo de la calabaza se consideraron dos abonados minerales con nitrato amónico (50% N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - 50% N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), a razón de 75 kg N<sub>min</sub> ha<sup>-1</sup> para cada aplicación. Por otra parte, para la cebolla también se consideraron dos aportes de fertilizantes minerales, utilizando en la primera aplicación un abono con las dos formas minerales (40% N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - 60% N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), a razón de 60 kg N<sub>min</sub> ha<sup>-1</sup>, y en la segunda aplicación nitrato potásico (100% N - NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), a razón de 50 kg N<sub>min</sub> ha<sup>-1</sup>.

Con respecto a los marcos de plantación, para la calabaza fue de 100 cm (ancho entre filas) x 300 cm (distancia entre plantas), mientras que para la cebolla fue de 57,5 cm (ancho entre filas) x 5,26 cm (distancia entre plantas). En cuanto a la calabaza, se consideraron que la extracción de N por parte del cultivo sería de 150 kg ha<sup>-1</sup>, y un aprovechamiento de la biomasa total del 80 % (fracción cosechada). En el momento del trasplante, la materia seca se consideró de 2

,9 kg ha<sup>-1</sup>, con un contenido del 5% en nitrógeno. Asimismo, se estimó la producción de materia seca en 2,8 t ha<sup>-1</sup>. Para el cultivo de la cebolla, se consideraron una extracción de 135 kg N ha<sup>-1</sup>, y un aprovechamiento de la biomasa total del 100 %. En el momento del trasplante, la materia seca se consideró de 131,43 kg ha<sup>-1</sup>, con un contenido del 2,53% en nitrógeno. Asimismo, en el momento de la cosecha se estimó una producción de materia seca de 9 t ha<sup>-1</sup>.

### 3.4. EVALUACIÓN DE ESCENARIOS CLIMÁTICOS FUTUROS

Tras la calibración y evaluación de los modelos, se procedió al análisis de escenarios climáticos futuros para poder predecir los principales flujos de C y N en las condiciones previstas por los modelos climáticos. Para ello, se obtuvieron los datos diarios de temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura media, amplitud térmica y precipitación de dos escenarios futuros de emisión (RCP 4.5 y RCP 8.5) para tres períodos: futuro cercano (2023-2025), medio (2043-2045) y lejano (2073-2075). Dichos datos, procedieron del Visor de Escenarios de cambio climático (<http://adaptecca.es/escenarios/>), alojado en la plataforma de intercambio y consulta de información sobre adaptación al cambio climático en España AdapteCCa, la cual permite descargar los datos correspondientes a un punto de rejilla o una estación individual a diferentes escalas de tiempo (o agregados en una región geográfica) en un formato de fácil lectura, facilitando su acceso y su uso. En este trabajo se ha utilizado el modelo global MPI-ESM-LR-CSC-REMO2009 por ser un modelo ampliamente usado por instituciones como el Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Climate Service Center, Max Planck Institute for Meteorology, en Alemania o el Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Rosby Centre, en Suecia; además fue

utilizado para evaluar los posibles cambios en las necesidades hídricas en cítricos y kaki en la comarca de la Ribera (Valencia) debido al cambio climático (Boscafiori, 2017).

La información climática proporcionada por el modelo para las dos sendas representativas de concentración seleccionadas (RCP 4.5 y RCP 8.5) fue verificada para constatar su adecuación a la zona de Valencia. Para ello se llevó a cabo una comparación entre los datos diarios de temperatura media, máxima, mínima y precipitación obtenidos con el modelo y los registrados en la estación de Valencia para el periodo 2006 – 2018. Se escogió este período por ser del que se disponía de datos diarios de las variables de interés. Tras comprobar que la función de distribución de probabilidades de ambas series era similar en el caso de las temperaturas, se decidió no efectuar la corrección de los datos de temperatura. La precipitación sí que hubiera requerido de dicha corrección (a través del paquete de cálculo “qmap”, quantilmapping, de R), pero dadas las escasas precipitaciones del período seleccionado en la rotación (2013-2015) se decidió que ya era de por sí un período seco y no se utilizaron los pronósticos de precipitación en el trabajo. La información climática utilizada puede ser consultada en el Anejo del trabajo.

Las simulaciones de los distintos períodos se establecieron para la rotación de cultivos mencionada en el punto 3.1.1. De manera que, siguiendo el mismo procedimiento, se modificaron los ficheros de entrada de los dos modelos contemplando los cambios en las variables climáticas, adaptando el número de riegos a las necesidades de los distintos cultivos y manteniendo el resto de condicionantes (abonados, parámetros del suelo, riegos, etc.). Para cada período y escenario se analizaron los contenidos de nitrógeno mineral acumulado en el suelo, nitrógeno neto mineralizado, extracción de nitrógeno por la planta, pérdidas gaseosas, lixiviación acumulada, respiración del suelo, el carbono acumulado en los distintos compartimentos, el drenaje acumulado y la lámina de agua.



## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### 4.3. CALIBRACIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS MODELOS

#### 4.3.1. LEACHM

Tras estudiar distintos valores de las constantes de mineralización en cada subperíodo y seleccionados aquellos que mejor se ajustaban como se muestra en el anexo al trabajo, se decidió utilizar la  $K_{\text{humus}}$  y  $K_{\text{manure}}$  promedios de los tres períodos para simular el período total de 10 meses (tabla 11).

Tabla 11. Constantes de mineralización utilizadas en LEACHM

Constantes	Antes cultivo	Durante cultivo	Residuos	Período completo promedio
$K_{\text{humus}}$	7.169E-4	7.169E-4	9.250E-5	<b>4.05E-4</b>
$K_{\text{manure}}$	8.000E-3	8.000E-4	8.000E-4	<b>4.40E-3</b>

En la calibración las variables de interés que se tuvieron en cuenta fueron principalmente: el contenido de nitrógeno mineral y la lámina de agua en el perfil de suelo, ya que las variables de lixiviación y drenaje poseían menor fiabilidad para la calibración al tratarse de valores obtenidos de forma indirecta a partir de los balances de nitrógeno y cloruro (este último utilizado para estimar el drenaje de agua, al considerarse el ión cloruro como un trazador).

En la tabla 12 se muestra los índices estadísticos con los que se evalúa el modelo LEACHM, obtenidos tras la calibración del período completo de la coliflor en sus distintos tratamientos.

Tabla 12. Índices estadísticos para evaluar los resultados de las simulaciones en LEACHM

Período	Alternativa	Variable	Tratamiento	RMSE	NRMSE	d	R <sup>2</sup>
Completo 15 jl 2013 - 15 my 2014	Promedio de los subperíodos	$N_{\text{min}}$ (0-45 cm)	SGSR	41,9	0,44	17,26	0,55
			SGCR	47,2	0,41	10,15	0,49
			CGSR	73,8	0,45	-4,96	-0,15
			CGCR	85,0	0,47	-15,63	-0,40
		Lámina (0-45 cm)	TODOS	7,52	0,07	0,34	-0,49

Se puede observar que para la variable  $N_{\text{min}}$  los valores de NRMSE oscilaron entre 0,4 y 0,5 para todos los tratamientos, estos según Tornés *et al.*, (2016) son valores demasiado elevados por lo que sería necesario una recalibración del modelo. Por otra parte, dado que los aportes de agua no variaron para los distintos tratamientos, se pudo conseguir para la lámina de agua una calibración casi perfecta si se evalúa el valor de NRMSE.

En cuanto a la respiración del suelo, aunque en un principio se propuso como variable de interés para realizar la calibración, se observó que los índices estadísticos no mostraban buenos resultados por lo que se descartó como criterio de calibración (ver anexos). Posiblemente, esto se debió a que las medidas tomadas se realizaban en un determinado momento del día y a continuación se extrapolaban con el fin de obtener los valores diarios, de forma que, si durante los muestreos no se siguió un patrón horario de medida, los valores medios diarios pueden resultar poco representativos. Teniendo en cuenta que la respiración del suelo es muy variable a lo largo del día (depende de la  $T^a$  y de la humedad del suelo), para obtener una buena calibración sería necesario obtener varias medidas en el día y que fueran representativas de la curva de variación diaria.

Los malos resultados obtenidos para el nitrógeno mineral del suelo con la calibración de la coliflor no eran fáciles de explicar, pero el modelo no parecía responder a los cambios en las

constantes de mineralización. Posteriormente, durante las simulaciones de los escenarios climáticos, se pudo comprobar que había un error en el código del modelo LEACHM que impedía la corrección por temperatura de los procesos de transformación del N. Este error pudo ser subsanado, pero dado lo avanzado del trabajo y la limitación de tiempo, no se pudo recalibrar el modelo, pero en las simulaciones de los escenarios climáticos sí que se utilizó la nueva versión modificada de LEACHM.

#### 4.3.2. EU-Rotate\_N

Tras constatar en el trabajo de Jaramillo (2015) un buen ajuste del modelo en la calibración de los parámetros del nitrógeno (tabla 13), estos fueron utilizados como base para las simulaciones de los distintos escenarios climáticos del presente estudio.

Tabla 13. Parámetros que se calibraron en EU-Rotate\_N. Fuente: Jaramillo, 2015

Parámetro	Unidades	Valor final
Tasa descomposición MO fracción no lábil	d <sup>-1</sup>	9,00E-05
Tasa descomposición MO fracción lábil	d <sup>-1</sup>	1,40E-03
Tasa de nitrificación	d <sup>-1</sup>	3,00E-01
Porcentaje de materia seca	kg kg <sup>-1</sup>	0,09
Índice de cosecha	-	0,43
Tasa descomposición residuos fracción lábil	d <sup>-1</sup>	5,00E-00
Fracción lábil de residuos	-	0,90
Relación C/N fracción no lábil de residuos	-	15,0
Relación C/N fracción lábil de residuos	-	15,0
Porcentaje materia seca gallinaza	kg kg <sup>-1</sup>	0,66
Contenido de N-NH <sub>4</sub> de la gallinaza	kg kg <sup>-1</sup>	0,0022
Contenido de N-NO <sub>3</sub> de la gallinaza	kg kg <sup>-1</sup>	0,0004
Tasa descomposición gallinaza fracción no lábil	d <sup>-1</sup>	3,00E-05
Tasa descomposición gallinaza fracción lábil	d <sup>-1</sup>	5,00E-02
Fracción lábil de gallinaza	-	0,40
Relación C/N fracción lábil de gallinaza	-	7,3

Con respecto al carbono, la simulación de la respiración diaria del suelo ( $C_{rd}$ ) utilizando los parámetros anteriores, era muy similar a los valores medidos, a excepción del día 224 en el que el modelo, tras el enterrado de residuos, muestra una respuesta inmediata y sobreestima la  $C_{rd}$ , a diferencia de lo ocurrido en campo, donde la intervención de diversos factores ambientales se produjo una mineralización más lenta y de menor magnitud (figura 12).

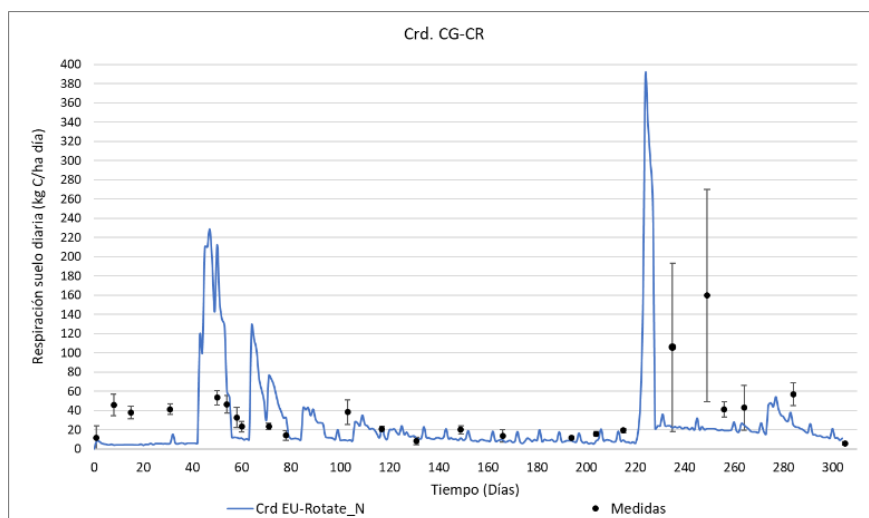


Figura 12. Respiración diaria en el modelo EU-Rotate\_N para el cultivo de la coliflor

### 4.3.3. Comparación de los dos modelos para el cultivo de la coliflor

En la figura 13, se puede observar que la calibración de EU-Rotate\_N, a pesar de que en los primeros días sobreestima los valores de  $N_{min}$ , permite un buen ajuste a los valores medidos, consiguiendo una elevada capacidad predictiva del contenido de nitrógeno mineral del suelo. En el caso del modelo LEACHM, aunque la dinámica descrita a lo largo de los 305 días es similar a la de EU-Rotate\_N, y que se encuentra dentro del rango de valores normales para el  $N_{min}$ , en determinados puntos, su capacidad predictiva es bastante menor. Algo parecido ocurre con la lixiviación acumulada, donde se puede ver que el ajuste con EU-Rotate\_N a lo largo del período es mayor al conseguido con LEACHM, el cual infraestima los valores de lixiviación. El valor final de lixiviación de nitratos simulados en ambos modelos osciló entre 590 y 660 kg N/ha.

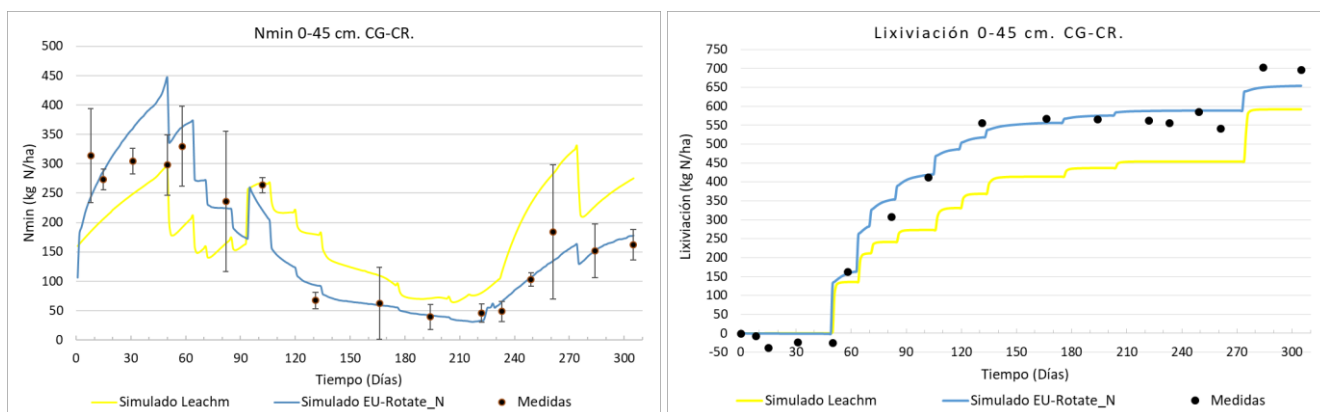


Figura 13. Simulación del  $N_{min}$  y lixiviación acumulada en los modelos LEACHM y EU-Rotate\_N para el período completo de la coliflor

En cuanto a la lámina y el drenaje de agua (figura 14), no se observaron diferencias importantes entre las simulaciones de ambos modelos. En el caso de la lámina de agua, la dinámica descrita por los modelos fue muy similar, consiguiéndose mayor fiabilidad en la predicción con el modelo LEACHM. Para el drenaje acumulado los valores simulados por ambos modelos fueron idénticos durante los primeros 85 días, momento a partir del cual LEACHM infraestimó los valores de drenaje. El valor final de drenaje simulado en ambos modelos estuvo entre 590 y 690 mm.

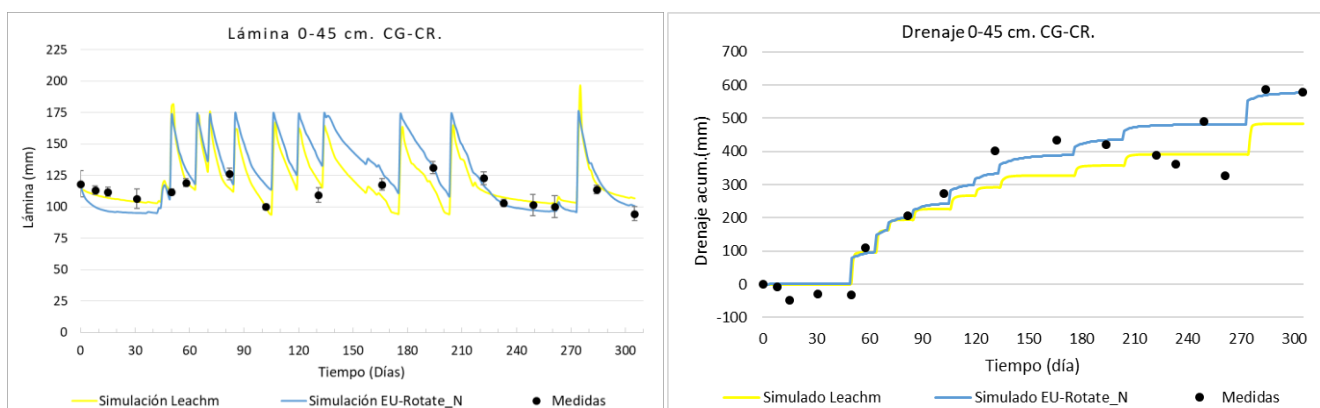


Figura 14. Simulación de la lámina y el drenaje acumulado en los modelos LEACHM y EU-Rotate\_N para el período completo de la coliflor

Con respecto a la respiración acumulada ( $C_{ra}$ ), el modelo LEACHM predice al final del período una respiración total de 7740 kg C/ha, acumulándose un 45% durante el período de incorporación de los residuos de la coliflor, un 37% durante el cultivo de la coliflor, y finalmente, un 18% durante la mineralización de la gallinaza. Para el EU-Rotate\_N, el total acumulado algo menor al obtenido con LEACHM (6897 kg C/ha), si bien difirió en su repartición, acumulándose

un 46% durante el período de cultivo de la coliflor, seguido de un 31% durante la mineralización de la gallinaza y finalmente, un 23% durante la incorporación de residuos.

#### 4.3.4. Comparación de los modelos en una rotación de cultivos

En las siguientes figuras, como se mencionaba en el apartado 3.4.1. ya se puede constatar (en el período de la coliflor) el efecto de la corrección por temperatura del suelo que realiza la versión corregida de LEACHM. Este error fue detectado gracias a que, en el momento de realizar las simulaciones de los distintos escenarios climáticos, las variables de interés ( $N_{min}$ , lixiviación, etc.) no se veían alteradas por los cambios de temperatura.

Con motivo de la corrección, en el modelo LEACHM se alcanzan valores de  $N_{min}$  mínimos durante el período de cultivo de la coliflor. Esto fue debido a que, una vez consideradas las temperaturas, como se esperaría, el modelo simula una menor mineralización durante los meses más fríos (diciembre-febrero), lo que se traduce en menores valores de  $N_{min}$  si se comparan con la anterior versión (figura 13), coincidiendo además con el período de mayor extracción de la planta.

En ambos modelos se puede observar que el enterrado de residuos de la coliflor proporciona una valiosa reserva de nitrógeno mineral (figura 15) la cual se sitúa en torno a los 200 kg N/ha (mayo-abril 2014). A partir de estas fechas, se observa un incremento en los valores de  $N_{min}$ , debido a las las fertilizaciones minerales aportadas en el cultivo de la calabaza (150 kg N/ha) y de la cebolla (110 kg N/ha) y a la mineralización de los restos orgánicos todavía presentes.

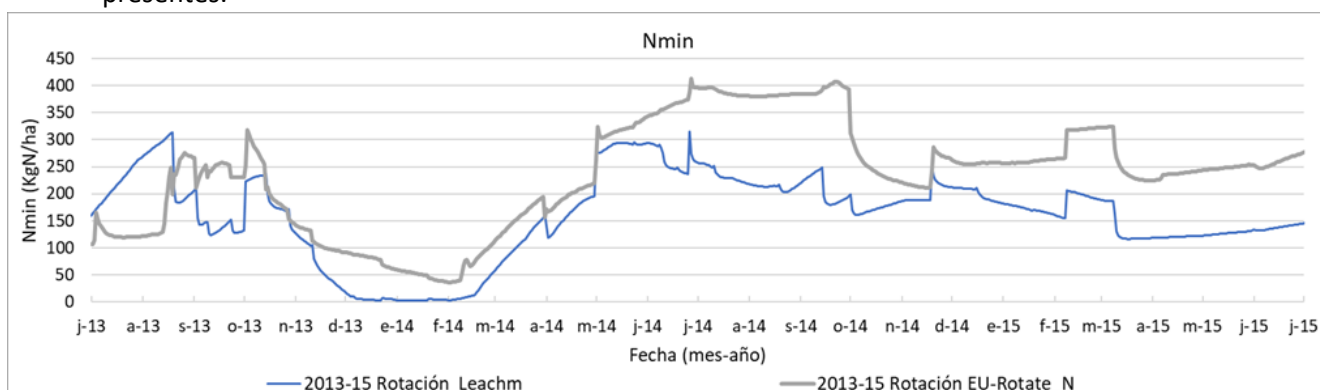


Figura 15. Simulación del  $N_{min}$  en los modelos LEACHM y EU-Rotate\_N para la rotación de cultivos del periodo 2013-2015

La lixiviación de nitratos simulada por EU-Rotate\_N (figura 16) una vez más es superior a la simulada por LEACHM, existiendo una diferencia al final del período de unos 200 kg N/ha entre ambos modelos.

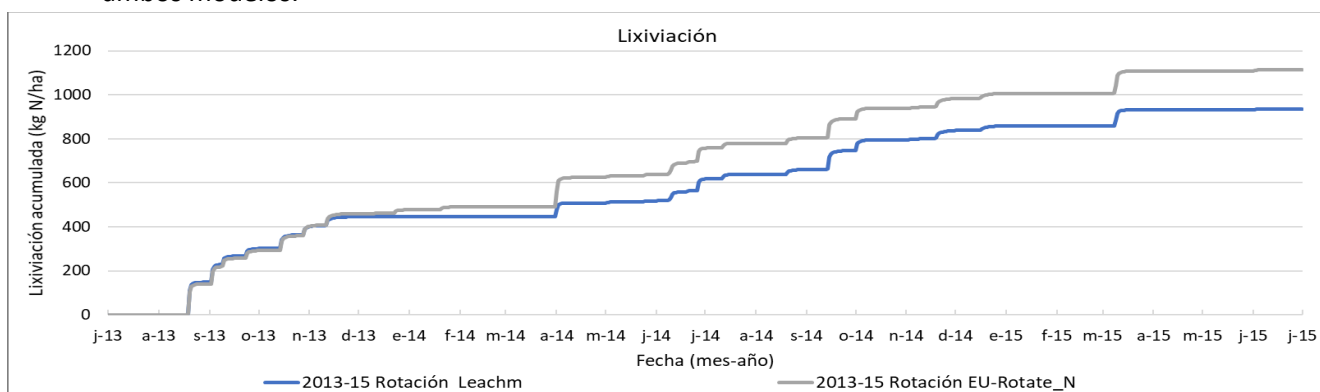


Figura 16. Simulación de la lixiviación en los modelos LEACHM y EU-Rotate\_N para la rotación de cultivos del año 2013-2015

En cuanto a la lámina y al drenaje de agua (figura 17), la dinámica descrita fue casi idéntica en ambos modelos. No obstante, el drenaje de agua acumulado a partir de junio del 2014 difiere, proporcionando el modelo LEACHM valores superiores a los de EU-Rotate\_N. Al final de la rotación, el drenaje acumulado en LEACHM supera en 150 mm los valores predichos por EU-Rotate\_N.

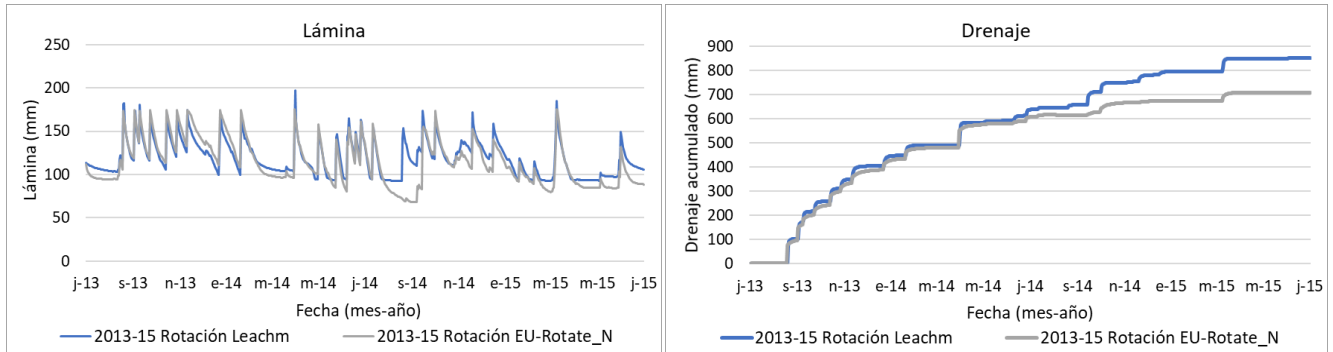


Figura 17. Lámina y drenaje acumulado simulados con LEACHM y EU-Rotate\_N para la rotación de cultivos del periodo 2013-2015

En relación con la respiración acumulada (figura 18), el modelo LEACHM y EU-Rotate\_N predicen al final de la rotación valores muy similares, 12365 kg C/ha y 12587 kg C/ha, respectivamente, si bien casi el 60% corresponde al período de coliflor debido al aporte de materia orgánica en forma de enmienda y restos de cosecha.

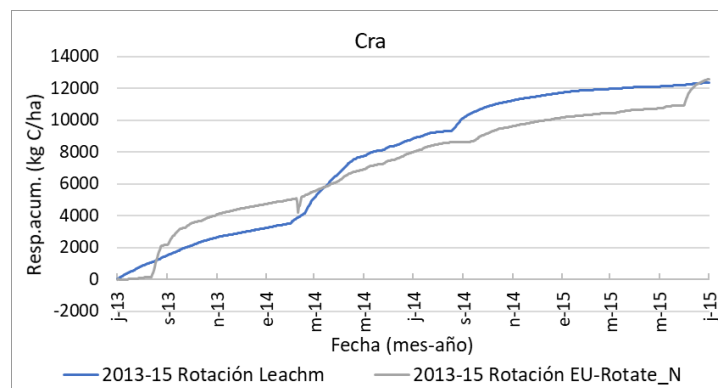


Figura 18. Respiración acumulada simulada por LEACHM y EU-Rotate\_N para la rotación de cultivos del periodo 2013-2015

#### 4.4. EVALUACIÓN DE LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS FUTUROS

Aunque los modelos pronostican cambios en el régimen de temperatura y de precipitación, la evaluación de escenarios se ha centrado en los pronósticos de cambio de temperatura puesto que el período simulado para la rotación (2013-2015) correspondió a unos años muy secos, especialmente el año 2014. En concreto la precipitación del año 2014, con un valor anual de 289 mm, fue un 41% inferior a la precipitación media del período disponible de datos medidos (2006-2018). Durante el período simulado, dos años, la precipitación fue de 552 mm, mientras que la precipitación media anual de los últimos 13 años disponibles fue de 488 mm. Por tanto, se decidió mantener el mismo régimen de precipitaciones de la rotación, para evaluar los cambios de temperatura de los diferentes escenarios.

##### 4.4.1. Cambios en las variables de T<sup>a</sup>

Se obtuvieron los pronósticos climatológicos (apartado 3.4 y anexos), con el fin de conocer las variaciones de temperatura para un futuro cercano (2043-2045), medio (2043-2045) y lejano (2073-2075). En dichos períodos, se contemplaron los meses de la rotación de cultivos descrita, es decir, de julio del primer año a julio del tercer año.

Así pues, teniendo como referencia las temperaturas medias registradas durante la rotación del año 2013-2015 (18,1 °C), se pronostica para un futuro lejano y en un escenario conservador de las emisiones de GEI (RCP 4.5) un aumento de 1.2 °C, mientras que para un escenario de mayores emisiones (RCP 8.5) el aumento es de 2,2 °C para el mismo período. Estos resultados concuerdan con los pronósticos de MITECO (2017), que prevé un incremento de 3 °C en la temperatura media para finales de este siglo. Tanto en el escenario RCP 4.5 como en el RCP 8.5, los cambios de temperatura media en un futuro cercano apenas variaron de los registrados en 2013-2015, si bien, es a partir de un futuro a medio plazo que ya empiezan a notarse cambios importantes.

Las temperaturas máximas y mínimas mensuales en los escenarios siguieron la tendencia actual, y se mantuvieron durante los meses de verano e invierno respectivamente. Para un escenario RCP 4.5, las temperaturas máximas anuales predicen en un futuro lejano una disminución de -0,9 °C, mientras que para el escenario RCP 8.5 aumenta ligeramente en 0,1 °C. La temperatura mínima anual, tanto para RCP 4.5 como RCP 8.5, es la variable que más sufre cambios, con incrementos del orden de 2 °C en un futuro cercano y del orden de hasta 4º para un futuro lejano. La amplitud térmica que se define como la diferencia entre temperaturas máximas y mínimas, disminuirá a lo largo de los años, pasando de los 12 °C (2013-2015) a valores del orden de los 8 °C (2073-2075 debido principalmente a los incrementos en las temperaturas mínimas anuales).

En el siguiente apartado, se exponen los principales resultados de las variables de interés tras la simulación de un escenario más conservador (RCP 4.5) y de uno de mayores emisiones (RCP 8.5), al considerar las temperaturas diarias que pronostica el modelo climático MPI-ESM-LR-CSC-REMO2009 en los distintos períodos considerados.

#### 4.4.2. Variación de N y C con el modelo LEACHM

El contenido de nitrógeno mineral al final de la rotación para el escenario más conservador (figura 19) y para el de mayores emisiones (figura 20), aumenta conforme avanzan los años, es decir se consiguen mayores valores de  $N_{min}$  para los años 2073-2075.

En ambas figuras, la mayor parte del  $N_{min}$  para el período de la coliflor (enero del 1<sup>er</sup> año) se agota en el suelo, debido a que el cultivo se encuentra en pleno crecimiento y por ende aumenta la extracción, además de que la descomposición se ve ralentizada por las bajas temperaturas del invierno. Pasados estos meses, el  $N_{min}$  del suelo se incrementa al verse favorecido por la incorporación de los residuos de la coliflor, y los abonados de la calabaza y de la cebolla. Alcanzándose un valor máximo de  $N_{min}$  durante el período de cultivo de la calabaza, que gira en torno a los 300 kg N/ha.

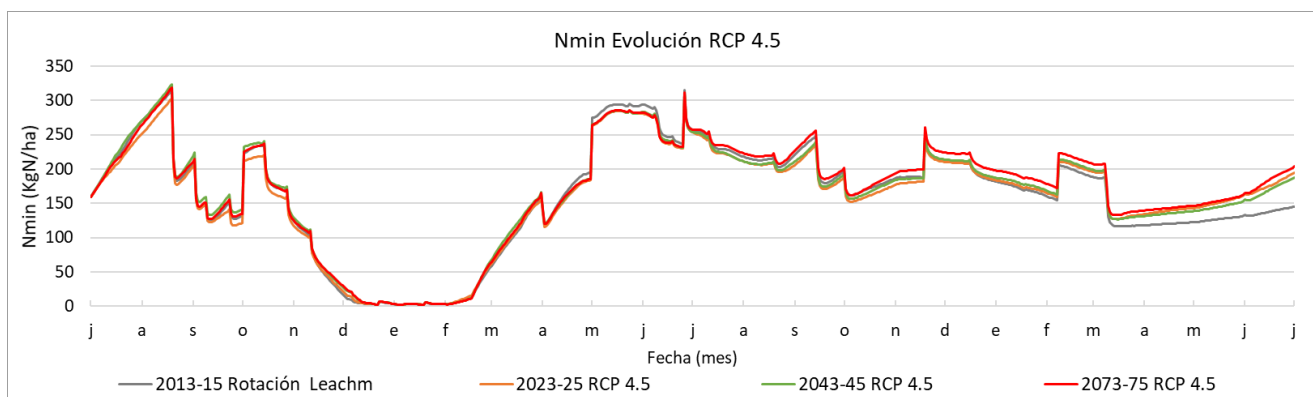


Figura 19. Simulación del  $N_{min}$  en distintos períodos para un escenario RCP 4.5 utilizando el modelo LEACHM

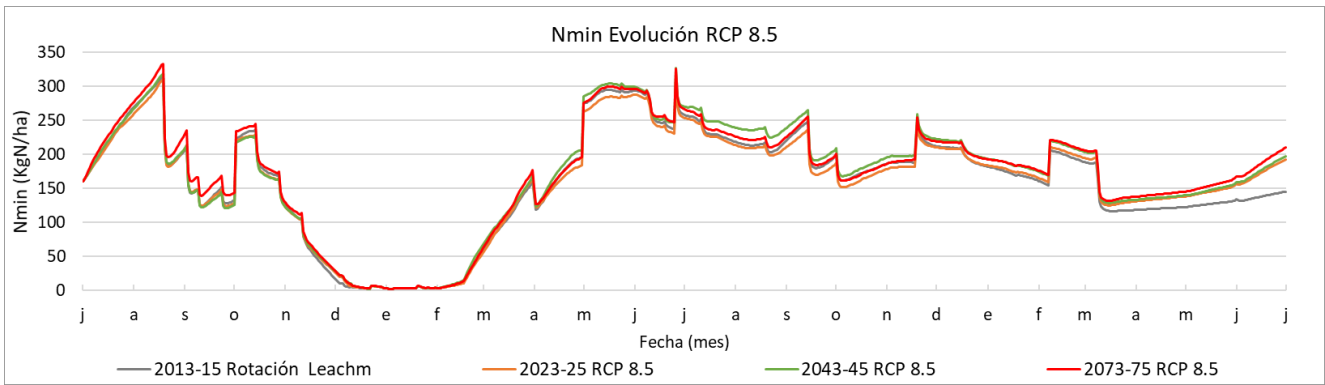


Figura 20. Simulación del N<sub>min</sub> en distintos períodos para un escenario RCP 8.5 utilizando el modelo LEACHM

Las diferencias entre los escenarios RCP 4.5 y 8.5 (tabla 14) son casi imperceptibles, como se puede comprobar con los valores de N<sub>min</sub> final. Además, la variación de N<sub>min</sub> que se obtuvo como resultado de la diferencia entre el contenido final y el inicial del período, fue aumentando conforme se simulaban escenarios más lejanos en el tiempo. El aumento de N<sub>min</sub> en el perfil de suelo a largo plazo se sitúa en torno a los 45 kg N/ha.

Tabla 14. Variación de N<sub>min</sub> predicha por LEACHM para los distintos escenarios temporales considerados

Escenario	Período	2013-2015	2023-2025	2043-2045	2073-2075
RCP 4.5	N <sub>min</sub> inicial (kg N/ha)	159,6	159,6	159,6	159,6
	N <sub>min</sub> final (kg N/ha)	145,2	194,2	187,1	203,8
	Variación N <sub>min</sub> (kg N/ha)	-14,4	34,6	27,5	44,3
RCP 8.5	N <sub>min</sub> inicial (kg N/ha)	159,6	159,6	159,6	159,9
	N <sub>min</sub> final (kg N/ha)	145,2	191,8	197,4	209,9
	Variación N <sub>min</sub> (kg N/ha)	-14,4	32,2	37,8	50,0

En cuanto a la lixiviación de nitratos, apenas se distinguen diferencias entre los resultados de los escenarios RCP 4.5 y 8.5 (figura 21). Lo que sí se puede observar es que para el escenario RCP 8.5 las diferencias de lixiviación entre períodos son más notables.

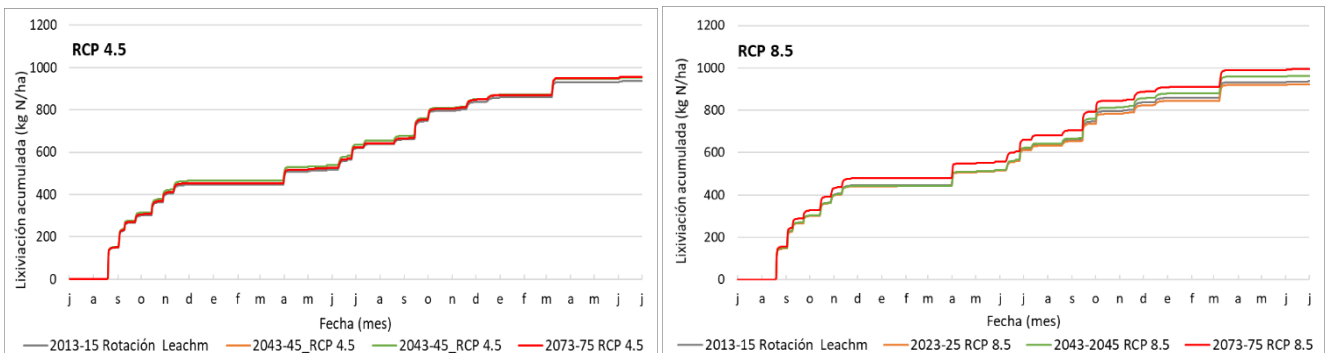


Figura 21. Simulación de la lixiviación acumulada en distintos períodos para un escenario RCP 4.5 (izq.) y RCP 8.5 (dcha.) utilizando el modelo LEACHM

También, se cumple que la lixiviación acumulada (tabla 15) para un mismo escenario aumenta su valor, conforme más lejano es el tiempo considerado, con incrementos que oscilan entre 2-6%. A corto plazo la lixiviación disminuye por la mayor acumulación de N en el suelo.



Tabla 15. Variación de la lixiviación acumulada para los distintos períodos y escenarios simulada con LEACHM

Escenario	Período	2013-2015	2023-2025	2043-2045	2073-2075
RCP 4.5	Valor de $Lix_{final}$ (kg N/ha)	936,1	905,9	953,3	956,7
	Variación Lixiviación (%)	-	-3,3	1,8	2,2
RCP 8.5	Valor de $Lix_{final}$ (kg N/ha)	936,1	923,5	963,1	994,0
	Variación Lixiviación (%)	-	-1,4	2,8	5,8

Para entender mejor los resultados de las dos variables analizadas, es necesario estudiar otros componentes que intervienen en el balance final de N. Los elevados valores de  $N_{min}$  anteriores (figura 19 y 20), se deben a que en definitiva el balance de N es positivo, es decir las ganancias superan a las pérdidas. Como se puede observar en la tabla 16, esto es debido principalmente al aumento de N mineralizado, conforme se avanza en el tiempo. Con respecto a las pérdidas, esta misma tendencia se repite para la extracción de la planta y para las pérdidas gaseosas (volatilización y desnitrificación), con la diferencia de que estos cambios se producen en una escala de menor magnitud.

Tabla 16. Otros componentes del balance de N simulados por LEACHM para los diferentes escenarios

Escenario	Período	2013-2015	2023-2025	2043-2045	2073-2075
RCP 4.5	Extracción planta (kg N/ha)	581	591	598	598
	Pérdidas gaseosas (kg N/ha)	62	63	66	67
	N mineralizado (kg N/ha)	1151	1180	1232	1252
RCP 8.5	Extracción planta (kg N/ha)	581	589	596	600
	Pérdidas gaseosas (kg N/ha)	62	63	67	70
	N mineralizado (kg N/ha)	1151	1194	1250	1301

En relación con el carbono, en los dos escenarios los valores de respiración acumulada (figura 22) fueron semejantes, si bien las diferencias entre períodos de un mismo escenario fueron más marcadas en un RCP 8.5. Esto último, se debió a que las predicciones climáticas conforme pasan los años, estiman mayores incrementos de la temperatura, la cual ocasiona a su vez, un aumento de la mineralización del carbono. En general, dado a que el proceso de mineralización afecta tanto al N como al C del suelo, los resultados de  $C_{ra}$  obtenidos muestran un comportamiento semejante a los obtenidos para el nitrógeno mineral.

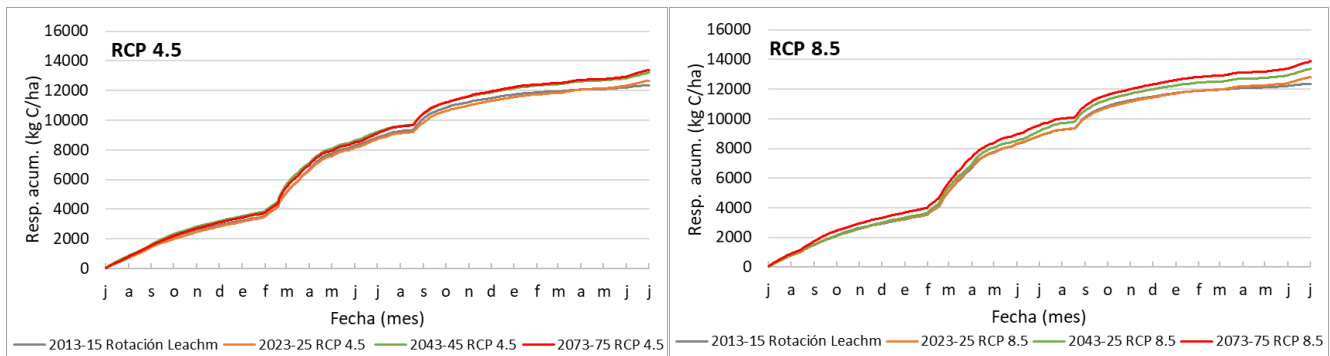


Figura 22. Simulación de la respiración acumulada ( $C_{ra}$ ) en distintos períodos para un escenario RCP 4.5 (izq.) y RCP 8.5 (dcha.) utilizando el modelo LEACHM

En la tabla 17, se muestra que para un escenario conservador la variación del  $C_{ra}$  alcanza un valor en torno al 8% en el período 2073-2075, mientras que ese mismo valor es alcanzado ya en el período 2043-2045 para un RCP 8.5. Esto demuestra que un escenario más pesimista adelanta el proceso de emisión de carbono del suelo a la atmósfera.

Tabla 17. Variación de la respiración acumulada ( $C_{ra}$ ) para los distintos escenarios predicha por LEACHM

Escenario	Período	2013-2015	2023-2025	2043-2045	2073-2075
RCP 4.5	Valor de $C_{ra}$ final (kg C/ha)	12365	12682	13204	13401
	Variación $C_{ra}$ (%)	-	2,6	6,8	8,4
RCP 8.5	Valor de $C_{ra}$ final (kg C/ha)	12365	12820	13359	13880
	Variación $C_{ra}$ (%)	-	3,7	8,0	12,3

El contenido de carbono en el humus (figura 23) para los dos escenarios se mueve dentro de rangos muy similares, si bien, para un escenario más pesimista las diferencias entre períodos son más pronunciadas, disminuyendo la variación de  $C_{ha}$  (tabla 18) respecto al 2013-2015 en casi un 1,9 % para el período 2073-2075.

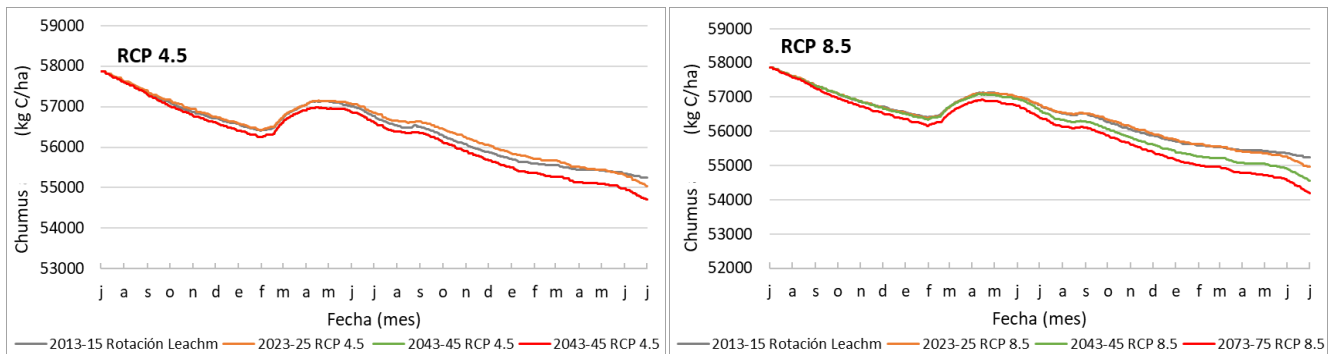


Figura 23. Variación del contenido de humus ( $Ch_a$ ) para los distintos escenarios según el modelo LEACHM

Tabla 18. Variación del contenido de carbono del humus en el suelo ( $Ch_a$ ) para los distintos escenarios según LEACHM

Escenario	Período	2013-2015	2023-2025	2043-2045	2073-2075
RCP 4.5	Valor de $C_{ha}$ final (kg C/ha)	55240	55030	54710	54550
	Variación $C_{ha}$ (%)	-	-0,4	-1,0	-1,3
RCP 8.5	Valor de $C_{ha}$ final (kg C/ha)	55240	54960	54560	54190
	Variación $C_{ha}$ (%)	-	-0,5	-1,2	-1,9

Otro compartimento del carbono en el suelo es la materia orgánica añadida. Dado que LEACHM no la calcula directamente, fue obtenida a partir de la suma de residuos vegetales y estiércol. Según la tabla 19, para un mismo escenario los porcentajes de variación entre períodos son mucho mayores que los obtenidos con la variable  $C_{ha}$ , llegando a perder con respecto al 2013-2015 hasta un 31% del  $C_{mo}$  para el período más lejano en un escenario pesimista. De manera que, independientemente de los escenarios, según se avanza en el tiempo, más acusada es la disminución de las reservas de carbono del suelo por acción del humus y de la materia orgánica añadida.

Tabla 19. Variación del carbono de la materia orgánica añadida ( $C_{mo}$ ) para los distintos escenarios según LEACHM

Escenario	Período	2013-2015	2023-2025	2043-2045	2073-2075
RCP 4.5	Valor de $C_{mo}$ final (kg C/ha)	1152,1	1082,0	953,0	904,0
	Variación $C_{mo}$ (%)	-	-6,1	-17,3	-21,5
RCP 8.5	Valor de $C_{mo}$ final (kg C/ha)	1152,1	1041,0	905,0	795,0
	Variación $C_{mo}$ (%)	-	-9,6	-21,5	-31,0

### 4.4.3. Variación de N y C con el modelo EU-Rotate\_N

El contenido de nitrógeno mineral (figura 24 y 25) evoluciona de manera muy similar para los dos escenarios. No existiendo diferencias destacables entre los distintos períodos de un mismo escenario, si bien es cierto que para futuros lejanos se alcanzan mayores valores de  $N_{min}$ .

En ambas figuras se observa, al igual que pasaba con LEACHM, una disminución drástica del  $N_{min}$  para el período de cultivo de la coliflor (noviembre-enero del 1<sup>er</sup> año), debido a que el cultivo se encuentra en crecimiento y aumenta la extracción, y que con las bajas temperaturas del invierno la descomposición de la M.O. se ve ralentizada. En los meses siguientes, el  $N_{min}$  del suelo se incrementa al verse favorecido por la incorporación de los residuos de la coliflor, y los abonados de la calabaza y de la cebolla. Se alcanzan valores elevados de  $N_{min}$  en torno a los 400 kg N/ha durante el período de cultivo de la calabaza.

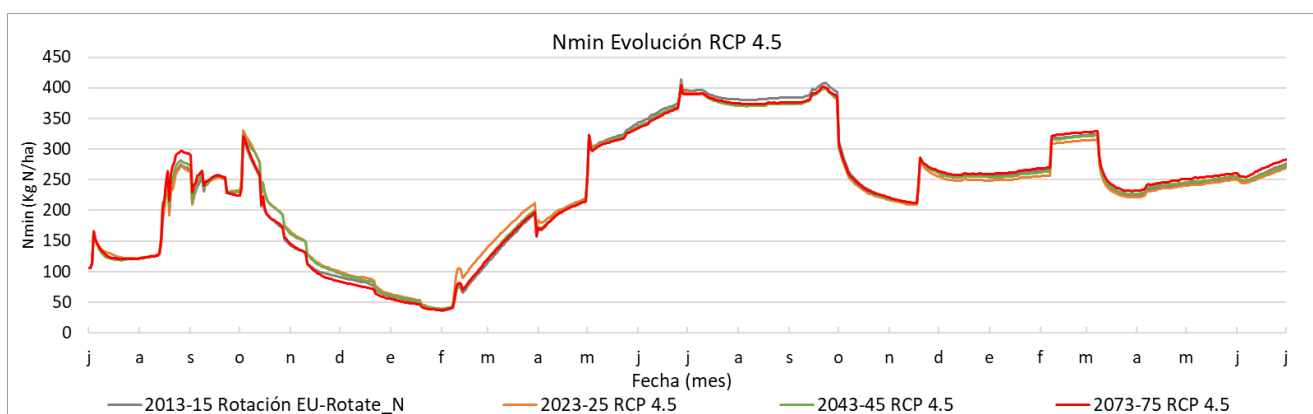


Figura 24. Simulación del  $N_{min}$  en distintos períodos para un escenario RCP 4.5 utilizando el modelo EU-Rotate\_N

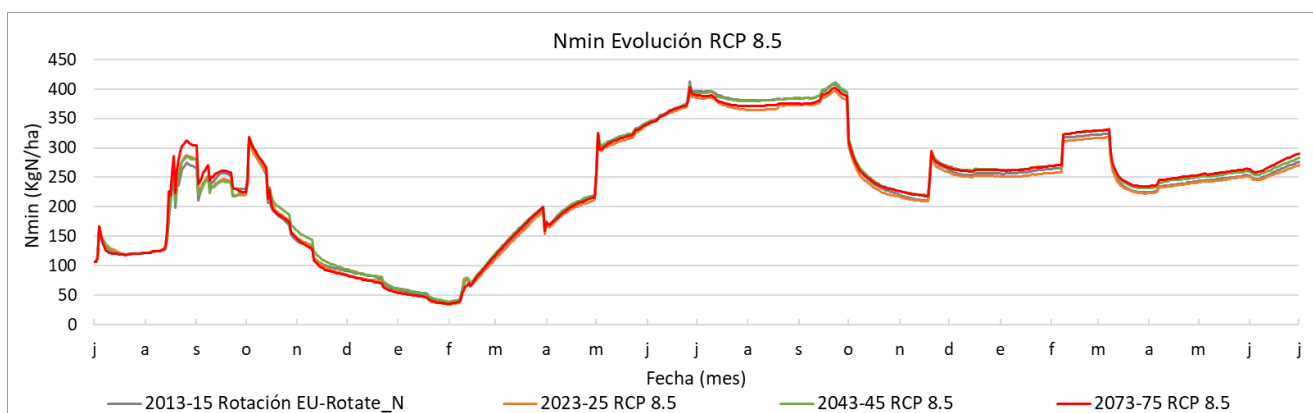


Figura 25. Simulación del  $N_{min}$  en distintos períodos para un escenario RCP 8.5 utilizando el modelo EU-Rotate\_N

La variación de  $N_{min}$  (tabla 20) para todas las simulaciones osciló entre 160 y 185 kg N/ha, lo que supone una diferencia muy pequeña entre ellas. Cabe destacar que esta variación de  $N_{min}$  supuso el triple de lo obtenido con el modelo LEACHM, la cual era de 30-50 kg N/ha. Esta diferencia pudo estar influenciada por la inadecuada calibración del modelo LEACHM.

Tabla 20. Variación de  $N_{min}$  para los distintos escenarios en EU-Rotate\_N

Escenario	Período	2013-2015	2023-2025	2043-2045	2073-2075
RCP 4.5	$N_{min}$ inicial (kg N/ha)	106,0	106,0	106,0	106,0
	$N_{min}$ final (kg N/ha)	276,6	270,0	273,0	283,2
	Variación $N_{min}$ (kg N/ha)	170,6	164,0	167,0	177,2
RCP 8.5	$N_{min}$ inicial (kg N/ha)	106,0	106,0	106,0	106,5
	$N_{min}$ final (kg N/ha)	276,6	271,0	283,2	290,6
	Variación $N_{min}$ (kg N/ha)	170,6	165,0	177,2	184,1

En cuanto a la lixiviación de nitratos, apenas se distinguen diferencias entre los resultados de los escenarios RCP 4.5 y 8.5 (figura 26). Siendo las diferencias de lixiviación para el escenario RCP 8.5 más notables entre períodos.

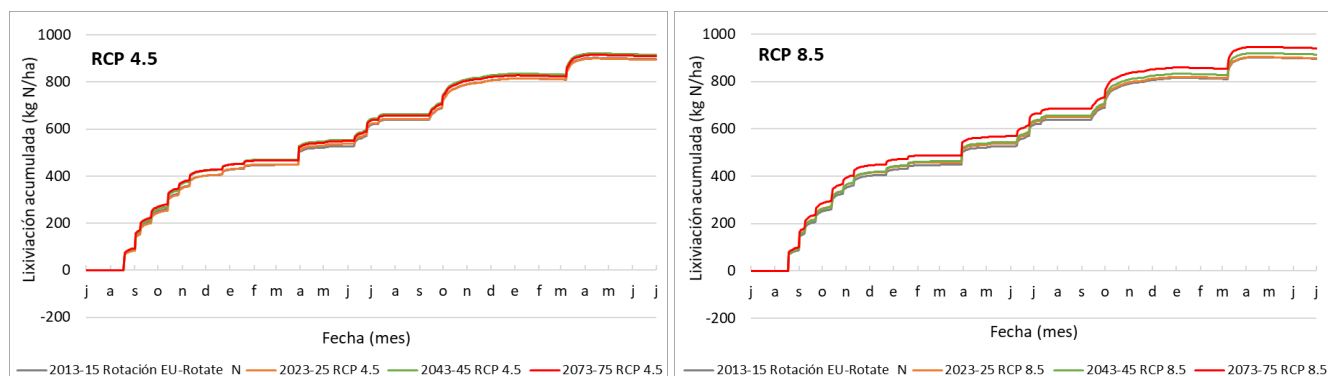


Figura 26. Simulación de la lixiviación acumulada en distintos períodos para un escenario RCP 4.5 (izq.) y RCP 8.5 (dcha.) utilizando el modelo EU-Rotate\_N

También, se cumple que la variación de lixiviación acumulada (tabla 21) para un escenario RCP 8.5 aumenta su valor, conforme más lejano es en el tiempo. Siendo diferente para el escenario RCP 4.5, en el que la mayor variación entre períodos se da para el año 2043-2045.

Tabla 21. Variación de la lixiviación acumulada para los distintos escenarios según EU-Rotate\_N

Escenario	Período	2013-2015	2023-2025	2043-2045	2073-2075
RCP 4.5	Valor Lix <sub>final</sub> (kg N/ha)	897,0	893,3	915,1	909,0
	Variación Lixiviación (%)	-	-0,3	2,1	1,4
RCP 8.5	Valor Lix <sub>final</sub> (kg N/ha)	897,0	898,3	914,0	940,5
	Variación Lixiviación (%)	-	0,2	2,0	4,7

Los elevados valores de  $N_{min}$  anteriores (figuras 24 y 25), se deben a que en definitiva el balance de N es positivo, es decir las ganancias superan a las pérdidas. Como se puede observar en la tabla siguiente, esto es debido principalmente a los elevados valores de N mineralizado. Las pérdidas por extracción de la planta y las pérdidas gaseosas (volatilización y desnitrificación) disminuyen sus valores para un futuro cercano y medio, y vuelven aumentar para un futuro lejano. En definitiva, los valores de los componentes del balance de N (tabla 22) para un mismo escenario apenas varían entre períodos, lo cual explica el comportamiento observado en la evolución de  $N_{min}$  (figuras 24 y 25).

Tabla 22. Otros componentes del balance de N según el modelo EU-Rotate\_N

Escenario	Período	2013-2015	2023-2025	2043-2045	2073-2075
RCP 4.5	Extracción planta (kg N/ha)	586	583	586	588
	Pérdidas gaseosas (kg N/ha)	208	193	195	206
	N mineralizado (kg N/ha)	1190	1160	1190	1200
RCP 8.5	Extracción planta (kg N/ha)	586	586	589	592
	Pérdidas gaseosas (kg N/ha)	208	192	197	208
	N mineralizado (kg N/ha)	1190	1170	1200	1230

En relación con el carbono, el escenario RCP 4.5 muestra unos valores de respiración acumulada muy diferentes entre períodos (figura 27), entre los que destacan los valores inferiores de  $C_{ra}$  para un futuro cercano. Para el escenario RCP 8.5, se sigue cumpliendo la

tendencia al aumento de los valores de  $C_{ra}$  conforme pasan los años, aunque sus diferencias son muy ligeras.

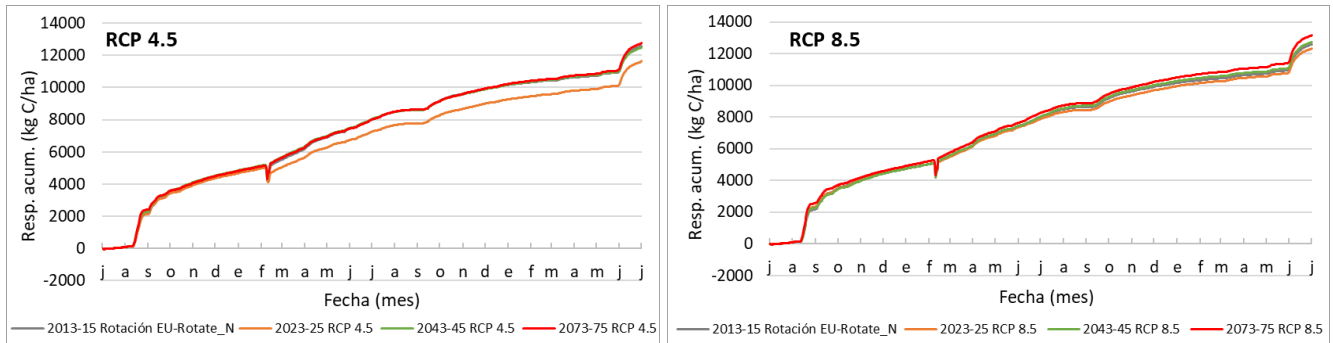


Figura 27. Simulación de la respiración acumulada ( $C_{ra}$ ) en distintos períodos para un escenario RCP 4.5 (izq.) y RCP 8.5 (dcha.) utilizando el modelo EU-Rotate\_N

En la tabla 23, se puede ver que la variación de  $C_{ra}$  disminuye en ambos escenarios a corto plazo, probablemente debido a que la mineralización ocurrida durante la rotación 2013-2015 fuera superior a lo habitual y que, al tratarse de la referencia, no se observarían esos aumentos progresivos de  $C_{ra}$  en los diferentes períodos.

Tabla 23. Variación de  $C_{ra}$  para los distintos escenarios en EU-Rotate\_N

Escenario	Período	2013-2015	2023-2025	2043-2045	2073-2075
RCP 4.5	Valor de $C_{ra}$ final (kg C/ha)	12587	11631	12482	12753
	Variación $C_{ra}$ (%)	-	-7,6	-0,8	1,3
RCP 8.5	Valor de $C_{ra}$ final (kg C/ha)	12587	12326	12727	13147
	Variación $C_{ra}$ (%)	-	-2,1	1,1	4,5

El contenido de carbono en el humus (figura 28) para los dos escenarios se mueve dentro de rangos muy similares (cerca de 48000 kg C/ha), si bien, para un escenario más pesimista las diferencias entre períodos son más pronunciadas, disminuyendo la variación de  $C_{ha}$  (tabla 24) respecto al 2013-2015 en casi un -0,7 % para el período 2073-2075.

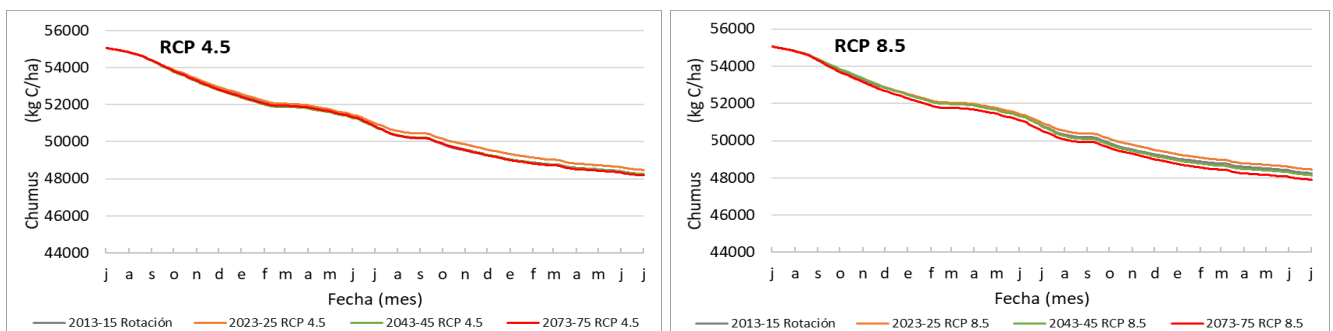


Figura 28. Variación del contenido de carbono del humus ( $C_{ha}$ ) para los distintos escenarios según EU-Rotate\_N.

Tabla 24. Variación del carbono del humus ( $C_{ha}$ ) para los distintos escenarios según EU-Rotate\_N

Escenario	Período	2013-2015	2023-2025	2043-2045	2073-2075
RCP 4.5	Valor de $C_{ha}$ final (kg C/ha)	48248	48474	48183	48183
	Variación $C_{ha}$ (%)	-	0,5	-0,1	-0,1
RCP 8.5	Valor de $C_{ha}$ final (kg C/ha)	48248	48445	48145	47897
	Variación $C_{ha}$ (%)	-	0,4	-0,2	-0,7

En la tabla 25, se observa que entre las simulaciones los valores de  $C_{mo}$  no sufrieron grandes cambios, siendo la variación máxima próxima al  $\pm 2\%$ .

Tabla 25. Variación de C<sub>mo</sub> para los distintos escenarios en EU-Rotate\_N

Escenario	Período	2013-2015	2023-2025	2043-2045	2073-2075
RCP 4.5	Valor de C <sub>mo</sub> final (kg C/ha)	5939	6039	6070	5901
	Variación C <sub>mo</sub> (%)	-	1,7	2,2	-0,6
RCP 8.5	Valor de C <sub>mo</sub> final (kg C/ha)	5939	6014	5918	5833
	Variación C <sub>mo</sub> (%)	-	1,3	-0,4	-1,8

#### 4.5. ALTERNATIVAS DE MEJORA

En vista de los resultados de producción de materia seca (m.s.) para el período 2013-2015 (tabla 26) obtenidos mediante EU-Rotate\_N, se plantearon diversas mejoras ajustando el riego y la fertilización. En un principio los valores objetivos de producción de m.s. incorporados en el modelo, fueron de 2,8 t/ha para la calabaza y de 9 t/ha para la cebolla, valores que como se puede ver en la tabla no fueron alcanzados durante la rotación.

Tabla 26. Producción de materia seca (t/ha) considerando los ajustes de riego y fertilización

	2013-2015	2013-2015			2043-45 RCP 4.5			2043-45 RCP 8.5		
		↑ Dosis rieg	↑ Frec riego	↓ Dosis fert	↑ Dosis rieg	↑ Frec riego	↓ Dosis fert	↑ Dosis rieg	↑ Frec riego	↓ Dosis fert
Coliflor	10.43	10.43	10.43	10.43	10.44	10.44	10.44	10.44	10.44	10.44
Calabaza	0.94	2.10	2.32	2.32	2.10	2.30	2.30	2.18	2.40	2.40
Cebolla	5.78	6.77	6.77	6.77	6.80	6.80	6.80	6.78	6.78	6.78
Rotación	17.16	19.30	19.53	19.52	19.34	19.54	19.53	19.40	19.62	19.62

Sabiendo que el contenido de N en el suelo y la temperatura no fueron los factores limitantes en la producción de m.s., se analizaron los valores de transpiración en los tres cultivos (ver anexos) y se pudo averiguar que, el agua había sido el factor responsable de la escasa producción en la calabaza y en la cebolla. Esta limitación del agua se debió a los riegos insuficientes, ya que se tomaron de otros ensayos del IVIA en donde las condiciones climatológicas fueron muy distintas a las de la rotación 2013-2015, cuyos años fueron muy secos. Por esta razón, se realizaron simulaciones con EU-Rotate\_N teniendo en cuenta ciertas mejoras en el manejo del agua de riego.

La primera mejora consistió en aumentar las dosis de agua de riego, un 39% en la calabaza y un 27% en la cebolla. Como se puede observar en la tabla 26, tras la mejora, la producción de m.s. en la rotación de cultivos del 2013-2015 se incrementó de forma considerable, aumentando concretamente para la calabaza a un valor de 2,1 t/ha de materia seca. Sin embargo, pese a los buenos resultados de producción, fue necesario conocer en detalle cómo estos cambios afectaban a los distintos componentes que intervienen en el balance de C y N. En la tabla 27, se observa como por consecuencia del aumento de las dosis de riego se ven incrementados en gran medida los valores de lixiviación (pérdida de N).

Tabla 27. Componentes del ciclo del N y del C considerando los ajustes de riego y fertilización

Proceso	2013-2015	2013-2015			Escenario 2043-2045 4.5			Escenario 2043-2045 8.5		
	Rotación	↑ Dosis rieg	↑ Frec riego	↓ Dosis fert	↑ Dosis rieg	↑ Frec riego	↓ Dosis fert	↑ Dosis rieg	↑ Frec riego	↓ Dosis fert
Lixiviación (kg N/ha)	896	1247	999	924	1013	1017	941	1016	1021	948
Extracción planta (kg N/ha)	586	641	648	648	642	647	647	644	650	650
Pérdidas gaseosas (kg N/ha)	208	228	217	208	212	202	195	217	205	196
N mineralizado (kg N/ha)	1190	1247	1254	1254	1240	1246	1246	1261	1268	1268
Respiración (kg C/ha)	12587	13649	13773	13772	13509	13632	13633	13816	13939	13939

Estos resultados conllevaron a una segunda mejora que consistió en mantener el volumen de agua de riego anterior, pero aumentando la frecuencia de riego. La tabla anterior muestra que con la introducción de un riego adicional se consigue disminuir la lixiviación. Por otro lado, también se consigue incrementar ligeramente la producción de m.s. en la rotación (tabla 26), lo que explica a su vez el aumento en la extracción por parte de la planta.

La tercera mejora consistió en la disminución de la dosis fertilizante, la cual se planteó debido a que EU-Rotate\_N simulaba para el período de la calabaza unos valores muy elevados de  $N_{\min}$  próximos a los 400 kg N/ha, consecuencia del elevado aporte de los residuos de la coliflor. De manera que se consideró un único abonado durante el cultivo de la calabaza de 50 kg  $N_{\min}$ /ha (reducción del 67%). Así pues, viendo que, para una menor fertilización, la producción de m.s. de la rotación se mantiene (tabla 26), y las pérdidas de N y C disminuyen con respecto a la anterior mejora (tabla 27), se escoge finalmente como la mejor alternativa de manejo en el campo. Además, con esta última mejora, el  $N_{\min}$  durante el período de la calabaza ya no se acumula en exceso en el perfil de suelo y se sitúa en torno a los 200 kg N/ha.

Asimismo, con el propósito de observar el efecto que tienen las distintas mejoras introducidas en un escenario futuro a medio plazo, se analizó la rotación del 2043-2045 para un RCP 4.5 y un RCP 8.5. Si se realiza la comparación entre escenarios, se observa que para el RCP 8.5 la producción de m.s. aumenta ligeramente, mientras que los valores de lixiviación, extracción por la planta, y pérdidas gaseosas apenas sufren variaciones. Donde realmente se aprecian grandes cambios es en el aumento de la mineralización de N y C (respiración) por efecto del aumento de la temperatura en dichos escenarios.

Por otra parte, se muestra el balance de materia orgánica (tabla 28) en las distintas situaciones estudiadas. En la rotación del 2013-2015 no modificada, se justifica la introducción de materia orgánica en forma de enmienda e incorporación de los residuos ya que si no se llevara a cabo esta práctica se produciría una pérdida neta del carbono orgánico del suelo. Sin embargo, sería posible aumentar el intervalo de aplicación de estas enmiendas teniendo en cuenta el importante incremento de m.o. en el suelo al final del período (1303 kg C/ha). Dado que los escenarios futuros pronostican procesos de descomposición más rápidos por efecto de la temperatura, sería conveniente estudiar el intervalo mínimo de aplicación de enmiendas orgánicas para no disminuir el contenido total de m.o. del suelo, así como su relación C/N con el propósito de prolongar su estancia en el mismo y evitar así aumentos significativos de la respiración del suelo ( $CO_2$ ).

Tabla 28. Balance de materia orgánica en los diferentes escenarios considerando los ajustes de riego y fertilización

C orgánico (kg C/ha)	2013-2015		2013-2015			Escenario 2043-2045 4.5			Escenario 2043-2045 8.5		
	Rotación		↑ Dosis rieg	↑ Frec riego	↓ Dosis fert	↑ Dosis rieg	↑ Frec riego	↓ Dosis fert	↑ Dosis rieg	↑ Frec riego	↓ Dosis fert
SOM <sub>inicial</sub>	55067		55067	55067	55067	55067	55067	55067	55067	55067	55067
SOM <sub>final</sub>	48248		47919	47886	47886	47947	47905	47905	47796	47761	47761
AOM <sub>inicial</sub>	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
AOM <sub>final</sub>	5939		6112	6111	6110	6264	6262	6262	6089	6088	6088
SMB <sub>inicial</sub>	341		341	341	341	341	341	341	341	341	341
SMB <sub>final</sub>	2524		2654	2663	2662	2657	2665	2665	2657	2666	2666
Total MO <sub>inicial</sub>	55408		55408	55408	55408	55408	55408	55408	55408	55408	55408
Total MO <sub>final</sub>	56711		56684	56660	56659	56868	56832	56832	56542	56514	56514
Δ M.O.	1303		1276	1252	1250	1459	1424	1424	1133	1106	1106

## **4. CONCLUSIONES**



Los dos modelos de simulación estudiados, LEACHM y EU-Rotate\_N, resultan válidos para representar los cambios en las variables climáticas, si bien es cierto que requieren ser previamente calibrados para las condiciones específicas de suelo, cultivo y manejo. De los dos modelos, EU-Rotate\_N proporciona una mayor capacidad predictiva, al simular mejor el desarrollo de las plantas y la producción del cultivo.

El modelo climático utilizado pronostica un aumento de la temperatura media en la rotación de entre 1.2 – 2.2 °C. Este incremento de la temperatura media es debido fundamentalmente al importante aumento de las temperaturas mínimas y no al de las máximas, que incluso en algunos escenarios disminuyen ligeramente.

Independientemente de los escenarios de emisión, las diferencias en las variables de interés ( $N_{\min}$ , lixiviación,  $C_{ra}$ ,  $C_{ha}$  y  $C_{mo}$ ) entre períodos fueron más marcadas con el modelo LEACHM que con el modelo EU-Rotate\_N. Además, no existieron grandes cambios en el corto plazo, siendo a partir del período 2043-2045 cuando los resultados empiezan a diferenciarse respecto al 2013-2015. A igualdad de tiempo, se producen diferencias en las variables de interés al comparar los distintos escenarios climáticos (RCP 4.5 y RCP 8.5), lo que confirma nuevamente la influencia de la temperatura en la respuesta/comportamiento de los suelos.

Manteniendo los mismos aportes de N al suelo, los cambios de temperatura pronosticados suponen un aumento del contenido de N mineral en el perfil de suelo como consecuencia de un incremento de la mineralización de la materia orgánica. Los demás términos del balance, aunque también varían, lo hacen en menor medida. La mayor mineralización se produce en el largo plazo bajo el escenario de mayor forzamiento radiativo. Las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de la respiración del suelo se pueden incrementar en la rotación estudiada entre un 5 y un 12% según el modelo de simulación utilizado.

Para las condiciones de cultivo estudiadas (2013-2015) que coincidió con un período muy seco, los aportes de fertilizantes minerales y las enmiendas orgánicas utilizadas condujeron a elevados contenidos de  $N_{\min}$  en el suelo. Las mejoras planteadas en cuanto a dosis y frecuencia de riego y de reducción de la fertilización mineral fueron efectivas para optimizar la producción y reducir las pérdidas por lixiviación. Sería interesante también investigar el intervalo óptimo de aplicación de las enmiendas orgánicas y el posible uso de enmiendas con características diferentes a la de la gallinaza, con el fin de mitigar la lixiviación de nitratos y las emisiones de CO<sub>2</sub> por parte del suelo.

En definitiva, el uso de los modelos de simulación acoplados a diferentes escenarios climáticos permitió conocer el comportamiento de la mineralización en el suelo, lo cual facilita las recomendaciones para un manejo del mismo adaptado a las condiciones específicas de los cultivos en la zona de Valencia.

## **5. BIBLIOGRAFÍA**

**AEMET** (2019). Servicios climáticos. Proyecciones climáticas para el siglo XXI. Datos diarios. Interpretación.

[http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio\\_climat/datos\\_diarios/ayuda](http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/datos_diarios/ayuda) [Fecha de consulta: 24 de febrero de 2019]

**BAIXAULI, C., GINER, A., AGUILAR, J.M., NÁJERA, I.** (2017). Aspectos clave para diseñar un programa de producción en coliflor. Cajamar Caja Rural nº22.

<https://www.grupocooperativocajamar.es/recursos-entidades/pdf/bd/agroalimentario/innovacion/investigacion/documentos-y-programas/022-coliflor-1501591680.pdf> [Fecha de consulta: 08 de marzo de 2019]

**BATJES, N.H.** (1998). Mitigation of Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentrations by Increased Carbon Sequestration in the Soil. *Biol Fert Soils*, 27 (3), pp. 230-235.

**BOSCAFIORI, N.A.** (2017). Evaluación del cambio de necesidades hídricas en cítricos y kaki en la comarca de la Ribera (Valencia) por efecto del cambio climático. Trabajo Final de Máster. ETSIAMN. Universitat Politècnica de València.

**BURBANO-ORJUELA, H.** (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Rev. Ciencias Agrícolas*, 35(1): 82-96. doi: <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.183501.85>.

**FAO** (2002). Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. World Soils Resources Reports 96. Rome. 57 pp.

<http://www.fao.org/3/a-bl001s.pdf> [Fecha de consulta: 04 de enero de 2019]

**FAO** (2017). Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura Roma, Italia. 77 pp.

**FAO** (2018). Mapa del carbono orgánico del suelo - GSOCmap. Version 1.2.0. FAO, Roma, Italia. <http://www.fao.org/3/i8195es/i8195ES.pdf> [Fecha de consulta: 03 de febrero de 2019]

**GARCÍA, C.** (2018). *El carbono orgánico y la funcionalidad del suelo*. Diario La verdad.

<https://www.laverdad.es/ababol/ciencia/carbono-organico-funcionalidad-20180630213734nt.html> [Fecha de consulta: 04 de enero de 2019]

**GUTIÉRREZ, A., ANCÍZAR, F., RINCÓN, C., EMILIA, L.** (2012). Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. *Revista Colombiana de Biotecnología*, v. 14, n. 1, pp. 285-295. ISSN 1909-8758. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/32889/38347> [Fecha de consulta: 04 de julio de 2019]

**GVA** (2013). Generalitat Valenciana. *Programa de Desarrollo Rural de la Comunitat Valenciana 2007-2013*.

<http://www.avfga.gva.es/es/pdr-cv-2007-2013> [Fecha de consulta: 20 de junio de 2019]

**HANSEN, S., JENSEN, H.E., NIELSEN, N.E., SVENDSEN, H.** (1990). DAISY: Soil Plant Atmosphere System Model. NPO Report No. A 10. The National Agency for Environmental Protection, Copenhagen, 272 pp.

**HERNÁNDEZ, N., SOTO, F., CABALLERO, A.** (2009). Modelos de simulación de cultivos. Características y usos. Cultivos Tropicales [en línea]. *Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas*, vol 30, núm. 1, 2009, pp. 73-82. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193217899013> [Fecha de consulta: 17 de junio de 2019]

- JARAMILLO, C.X.** (2015). *Mineralización de la gallinaza y de los restos de cosecha en el suelo. Aplicación al cultivo de la coliflor en la Huerta de Valencia*. Tesis Doctoral. Valencia: Universitat Politècnica de València, 330 pp.  
<https://riunet.upv.es/handle/10251/62862> [Fecha de consulta: 14 de enero 2019]
- JONES, C., MCCONNELL, C., COLEMAN, K., COX, P., FALLOON, P., JENKINSON, D., POWLSON, D.** (2005). Global climate change and soil carbon stocks; predictions from two contrasting models for the turnover of organic carbon in soil. *Global Change Biology*, 11, pp. 154-166, doi: 10.1111/j.1365-2486.2004.00885.x
- KONONOVA, M.M.** (1975). *Humus of virgin and cultivated soils*. Soil components Vol. I, ed. J.E. Gieseking. Nueva York, SpringerVerlag. pp. 475-526.
- MAPA** (2018). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. *Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos (ESYRCE)*  
[https://www.mapa.gob.es/ca/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/regadios2018\\_tcm34-504665.pdf](https://www.mapa.gob.es/ca/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/regadios2018_tcm34-504665.pdf) [Fecha de consulta: 02 de abril de 2019]
- MARM** (2009). Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino. *Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España*.  
[https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/publicaciones/01\\_FERTILIZACI%C3%93N\(BAJA\)\\_tcm30-57890.pdf](https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/publicaciones/01_FERTILIZACI%C3%93N(BAJA)_tcm30-57890.pdf) [Fecha de consulta: 01 de julio de 2019]
- MITECO** (2016a). Ministerio para la transición ecológica. *Mitigación: políticas y medidas*.  
<https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/agricola.aspx> [Fecha de consulta: 01 de junio de 2019]
- MITECO** (2016b). Cambio Climático: Informe de síntesis. GUÍA RESUMIDA DEL QUINTO INFORME DE EVALUACIÓN DEL IPCC.  
[https://www.miteco.gob.es/es/ceneam/recursos/mini-portales-tematicos/guia-sintesis-resumida\\_tcm30-376937.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/ceneam/recursos/mini-portales-tematicos/guia-sintesis-resumida_tcm30-376937.pdf) [Fecha de consulta: 04 de enero de 2019]
- MITECO** (2017). PNACC: Plan de Adaptación al Cambio Climático IV informe de seguimiento.  
[https://www.adaptecca.es/sites/default/files/documentos/2018-4informe\\_de\\_segguimiento\\_pnacc\\_anexo\\_ccaa.pdf](https://www.adaptecca.es/sites/default/files/documentos/2018-4informe_de_segguimiento_pnacc_anexo_ccaa.pdf) [Fecha de consulta: 05 de julio de 2019]
- MITECO** (2019). Plan de Adaptación al Cambio Climático de Valencia 2050.  
<https://www.adaptecca.es/administracion-autonomica-local/administracion-local> [Fecha de consulta: 05 de julio de 2019]
- ORDÓÑEZ, R. M., GONZÁLEZ, P., GIRÁLDEZ, J.V., PEREA, F.** (2008). Influencia de la climatología y el manejo del suelo en las emisiones de CO<sub>2</sub> en un suelo arcilloso de la Vega de Carmona. *Revista de estudios locales*, ISSN 1696-4284, Nº. 6, pp. 2339-2354  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2738299> [Fecha de consulta: 24 de enero de 2019]
- PALOMARES, A.** (2013). *Contaminación del agua por nitratos y técnicas para su tratamiento*.  
<https://www.esferadelagua.es/agua-y-tecnologia/contaminacion-del-agua-por-nitratos-y-tecnicas-para-su-tratamiento> [Fecha de consulta: 02 de mayo de 2019]
- RAHN, C., ZHANG, K., LILLYWHITE, R., RAMOS, C., DOLTRA, J., DE PAZ, J.M., RILEY, H., FINK, M., NENDEL, C., THORUP KRISTENSEN, K., PERDERSEN, A., PIRO, F., VENECIA, A., FIRTH, C.,**

**SCHMUTZ, U., RAYNS, F., STROHMEYER, K.** (2010). EU-Rotate\_N - a European Decision Support System- to Predict Environmental and Economic Europ. J. Hort. Sci. 75, pp. 20-32.

**SÁNCHEZ, C.M.** (2015). *Estimación de parámetros en modelos de transporte de agua y nitrógeno en el suelo*. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de València.

**SØGAARD, H.T, SOMMER, S.G., HUTCHINGS, N.J., HUIJSMANS, J.F.M., BUSSINK, D.W., NICHOLSON F.** (2002). Ammonia volatilization from field-applied animal slurry – the ALFAM model. Atmospheric Environment 36 (20), pp. 3309-3319.

**TORNES, N., BROWN, O., GÓMEZ, Y., GUERRERO, A. M.** (2016). Evaluación del modelo AquaCrop en la simulación del crecimiento del cultivo del frijol. *Rev. Cie Téc Agr* [online], vol.25, n.3, pp.23-30. ISSN 2071-0054. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.30090.06080>.

**UNCCD** (2015). Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación. *El carbono esencial en la tierra*. Informe científico-político nº1 noviembre 2015  
[https://www.unccd.int/sites/default/files/documents/2015\\_PolicyBrief\\_SPI\\_SPA\\_17Nov\\_%202web\\_0.pdf](https://www.unccd.int/sites/default/files/documents/2015_PolicyBrief_SPI_SPA_17Nov_%202web_0.pdf) [Fecha de consulta: 08 de julio de 2019]

**VERHULST, N., FRANCOIS, I.M., GOVAERTS, B.** (2015). *Agricultura de conservación y captura de carbono en el suelo: entre el mito y la realidad del agricultor*. Ed. CIMMYT y MasAgro. México, DF (México). 16 pp.  
[http://conservacion.cimmyt.org/en/component/docman/doc\\_view/1504-captura-de-carbono-2015](http://conservacion.cimmyt.org/en/component/docman/doc_view/1504-captura-de-carbono-2015) [Fecha de consulta: 14 de enero 2019]

**WAGENET, R.J., HUTSON, J.L.** (1989). *LEACHM: Leaching Estimation and Chemistry Model: A Process Based Model of Water and Solute Movement, Transformations, Plant Uptake and Chemical Reactions in the Unsaturated Zone*. Ver. 2. Water Resour. Inst. Cornell University, Ithaca, New York.