

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**Optimización de flujos residuales de
nitrógeno para su aplicación agrícola en
Cantabria**

**(Optimization of waste nitrogen flows and
their agricultural application in Cantabria)**

Para acceder al Título de

Graduado/a en Ingeniería Química

Autor: Carmen Barquín Díez

TÍTULO	Optimización de flujos residuales de nitrógeno para su aplicación agrícola en Cantabria		
AUTOR	Carmen Barquín Díez		
DIRECTOR/CODIRECTOR	Antonio Domínguez Ramos, Selene Cobo Gutiérrez		
TITULACIÓN	Grado en Ingeniería Química	FECHA	25/09/2018

PLABRAS CLAVE

Economía circular, flujos residuales de nitrógeno, recuperación de nutrientes, simulación y optimización.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una correcta gestión de los residuos orgánicos, pueden contribuir a la transición hacia una economía circular de nutrientes (Cobo y cols., 2018). El objetivo de este proyecto es determinar la gestión óptima de los flujos de nitrógeno contenido en los residuos orgánicos generados anualmente en Cantabria para su aplicación agrícola de acuerdo a las siguientes funciones objetivo:

- Minimización de los lixiviados de nitrógeno.
- Minimización de los costes asociados a la producción de los fertilizantes orgánicos y a la compra de fertilizante inorgánico (nitrato de amonio).
- Minimización del consumo de fertilizante comercial.

En primer lugar se cuantificaron los flujos residuales de nitrógeno y el consumo de fertilizantes nitrogenados en Cantabria. Se desarrolló un modelo mediante los softwares DNDC y GAMS, asumiendo que los productos que se podrían generar a partir de los residuos orgánicos (compost, digestato, material bio-estabilizado, lodos, lodos digeridos y estiércol) se destinan al cultivo del maíz y del trigo, los principales cultivos forrajeros en Cantabria.

RESULTADOS

La simulación del crecimiento de los cultivos mediante DNDC permitió determinar la cantidad de nitrógeno absorbido y los lixiviados generados a partir de la aplicación de cada producto. Estos resultados se introdujeron en GAMS como parámetros del modelo. Se plantearon tres escenarios: escenario base (todos los residuos orgánicos están disponibles), escenario 1 (50% de recogida selectiva de los residuos orgánicos, no hay estiércol disponible) y escenario 2 (0% de recogida selectiva, no hay estiércol disponible).

El escenario base resulta el más satisfactorio, puesto que es el más barato, el que menos lixivia y no necesita fertilizantes externos. Cabe destacar que la cantidad de estiércol disponible en Cantabria es suficiente para cubrir las necesidades de nitrógeno de los dos cultivos. En el escenario 2 se consiguen mejores resultados que en el escenario 1, a pesar de que las políticas europeas fomentan la implantación de la recogida selectiva (Parlamento y Consejo de la UE, 2008). Esto se debe a que la producción del digestato en el escenario 1 es más cara que la producción de material bio-estabilizado en el escenario 2. Además, la tasa del 50% de la recogida selectiva limita la producción de digestato respecto al escenario 2 en el que todos los residuos orgánicos municipales pueden transformarse en material bio-estabilizado, por lo que el consumo de fertilizantes industriales es mayor en el escenario 1.

CONCLUSIONES

Los residuos demuestran que en Cantabria se dispone de suficientes residuos orgánicos para fertilizar los campos de maíz y de trigo, por lo que avanzar hacia una economía circular de nutrientes es posible.

Como se han planteado 3 funciones objetivo, dependiendo de cuál se quiera minimizar, los valores de las otras dos aumentan. Por lo tanto, se ha de buscar un equilibrio entre generación de lixiviados, costes y consumo de fertilizantes comerciales de cara a que el sistema sea lo más beneficioso posible tanto como para el medio ambiente como para la economía.

BIBLIOGRAFÍA

Cobo, S., Dominguez-Ramos, A. and Irabien, A. (2018) 'Minimization of Resource Consumption and Carbon Footprint of a Circular Organic Waste Valorization System', *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 6(3), pp. 3493–3501. doi: 10.1021/acssuschemeng.7b03767.

Parlamento y Consejo de la UE (2008) 'Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.' Disponible en: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:01:ES:HTML>

TÍTULO	Optimization of waste nitrogen flows and their agricultural application in Cantabria		
AUTOR	Carmen Barquín Díez		
DIRECTOR/CODIRECTOR	Antonio Domínguez Ramos, Selene Cobo Gutiérrez		
TITULACIÓN	Grado en Ingeniería Química	FECHA	25/09/2018

KEYWORDS

Circular economy, waste nitrogen flows, nutrient recovery, simulation and optimization.

SCOPE

A correct management of organic waste can contribute to the transition to a circular economy of nutrients (Cobo et al., 2018). The goal of this work is to determine the optimal management of the fluxes of the nitrogen that is contained in the organic waste generated yearly in Cantabria, for their subsequent agricultural application, according to the following objective functions:

- Minimization of the nitrogen leachate.
- Minimization of the costs associated with the production of organic fertilizers and the purchase of inorganic fertilizer (ammonium nitrate).
- Minimization of the consumption of commercial fertilizers.

First, the residual nitrogen flows and the consumption of nitrogen fertilizers in Cantabria were quantified. A model was developed using the DNDC and GAMS software, assuming that the products that could be generated from organic waste (compost, digestate, bio-stabilized material, sludge, digested sludge and manure) are applied to land to grow corn and wheat, the main fodder crops in Cantabria.

RESULTS

The simulation of the growth of the studied crops that carried out in DNDC enabled to determine the amount of nitrogen leachate that results from the application of each product. These results were introduced into GAMS as model parameters.

Three scenarios were proposed: baseline scenario (all the organic waste is available), scenario 1 (50% source separation of organic waste, manure is not available) and scenario 2 (0% source separation of organic waste, manure is not available). The best

performance of the system in terms of all the objective functions is achieved with the baseline scenario. It is worth mentioning that the amount of manure generated in Cantabria is enough to cover the nitrogen requirements of the studied crops. On the other hand, scenario 2 performs better than scenario 1, despite the fact that European policies aim at boosting the source separation of municipal organic waste (Parliament and European Council of the European Union, 2008). The reason is that the production of digestate, on which scenario 1 is based, is more expensive than the production of bio-stabilized material in scenario 2. Moreover, the 50% source separation rate limits the production of digestate with respect to scenario 2 where all the municipal organic waste can turn into bio-stabilized material. Thus, scenario 1 relies on industrial fertilizers to a greater extent.

CONCLUSIONS

The results prove that Cantabria can move towards a nutrient circular economy, since the amount of available organic waste is enough to fertilize the corn and wheat fields with the nitrogen recovered from it.

Three objective functions have been proposed, so, depending on which one is minimized, the values of the other two objective functions increase. Therefore, a balance has to be found between the generation of nitrogen leachate, the cost and the consumption of commercial fertilizer in order to make the system as economical and environmentally friendly as possible.

REFERENCES

Cobo, S., Dominguez-Ramos, A. and Irabien, A. (2018) 'Minimization of Resource Consumption and Carbon Footprint of a Circular Organic Waste Valorization System', *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 6(3), pp. 3493–3501. doi: 10.1021/acssuschemeng.7b03767.

Parliament and European Council of the European Union (2008) 'Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives.' Available online: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:01:ES:HTML>

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría expresar mi más sincera gratitud a mis directores del TFG, Antonio Domínguez y Selene Cobo, por confiar en mí desde el primer momento para la realización de este trabajo y por la constancia que han demostrado para ayudarme en todo momento.

A mis abuelos, quienes cada día me preguntan qué tal me va en la universidad y con las clases a pesar de no entender nada de lo que les cuento; su paciencia y su amor son eternos.

Finalmente, y no por ello menos importante, querría mencionar a mis padres, hermana, pareja, demás familia y amigos por todo el apoyo recibido durante estos cuatro años de carrera y especialmente durante los últimos meses.

«Si le ves, que no le verás,
no le digas nada»

TABLA DE CONTENIDOS

LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABLAS	iii
1. INTRODUCCIÓN	- 1 -
1.1. Economía circular.....	- 1 -
1.1.1. La economía circular en Europa	- 2 -
1.1.2. La economía circular en España	- 3 -
1.1.3. La economía circular en Cantabria	- 3 -
1.1.4. Economía circular de nutrientes.....	- 4 -
1.2. Gestión de los residuos orgánicos en Cantabria.....	- 7 -
1.3. Objetivos	- 8 -
2. METODOLOGÍA	- 10 -
2.1. DNDC.....	- 11 -
2.2. GAMS	- 11 -
3. CUANTIFICACIÓN DE LOS PRINCIPALES FLUJOS DE NITRÓGENO EN CANTABRIA....	- 12 -
4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	- 13 -
5. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	- 15 -
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	- 20 -
6.1. Simulación de los procesos de producción de maíz y trigo	- 20 -
6.2. Optimización de acuerdo a las funciones objetivo.....	- 24 -
7. CONCLUSIONES	- 35 -
8. NOMENCLATURA	- 37 -
9. BIBLIOGRAFÍA	- 39 -
10. ANEXO	- 44 -

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Pasos metodológicos en la elaboración del trabajo.	- 10 -
Figura 2. Límites del sistema.	- 14 -
Figura 3. Nitrógeno total absorbido por el maíz en función del nitrógeno total aplicado al suelo.	- 20 -
Figura 4. Nitrógeno absorbido por el trigo en función del nitrógeno total aplicado al suelo.	- 21 -
Figura 5. Lixiviados del maíz en función del nitrógeno total aplicado al suelo.	- 21 -
Figura 6. Lixiviados del trigo en función del nitrógeno total aplicado al suelo.	- 22 -
Figura 7. Ejemplo de los resultados aportados por el software DNDC respecto al balance de N.	- 24 -
Figura 8. Cantidades de producto necesarias para optimizar el escenario base.	- 25 -
Figura 9. Cantidades de producto necesarias para optimizar el escenario 1.	- 27 -
Figura 10. Cantidades de producto necesarias para optimizar el escenario 2.	- 28 -
Figura 11. Resultados normalizados del escenario base.	- 31 -
Figura 12. Resultados normalizados del escenario 1.	- 32 -
Figura 13. Resultados normalizados del escenario 2.	- 33 -

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Cantidades de residuos generados anualmente en Cantabria y su contenido en nitrógeno.	- 12 -
Tabla 2. Eficiencias de los productos.	- 16 -
Tabla 3. Cantidades máximas anuales por producto en Cantabria.	- 16 -
Tabla 4. Concentración de nitrógeno de cada producto.	- 17 -
Tabla 5. Costes de producción de cada producto.	- 17 -
Tabla 6. Nitrógeno total aplicado al suelo y lixiviados de los productos y del fertilizante comercial.	- 23 -
Tabla 7. Valores de las funciones objetivos en todos los escenarios.	- 30 -
Tabla 8. Porcentaje de hectáreas fertilizadas orgánicamente por cada escenario, función objetivo y cultivo.	- 34 -
Tabla A1. Relaciones C/N de cada producto.	- 44 -
Tabla A2. Porcentaje de nitrógeno orgánico, amonio y nitrato de cada producto. ...	- 44 -

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Economía circular

La economía circular es un concepto popular actualmente. Se trata de un término que se interrelaciona con la sostenibilidad, y cuyo objetivo es que el valor de los productos, los materiales y los recursos se mantenga en los sistemas productivos durante el mayor tiempo posible, a la vez que se reduce al mínimo la generación de residuos. Se trata de implementar una economía no lineal basada en el principio de “cerrar el ciclo de vida” de los productos, los servicios, los residuos, los materiales, el agua y la energía (Fundación para la Economía Circular, 2018).

La economía circular se basa en tres principios clave, cada uno de los cuales aborda varios de los retos en términos de recursos y del sistema a los que han de hacer frente las economías industriales (Ellen McArthur Foundation, 2018a):

- Principio 1. Preservar y mejorar el capital natural controlando existencias finitas y equilibrando los flujos de recursos renovables.
- Principio 2. Optimizar el uso de los recursos rotando productos, componentes y materiales con la máxima utilidad en todo momento.
- Principio 3. Fomentar la eficacia del sistema revelando y eliminando externalidades negativas.

Si bien los principios descritos anteriormente actúan como principios de acción, a continuación se describen algunas de las características fundamentales de lo que sería una economía estrictamente circular (Ellen McArthur Foundation, 2018b):

- Pensar en “sistemas”. La capacidad de comprender cómo influyen entre sí las partes de un todo y la relación del todo con las partes, resulta fundamental. Los elementos se consideran en relación con sus contextos medioambientales y sociales.
- Diseñar sin residuos. Los residuos no existen cuando los materiales de un producto son diseñados para su posterior desmontaje y readaptación.
- Trabajar hacia un uso de energía de fuentes renovables. Los sistemas deberían tratar de funcionar fundamentalmente a partir de energía renovable, lo que

sería posible por los valores reducidos de energía que precisa una economía circular restaurativa.

1.1.1. La economía circular en Europa

En diciembre de 2015, la Comisión Europea presentó su Plan de Acción para una economía circular en Europa (Comisión Europea, 2015). Dicho Plan tiene como finalidad señalar hasta un total de 54 medidas sobre las que la Comisión Europea estima que es necesario actuar para avanzar en economía circular. Estas medidas afectan:

- A las diferentes etapas del ciclo de vida de los productos (diseño y producción, consumo, gestión de residuos y aprovechamiento de los recursos contenidos en los residuos mediante su reintroducción en la economía).
- A cinco áreas que la Comisión considera prioritarias (los plásticos, el desperdicio alimentario, las materias primas críticas, la construcción y la demolición y la biomasa y productos con base biológica).

Además, el Plan incluye también un apartado relativo a la innovación y a las inversiones y un calendario para abordar las 54 medidas (MAPAMA, 2018a).

Por otra parte, “una Europa que utilice eficazmente los recursos” es una de las siete iniciativas emblemáticas que forman parte de la estrategia Europa 2020 (Comisión Europea, 2015) que pretende generar un crecimiento inteligente, sostenible e integrador. Actualmente es una de las principales estrategias de Europa para generar crecimiento y empleo, con el respaldo del Parlamento Europeo y el Consejo Europeo.

Esta iniciativa pretende crear un marco político destinado a apoyar el cambio a una economía eficiente en el uso de los recursos y de baja emisión de carbono, es decir, redirigir la economía actual hacia una economía circular (Fundación para la Economía Circular, 2018).

La transición hacia la economía circular recibirá ayuda financiera de los Fondos Estructurales y de Inversión Europeos (Fondos EIE), con 5.500 millones de euros para la gestión de residuos. Además, contará con 650 millones de euros procedentes de

Horizonte 2020 (el programa de financiación de la investigación e innovación de la UE) y de inversiones en la economía circular a nivel nacional (Comisión Europea, 2018a).

1.1.2. La economía circular en España

España, como estado-miembro, está comprometida con los esfuerzos de la UE para desarrollar una economía eficiente en el uso de recursos, competitiva, baja en carbono y sostenible.

En el ámbito nacional, las iniciativas sobre economía circular son incipientes y hasta ahora las medidas adoptadas han estado centradas, sobre todo, en las políticas ambientales de la fase final del ciclo económico, tal como la gestión de los residuos, donde se cuenta con un *Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos* (MAGRAMA, 2015) a medio plazo, aunque, por otro lado, también se abren nuevas perspectivas para los bioprocesos con la *Estrategia Española de Bioeconomía* (Ministerio de Economía y Competitividad, 2016). Se puede destacar el esfuerzo realizado por el grupo Interplataformas sobre Economía Circular, grupo en el cual participa SusChem-España (SusChem-España, 2018).

Por tanto, se están dando pasos para el seguimiento y evaluación de los procesos de economía circular, aunque en la situación actual las diversas iniciativas suelen aparecer vinculadas a otras estrategias de sostenibilidad y políticas ambientales más desarrolladas.

En cuanto a las comunidades autónomas, únicamente el País Vasco y Cataluña disponen de una estrategia propiamente dicha en materia de economía circular (Fundación COTEC para la Innovación, 2017).

1.1.3. La economía circular en Cantabria

En materia de economía circular, en Cantabria se dispone del *Plan de Residuos de Cantabria 2017-2023* (Gobierno de Cantabria, 2017). Los principales objetivos de dicho plan son reducir la generación de residuos así como conseguir una gestión adecuada de éstos. Los residuos contemplados en este plan son los siguientes:

- Residuos domésticos y asimilados.
- Residuos de Construcción y Demolición (RCD).

- Vehículos Fuera de Uso (VFU).
- Aceites industriales.
- Neumáticos Fuera de Uso (NFU).
- Pilas y Baterías Usadas.
- Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE).
- PCB y PCT.
- Lodos de Depuradora.
- Residuos Industriales.
- Residuos del Sector Primario.
- Residuos Sanitarios.
- Residuos de Industrias Extractivas (RIE) (solo “asimilables” a industriales).

Adicionalmente se incluye la gestión de biorresiduos, como recoge la Ley 22/2011, de 28 de julio, en cumplimiento del artículo 22 de la Directiva 2008/98/CE, que atiende la gestión separada de los mismos, considerando como biorresiduos los residuos biodegradables de jardines y parques, residuos alimenticios y de cocina procedente de hogares, restaurantes, servicios de restauración colectiva y establecimientos de venta al por menor, así como, residuos comparables procedentes de plantas de procesado de alimentos (Gobierno de Cantabria, 2017).

1.1.4. Economía circular de nutrientes

Resulta evidente que de la definición de economía circular se deduce que la práctica totalidad de los sectores de la economía estarían afectados. Dentro de todos estos sectores, la recuperación de nutrientes procedentes de los residuos ha sido ampliamente estudiada en la literatura, esencialmente en forma de compostaje y lodos para el sector agrícola. Sin embargo, existen escasas referencias, como posteriormente se describe, que lo hagan en el contexto de la economía circular bajo un enfoque de ingeniería de procesos.

La recuperación de nutrientes provenientes de residuos y su aplicación como producto agrícola, implica en primer lugar que se disminuya el uso de fertilizantes comerciales en el suelo cultivado; en segundo lugar, que se produzcan lixiviados de nitrógeno, ya sea en forma de nitratos o como nitrógeno orgánico, lo cual puede dar lugar a

problemas de eutrofización, y en tercer y último lugar, costes en el proceso de tratar los residuos para obtener los productos que se usarán como fertilizantes (costes de producción).

Algunos estudios han enfocado el problema de la recuperación de nutrientes aplicando un enfoque de programación matemático. Klinglmair y cols. (2017) optimizaron la gestión de fósforo en Dinamarca. Con esto se pretendía reflejar mejor los efectos que se pueden lograr, a lo largo del tiempo, mediante la distribución óptima de flujos secundarios de fósforo para reducir el uso de fertilizantes minerales ricos en fósforo. La atención se centró en la redistribución óptima de los flujos de P entre diferentes regiones para identificar opciones para cerrar el ciclo de P antropogénico y para reducir la dependencia de la importación de fertilizantes minerales.

Una de las conclusiones obtenidas, es que haciendo esta optimización de flujos de P se podrían reducir hasta en un 80% las entradas necesarias de P en la agricultura de Dinamarca.

España, al igual que otros países europeos, no tiene reservas de fósforo y, por lo tanto, depende de los fertilizantes de fosfato mineral importados. En este contexto, y de manera similar al estudio de Klinglmair y cols. (2017), se realizó en España un análisis de los flujos de P centrándose en la producción agrícola, alimentaria y de fertilizantes (Álvarez y cols., 2018).

El objetivo del análisis fue identificar las áreas que requieren los recursos primarios de P y al mismo tiempo identificar recursos secundarios disponibles.

Concluyeron que la entrada de flujos de P total a la agricultura española asciende a 341.70 kt de P anuales, en forma de fertilizantes minerales (48%), animal (39%), lodo de aguas residuales (10%), compost y otros (3%). La eficiencia del sistema agrícola en la conversión de fertilizantes y abonos ricos en P hacia productos como cultivos y pastos es de alrededor del 85%. Este resultado demuestra la eficacia de aprovechar todos los flujos de P y darles una nueva utilidad. Contar con estudios similares centrados en otros nutrientes podría resultar muy útil para analizar las consecuencias de implementar la anteriormente citada economía circular de nutrientes. Para ello, en

primer lugar es necesario identificar los principales productos que se pueden obtener a partir de residuos orgánicos y que pueden tener una aplicación como fertilizantes orgánicos debido a su contenido en nutrientes son los siguientes:

- Compost. Enmienda orgánica obtenida a partir del tratamiento biológico aerobio y termófilo de residuos biodegradables recogidos separadamente (BOE, 2011).
- Digestato. Es un sub-producto semilíquido resultante de la digestión anaerobia de la materia orgánica (AINIA, 2011).
- Material bio-estabilizado. Se denomina material bio-estabilizado al material orgánico obtenido de las plantas de tratamiento mecánico-biológico de residuos mezclados (BOE, 2011).
- Estiércol. Es una mezcla de las heces, la orina y la cama de los animales. Para denominarse estiércol debe poder ser manejado y almacenado como sólido (MAPAMA, 1995).
- Lodos. Se entenderá por «lodos de depuración» los lodos residuales salidos de todo tipo de estaciones depuradoras de aguas residuales domésticas, urbanas o de aguas residuales de composición similar a las anteriormente citadas, así como los procedentes de fosas sépticas y de otras instalaciones de depuración similares utilizadas para el tratamiento de aguas residuales (MAPAMA, 1990).
- Lodos digeridos. Los lodos digeridos son el resultado de la digestión anaerobia de los lodos obtenidos a la salida de la depuradora. Tiene una porción de materia orgánica de entre el 45-60% (Lenntech, 2018).

A pesar de que casi todos los productos suelen contener metales pesados, compuestos orgánicos pobremente biodegradables y organismos potencialmente patógenos (virus, bacterias, etc.), estos productos descritos anteriormente son ricos en nutrientes como nitrógeno y fósforo y contienen materia orgánica que es útil cuando los suelos se agotan o están sujetos a erosión. La materia orgánica y estos nutrientes son los elementos principales que hacen que la aplicación de los productos en la tierra sea un fertilizante o una enmienda orgánica del suelo (Comisión Europea, 2018b).

1.2. Gestión de los residuos orgánicos en Cantabria

La recogida selectiva es la recogida en la que un flujo de residuos se mantiene por separado, según su tipo y naturaleza, para facilitar un tratamiento específico. Es la *Directiva 2008/98/CE sobre residuos* la que estipula que el compost y el digestato deben provenir de la recogida selectiva (Parlamento y Consejo de la UE, 2008).

Los residuos orgánicos municipales generados en Cantabria son separados de la fracción inorgánica presente en la fracción resto y posteriormente son compostados en la instalación de tratamiento mecánico-biológico de la región.

La aplicación agrícola del producto resultante conlleva ciertos riesgos ambientales asociados a la transferencia de metales pesados y contaminantes orgánicos al suelo (Comisión Europea, 2018b).

La Directiva 2008/98/CE, que se transpuso a la Ley Española 22/2011 sobre residuos y suelos contaminados, establece una distinción entre el material bio-estabilizado procedente de la fracción resto de los residuos y el compost generado a partir de los residuos orgánicos recogidos selectivamente; el primero no se puede aplicar directamente al suelo con fines agrícolas.

Sin embargo, a los gestores de residuos cántabros se les concedió una autorización para continuar con esta práctica. Su vencimiento en 2018 plantea el problema, que hasta ahora no ha sido resuelto, de cómo gestionar los residuos orgánicos municipales (Cobo y cols., 2018).

A pesar de no conocer la futura gestión que se le dará a los residuos orgánicos municipales, lo que sí se conoce es la gestión del estiércol y de los lodos.

La gestión que hoy en día se le está dando al estiércol en Cantabria es un uso directo como fertilizante (Muñoz, 2015). El criterio que restringe la cantidad máxima de estiércol que se puede aplicar al suelo es su contenido en nitrógeno, de acuerdo con la Directiva 91/676/CE. Esta Directiva ha sido transpuesta a la normativa española por el Real Decreto 261/1996, de 16 de febrero, sobre protección de las aguas contra la contaminación producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias (MAPAMA, 2018c).

En cuanto a los lodos, desde el año 2008 la cantidad de lodos producida ha descendido ligeramente. Esto se debe a una mejora en la gestión de la depuradora, mediante medidas como el aumento de sequedad o el aumento en la cantidad de fangos digeridos; lo que conlleva una menor cantidad de lodos que deben ser gestionados. Esto ha provocado una progresiva reducción de la deposición en vertedero, hasta que en el año 2014 casi un 98,7% se destinaba a agricultura. Por lo tanto, se ha alcanzado el 95% que proponía como objetivo el Plan Sectorial de residuos Especiales (Punto focal de residuos de Cantabria, 2018). La Directiva 86/287/CE establece que la aplicación agrícola de los lodos estará limitada por la concentración de metales pesados; el Real Decreto 310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario es la adaptación de dicha Directiva en el marco normativo español (MAPAMA, 1990).

Los principales cultivos forrajeros más extendidos en la región son el maíz y el trigo (4.448 y 652 hectáreas respectivamente) (MAPAMA, 2018b). Por lo tanto, en este trabajo se ha asumido la hipótesis de que los productos que potencialmente podrían recuperarse de los residuos orgánicos se destinan a la fertilización de la superficie cultivada en Cantabria con estos cereales.

El presente trabajo nace por tanto, de la necesidad de crear un modelo que permita que los residuos orgánicos municipales, los lodos y el estiércol generados en la comunidad de Cantabria no sean desechados, sino que se utilicen como fuente fertilizante en nitrógeno para el cultivo del maíz y del trigo sembrado en la comunidad autónoma. De este modo, se evitaría en cierta medida el uso de fertilizantes comerciales. Con ello, la gestión de los residuos orgánicos municipales, las aguas residuales y el estiércol engazarían con los 3 principios fundamentales de la economía circular.

1.3. Objetivos

Para la realización de este trabajo, es importante recordar que, se hablará en términos de economía circular para la utilización de residuos orgánicos como fertilizante en agricultura debido a su alto contenido en nitrógeno.

El objetivo principal de este trabajo es optimizar los flujos de N contenido en los residuos orgánicos generados en Cantabria de acuerdo a las siguientes funciones objetivo:

- Minimizar los lixiviados del sistema.
- Minimizar los costes de producción.
- Minimizar la cantidad de fertilizante comercial necesario.

Para alcanzar este objetivo, se ha dividido este objetivo principal en objetivos específicos:

- Cuantificación de los actuales flujos residuales de N y el consumo de fertilizantes nitrogenados en Cantabria.
- Simulación de la producción de maíz y trigo mediante la aplicación agrícola de los productos recuperados a partir de los residuos orgánicos y de fertilizantes inorgánicos, con el fin de cuantificar tanto las cantidades de producto necesarias para fertilizar el área disponible en Cantabria para estos cultivos, como los lixiviados de N generados.
- Formulación de un problema de programación matemática cuya solución indique la cantidad de cada producto recuperado y de fertilizante inorgánico que se debe destinar a la fertilización de cada cultivo estudiado para minimizar el valor de las funciones objetivo seleccionadas.

Enfoques similares a los de este trabajo se han estudiado con anterioridad ((Klinglmair y cols., 2017) y (Álvarez y cols., 2018)), pero ambos se han realizado para flujos de fósforo. Hasta ahora no se han realizado trabajos centrados en los flujos de nitrógeno, siendo por lo tanto esta la principal novedad, junto con su aplicación a la Comunidad Autónoma de Cantabria.

2. METODOLOGÍA

En primer lugar se llevó a cabo una búsqueda bibliográfica que consistió en la revisión de artículos o informes publicados en páginas web que tengan relación con la economía circular y más concretamente con la economía circular de nutrientes. A continuación la búsqueda se centró en la obtención de los datos necesarios para elaborar el modelo del sistema estudiado.

El modelo propuesto para este proyecto se desarrolla con los softwares DNDC (Gilhespy y cols., 2014) y GAMS (GAMS Corporation, 2018). La figura 1 proporciona una visión general de la secuencia de pasos metodológicos seguidos.



Figura 1. Pasos metodológicos en la elaboración del trabajo.

Con el software DNDC se simuló el crecimiento de maíz y trigo con la aplicación de distintos productos fertilizantes. Este programa gratuito permitió determinar la cantidad de cada producto requerida por cada cereal y los lixiviados de nitrógeno asociados. Estos datos se exportaron a GAMS, donde se elaboró un modelo del sistema para su posterior optimización.

2.1. DNDC

El software utilizado para el crecimiento de maíz y trigo está basado en el modelo de desnitrificación-descomposición (DNDC). Es un modelo que simula los ciclos biogeoquímicos del carbono (C) y nitrógeno (N) en ecosistemas agrícolas (Gilhespy y cols., 2014).

El primer paso para proceder a la simulación es introducir los datos del clima de la región (precipitaciones y temperaturas) al software. Después, para cada producto se debe conocer la relación C/N y el porcentaje de nitrógeno en forma de nitrógeno orgánico, amonio y nitrato. En el Anexo se pueden encontrar los datos necesarios y sus respectivas referencias. Conocidos estos datos y las fechas de plantación, arado y recogida de los cultivos, se hacen una serie de simulaciones en el software dentro del rango de 1-1000 kg N/ha en forma de nitrógeno orgánico. Las simulaciones han sido diseñadas para el transcurso de un año.

2.2. GAMS

GAMS (General Algebraic Modeling System) es uno de los principales programas de optimización utilizados en el ámbito de la ingeniería de procesos químicos, aunque su aplicación es frecuente en otros muchos ámbitos.

Una vez finalizadas las simulaciones en el software DNDC, hacer un modelo matemático de programación lineal fue el siguiente paso. Dicho modelo se basó en los balances de materia del sistema bajo estudio, el cual se describe posteriormente.

Los resultados que debe ofrecer la solución del problema son:

- Cantidad de cada producto que debe ser aplicado a cada cultivo.
- Cantidad de fertilizante comercial que debe ser aplicado a cada cultivo.
- Superficie fertilizada mediante los productos orgánicos.
- Superficie fertilizada por el fertilizante comercial.
- Valores finales de cada función objetivo.

Una vez obtenidos todos los resultados, el siguiente paso es la representación gráfica de los datos y su interpretación.

3. CUANTIFICACIÓN DE LOS PRINCIPALES FLUJOS DE NITRÓGENO EN CANTABRIA

Para la resolución del modelo matemático es fundamental conocer los flujos residuales de nitrógeno disponibles en Cantabria. Esta cuantificación forma parte de la búsqueda bibliográfica mencionada previamente, por lo que en la tabla 1 aparecen las cantidades anuales de residuos orgánicos municipales, lodos y estiércol generado en Cantabria durante un año, así como la cantidad de nitrógeno contenido en los mismos, estimada a partir de su composición.

Tabla 1. Cantidades de residuos generados anualmente en Cantabria y su contenido en nitrógeno.

Residuos	Cantidades [ton/año]	Referencia	Contenido en N [ton/año]	Referencia ¹
Residuos orgánicos municipales	83.544,44	(Cobo y cols., 2018)	756,08	(Cobo y cols., 2018)
Lodos	15.242,00	(Gobierno de Cantabria, 2017)	23,78	(Yoshida y cols., 2015)
Estiércol	3.891.787,00	(Muñoz, 2015)	69.351,64	(Grigatti y cols., 2007)

¹Fracción de nitrógeno en los residuos

Las 15.242 toneladas de lodos generadas en Cantabria anualmente se corresponden con la cantidad de lodos que se gestionan públicamente por la empresa MARE; pero también existen 233 toneladas de lodos gestionadas por empresas privadas (Gobierno de Cantabria, 2017). Para la realización de este proyecto, únicamente se ha tenido en cuenta la cantidad de lodos gestionados públicamente.

Además, es importante conocer las cantidades de fertilizantes comerciales nitrogenados que se utilizan en la región, ya que uno de los objetivos de este proyecto es minimizar la cantidad de dichos fertilizantes. De esta forma, y según la Asociación Nacional de Fabricantes de Fertilizantes, se utilizan en Cantabria 2.185 toneladas de nitrógeno anualmente en forma de abonos nitrogenados (ANFFE, 2018).

4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En la figura 2 se indica el tipo de residuo del que procede cada producto cuya aplicación agrícola se estudia en este trabajo, así como su proceso de obtención. Si se produce una recogida selectiva de los residuos orgánicos municipales se puede producir compost por medio de una etapa de compostaje y también se puede producir el digestato por medio de una digestión anaerobia. Sin embargo, si se hace una etapa de compostaje a la fracción resto de los residuos orgánicos municipales, se producirá material bio-estabilizado. Por otra parte, los lodos son el producto directo que sale de la estación depuradora de aguas residuales, pero sí a esos lodos se les hace una digestión anaerobia es lo que se conoce como lodos digeridos. Finalmente, el estiércol no pasa por ninguna etapa de tratamiento antes de ser usado como fertilizante.

Es importante destacar que el esquema general presentado en la figura 2 no se corresponde con el sistema final que se va a analizar, si no que pretende ser de ayuda para explicar los objetivos del presente trabajo. Los límites del sistema comprenden los procesos de producción de maíz y trigo mediante la aplicación de los seis tipos de fertilizantes orgánicos y nitrato de amonio. El proceso de recuperación de los fertilizantes orgánicos y la producción de fertilizantes inorgánicos se encuentran fuera de los límites del sistema estudiado, de acuerdo a la figura 2.

El nitrato de amonio que aparece en la figura 2 con líneas discontinuas es uno de los fertilizantes comerciales más habituales en la agricultura (Red de Especialistas en Agricultura, 2018).

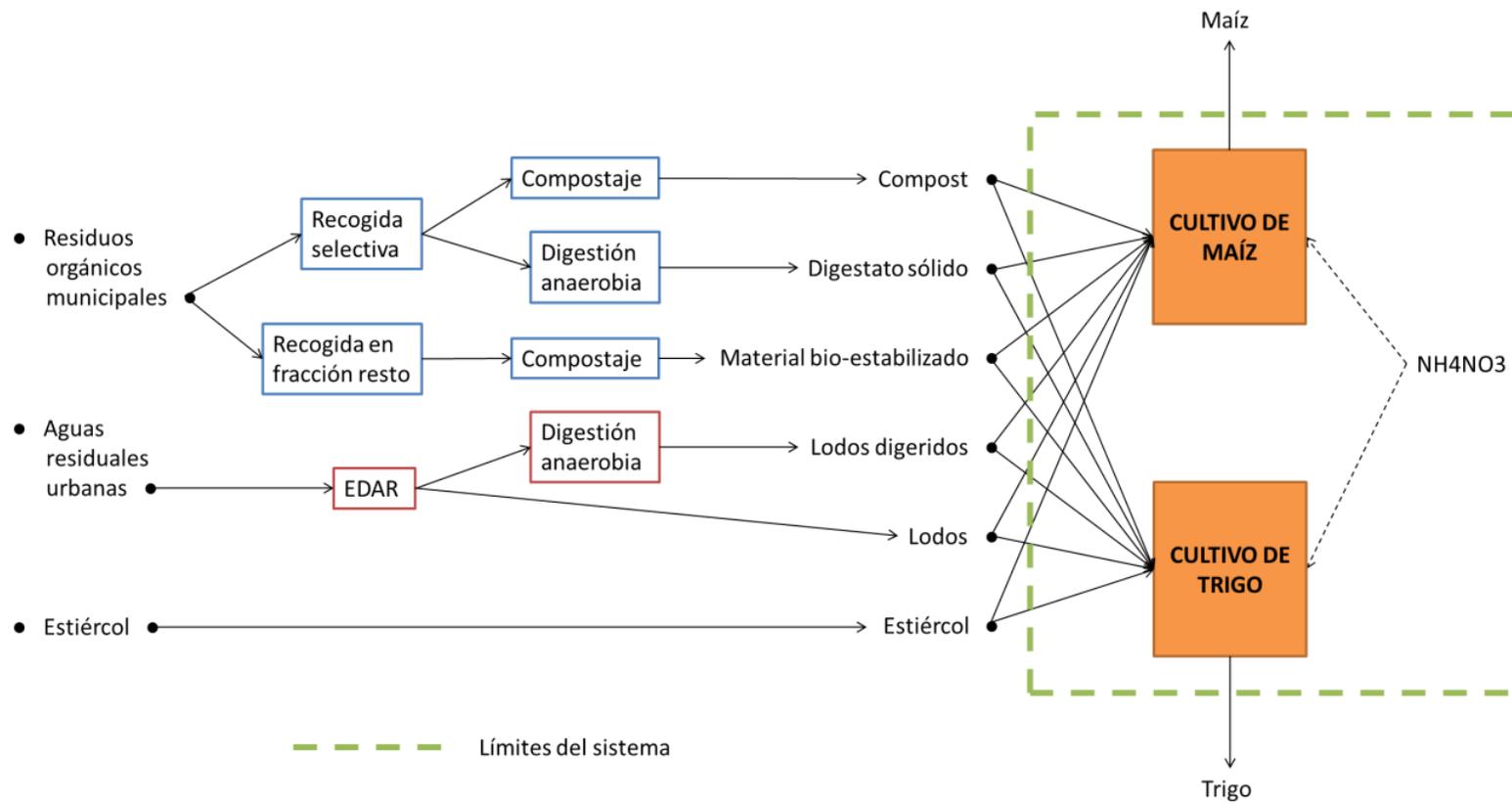


Figura 2. Límites del sistema.

5. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Antes de plantear el problema matemático, se presentarán todos los parámetros necesarios para describir las ecuaciones y restricciones del modelo.

Para realizar las simulaciones que permiten determinar la cantidad de nitrógeno absorbido por cada cultivo y la que lixivia, hay que tener en cuenta las fechas idóneas en las que crecen el maíz y el trigo. Dichos cereales serán los encargados de absorber el nitrógeno que se añade a la tierra en forma de fertilizante, es por eso, por lo que a continuación se describirá en detalle cada uno de los cultivos:

- Maíz. La época del año idónea para el sembrado del maíz es en primavera, por ello se ha escogido como fecha de referencia el 15 de abril. Su recogida se produce en torno a 120 - 150 días después del sembrado, por lo que se recogerá como fecha aproximada el 15 de septiembre (INNOVAGRI, 2018; MAYA, 2018; Planeta Huerto, 2018).
- Trigo. El trigo más cultivado en España es el trigo de invierno. Su plantación es en que se tomará como referencia el día 15 de octubre. La recogida tiene lugar seis meses después, así que como fecha de recogida aproximada se usará el 15 de abril del año siguiente (Agropecuaria, 2018; Agroterra, 2018).

Otro aspecto que ha de conocerse es la fecha de arado. Está tendrá lugar 15 días antes de la fecha de plantación. Es decir, si el maíz y el trigo se plantan el 15 de abril y el 15 de octubre, las fechas de arado serán el 1 de abril y el 1 de octubre respectivamente.

En Cantabria, a fecha de 2017, la superficie destinada al cultivo del maíz y del trigo es de 4448 y 652 hectáreas respectivamente (MAPAMA, 2018a).

Otro de los parámetros que hay que tener en cuenta es la cantidad máxima que podría existir de cada producto recuperado a partir de los residuos orgánicos generados. Para calcular estas cantidades hay que tener en cuenta las eficiencias de cada proceso de obtención de producto a partir de los residuos orgánicos, es decir, cuántos kilogramos de producto se consiguen por cada tonelada de residuo. Las eficiencias de cada producto son las que aparecen en la tabla 2. Las cantidades anuales máximas de cada

producto son el resultado de multiplicar las cantidades de producto por la eficiencia. Dichas cantidades son las que se encuentran en la tabla 3.

Tabla 2. Eficiencias de los productos.

Productos	Eficiencias [kg producto/ton RO] (Cobo y cols., 2018)
Compost	327,26
Digestato	654,08
Lodos digeridos	238,40
Material bio-estabilizado	348,99

Tabla 3. Cantidades máximas anuales por producto en Cantabria.

Productos	Cantidades [toneladas/año]
Compost	27.340,75
Estiércol	3.891.787,00
Digestato	54.644,75
Lodos	15.242,00
Lodos digeridos	3.633,69
Material bio-estabilizado	29.156,17

Para la formulación del modelo matemático, es necesario conocer la concentración de nitrógeno que posee cada producto. Estas concentraciones aparecen en la tabla 4.

Tabla 4. Concentración de nitrógeno de cada producto.

Productos	Concentración nitrógeno [g N/kg producto]	Referencia
Compost	7,61	(Cobo y cols., 2018)
Estiércol	17,82	(Grigatti y cols., 2007)
Digestato	4,48	(Cobo y cols., 2018)
Lodos	1,56	(Yoshida y cols., 2015)
Lodos digeridos	10,64	
Material bio-estabilizado	7,37	(Cobo y cols., 2018)

En tanto que una de las funciones objetivo del modelo matemático es minimizar los costes, otro de los aspectos fundamentales es conocer los costes de cada producto fertilizante, como se muestra en la tabla 5. Estos costes únicamente se corresponden con los costes de producción, excluyendo los costes de transporte.

Tabla 5. Costes de producción de cada producto.

Productos	Costes de producción [€/tonelada] (Cobo y cols., 2018)
Compost	36,30
Estiércol	1,98
Digestato	55,17
Lodos digeridos	60,76
Material bio-estabilizado	36,39

Se ha considerado que los costes asociados a la producción de lodos es 0 €/ton, puesto que las aguas residuales urbanas han de ser tratadas, tengan los lodos una aplicación agrícola o no. En cuanto al coste de la producción de estiércol, está asociado a su recogida.

De igual forma a los productos orgánicos, también es necesario indicar los parámetros necesarios para la simulación del nitrato de amonio. Por ello, el coste de producción del fertilizante comercial es de 175,00 €/ton (Argus Media Group, 2015).

El modelo matemático final es un problema de programación lineal que se resolvió mediante el solver CPLEX para minimizar las funciones objetivo. Además, está compuesto por diez ecuaciones que serán desarrolladas a continuación. La definición de las variables y parámetros empleados en las ecuaciones se encuentra en el apartado de nomenclatura.

Los subíndices que se encuentran en las diez ecuaciones siguientes, “*c*” y “*p*” se corresponden con los “sets” que se han creado en el modelo matemático. “*C*” se refiere a los cultivos, es decir, al maíz y al trigo. “*P*” corresponde con los productos fertilizantes, como lo son el compost, los lodos, el estiércol, etc.

$$Residuos_p = \sum_{c=1}^n \frac{x_{cp}}{eficiencias_p} \quad [Ecuación 1]$$

$$Residuos_{compost} + Residuos_{mat_bio} + Residuos_{digestato} = Cantidades_{RO} \quad [Ecuación 2]$$

$$Residuos_{lodos} + Residuos_{lodos_dig} = Cantidades_{lodos_totales} \quad [Ecuación 3]$$

$$Residuos_{estiércol} = Cantidades_{estiércol} \quad [Ecuación 4]$$

$$ha_{fert_orgánico}_{cp} = \frac{x_{cp}}{cantidades_ha_{cp}} \quad [Ecuación 5]$$

$$ha_{fert_nitrato}_c = \frac{x_{fert}_c}{cantidades_ha_fert_c} \quad [Ecuación 6]$$

$$ha_c = \left(\sum_{p=1}^m ha_{fert_orgánico}_{cp} \right) + ha_{fert_nitrato}_c \quad [Ecuación 7]$$

$$z1 = \sum_{c=1}^n \sum_{p=1}^m ha_fert_orgánico_{cp} * lix_{cp} + \sum_{c=1}^n ha_fert_nitrato_c * lix_{fertilizante_c} \quad [Ecuación 8]$$

$$z2 = \sum_{c=1}^n \sum_{p=1}^m \frac{x_{cp} * cost_p + x_{fert_c} * cost_{fert}}{1000} \quad [Ecuación 9]$$

$$z3 = \sum_{c=1}^n x_{fert_c} \quad [Ecuación 10]$$

Este modelo matemático está desarrollado para satisfacer las 3 funciones objetivo:

- Minimización de lixiviados (z1).
- Minimización de los costes de producción (z2).
- Minimización de la cantidad de fertilizante comercial (z3).

El problema se resolvió individualmente para cada una de las tres funciones objetivo en cada uno de los escenarios planteados. Las ecuaciones descritas anteriormente son las que se corresponden al escenario base. El escenario base es uno de los 3 estudiados en este proyecto. La definición de cada uno de los 3 escenarios se recoge a continuación:

- Escenario base. Toda la materia orgánica está disponible.
- Escenario 1. 50% recogida selectiva. El 50% de los residuos orgánicos pueden convertirse en compost o digestato, pero no se produce material bio-estabilizado, ya que de acuerdo con la directiva 2008/98, éste no puede tener aplicación agrícola. Se supone que no hay estiércol disponible.
- Escenario 2. 0% recogida selectiva. El 100% de los residuos orgánicos puede convertirse en material bio-estabilizado, pero no en la forma de compost ni digestato, ya que estos deben proceder de la recogida selectiva. También se supone que no hay estiércol disponible.

Los escenarios 1 y 2, suponen la adición de 3 restricciones más en cada caso al modelo matemático.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Simulación de los procesos de producción de maíz y trigo

La información, que el software DNDC requiere, es introducida en el modelo matemático como parámetros: 1) el nitrógeno absorbido por el cultivo y 2) la cantidad de nitrógeno que lixivia.

Para obtener estos resultados, se simuló la producción de maíz y trigo aplicando diferentes cantidades de producto recuperado, con un contenido en nitrógeno de entre 0 y 1.000 kg N/ha.

Las figuras 3 y 4 muestran la cantidad de nitrógeno que absorbe cada cultivo en función de la cantidad de N aplicado.

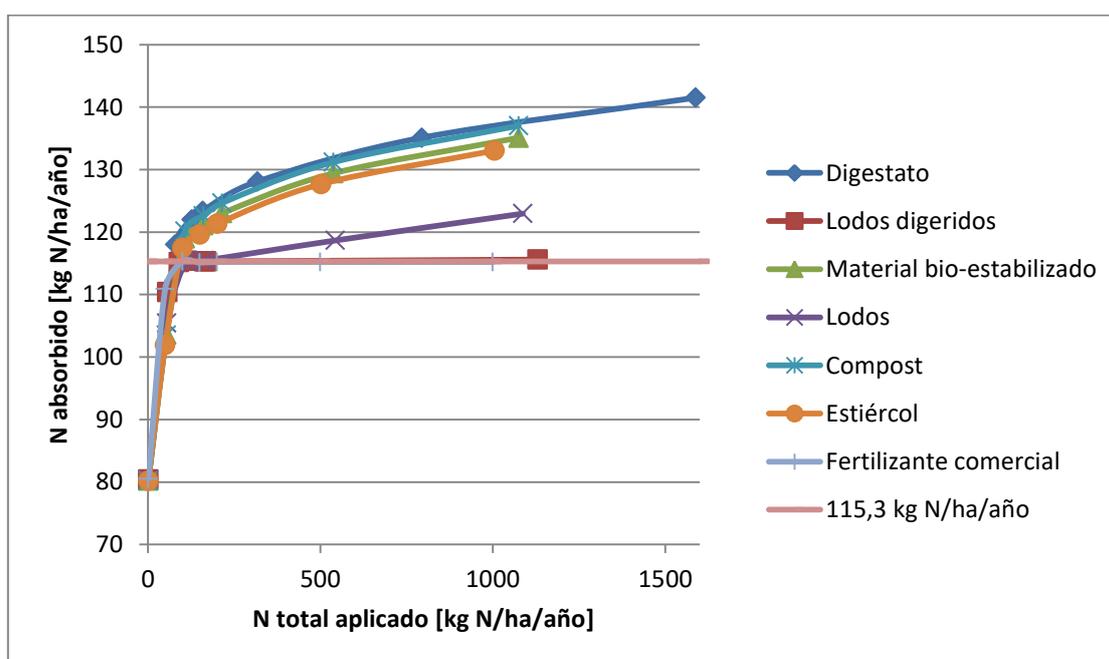


Figura 3. Nitrógeno total absorbido por el maíz en función del nitrógeno total aplicado al suelo.

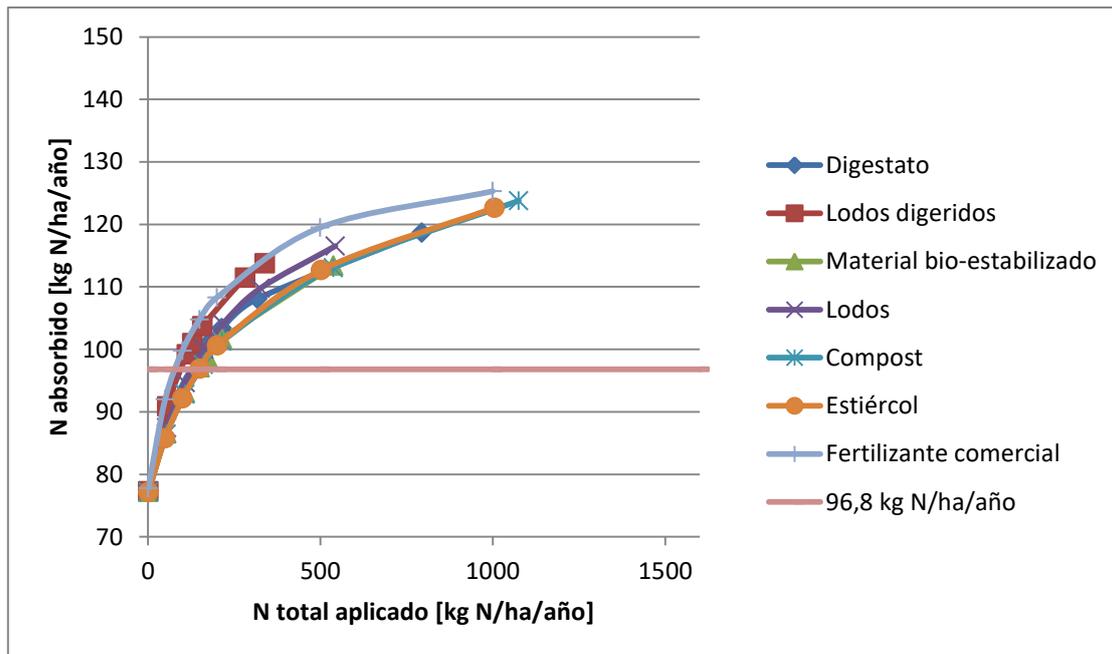


Figura 4. Nitrógeno absorbido por el trigo en función del nitrógeno total aplicado al suelo.

En las figuras 5 y 6 aparecen representados los lixiviados de nitrógeno asociados a la aplicación de los productos y el fertilizante comercial en función del nitrógeno total aplicado al suelo para el cultivo del maíz y del trigo respectivamente.

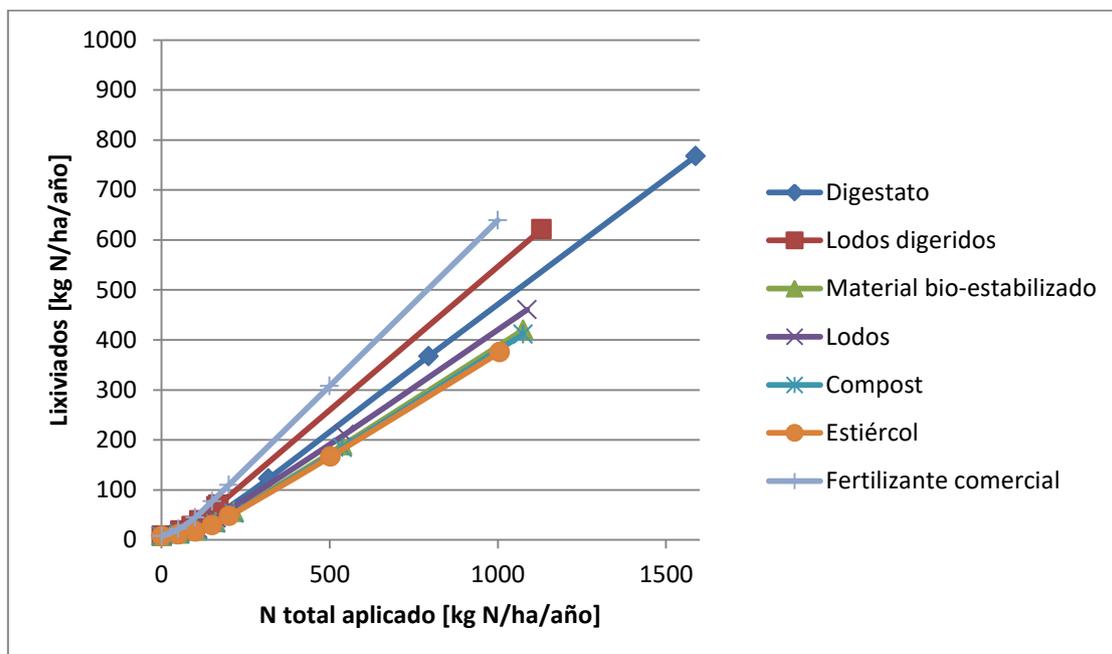


Figura 5. Lixiviados del maíz en función del nitrógeno total aplicado al suelo.

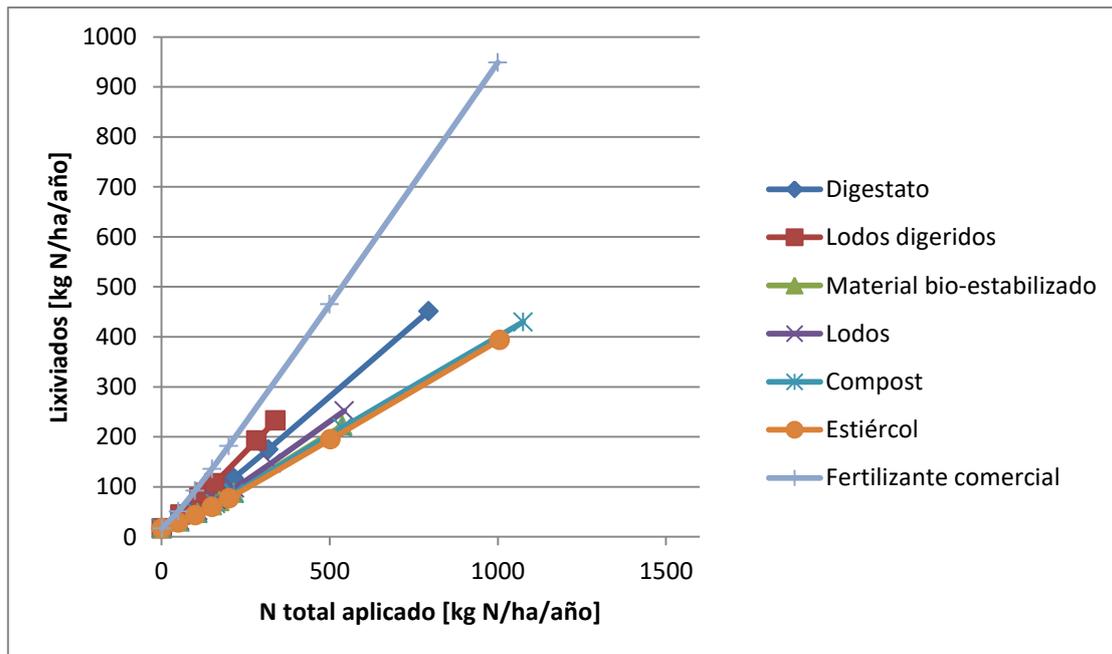


Figura 6. Lixiviados del trigo en función del nitrógeno total aplicado al suelo.

Los resultados presentados en las figuras 3-6 demuestran que el maíz absorbe nitrógeno de forma más eficiente que el trigo.

Al comparar las figuras 3 y 4 se puede deducir que el factor que limita el crecimiento del maíz es el ratio C/N de los productos; el límite de N que la planta puede absorber cuando se aplica el producto con el menor ratio C/N (lodos digeridos), es el mismo que cuando se aplica el nitrato de amonio (115,3 kg N/ha/año).

Por el contrario, el crecimiento del trigo está limitado por la cantidad de nitrógeno inorgánico disponible en los productos; por tanto, en este caso, el rendimiento obtenido con el fertilizante inorgánico es el mayor de los productos estudiados.

Se tomó la máxima cantidad de nitrógeno que el maíz puede absorber a partir de la aplicación del producto menos eficiente (115,3 kg N/ha/año) como referencia para estimar las cantidades de producto necesarias para el cultivo del maíz. Mediante simulaciones sucesivas, se estimaron tanto las cantidades de nitrógeno que es necesario aplicar, como de lixiviados generados, para que el maíz absorba a partir de la aplicación de cada producto 115,3 kg N/ha/año, lo cual se corresponde con una producción anual de 10,1 ton/ha de maíz.

La figura 3 muestra que para que el maíz incorpore 115,3 kg N/ha/año sería necesario aplicar una cantidad de nitrógeno muy elevada, lo cual, además de conducir a un consumo ineficiente de recursos, incrementaría los lixiviados generados y los problemas de eutrofización. Por tanto, se tomó la eficiencia de absorción del nitrógeno (definida como el cociente entre la cantidad de nitrógeno absorbida y la cantidad de nitrógeno aplicada) como criterio para determinar la cantidad de N que se debe aplicar. Se estableció que la eficiencia promedio de absorción del N en el trigo debe ser la misma que la máxima eficiencia de absorción de N del maíz en el caso de aplicación de fertilizantes y lodos digeridos, estimada en una eficiencia del 70%. Simulaciones sucesivas del crecimiento del trigo en DNDC permitieron estimar que dicha eficiencia se consigue cuando el trigo absorbe 96,8 kg N/ha/año, lo que equivale a 6,3 ton/ha/año de trigo.

Una vez elegidos los valores de referencia sobre los que hacer la optimización (115,3 y 96,8 kg N/ha/año absorbidos para maíz y trigo), en la tabla 6 aparecen las cantidades correspondientes del N total aplicado al suelo y los lixiviados de cada producto orgánico y del fertilizante comercial.

Tabla 6. Nitrógeno total aplicado al suelo y lixiviados de los productos y del fertilizante comercial.

Producto	Maíz		Trigo	
	N total aplicado [kg N/ha]	Lixiviados de N [kg N/ha]	N total aplicado [kg N/ha]	Lixiviados de N [kg N/ha]
Compost	82,15	14,85	151,18	62,54
Digestato	74,70	18,80	127,10	72,00
Material bio-estabilizado	69,90	16,50	139,80	59,40
Lodos	92,39	17,74	128,53	60,16
Lodos digeridos	163,80	66,70	90,40	64,30
Estiércol	82,82	14,07	149,52	59,29
Nitrato de amonio	100,00	44,60	77,50	73,20

Hay que tener en cuenta, que el balance de materia que hace el software DNDC es el siguiente: $N_{\text{aplicado}} + N_{\text{suelo}} = N_{\text{almacenado}} + N_{\text{cultivo}} + N_{\text{lixiviados}}$. A modo de ejemplo, la figura 7 indica cómo ofrece DNDC los resultados en el caso de utilizar fertilizante comercial y que se absorba 115,3 kg N/ha.

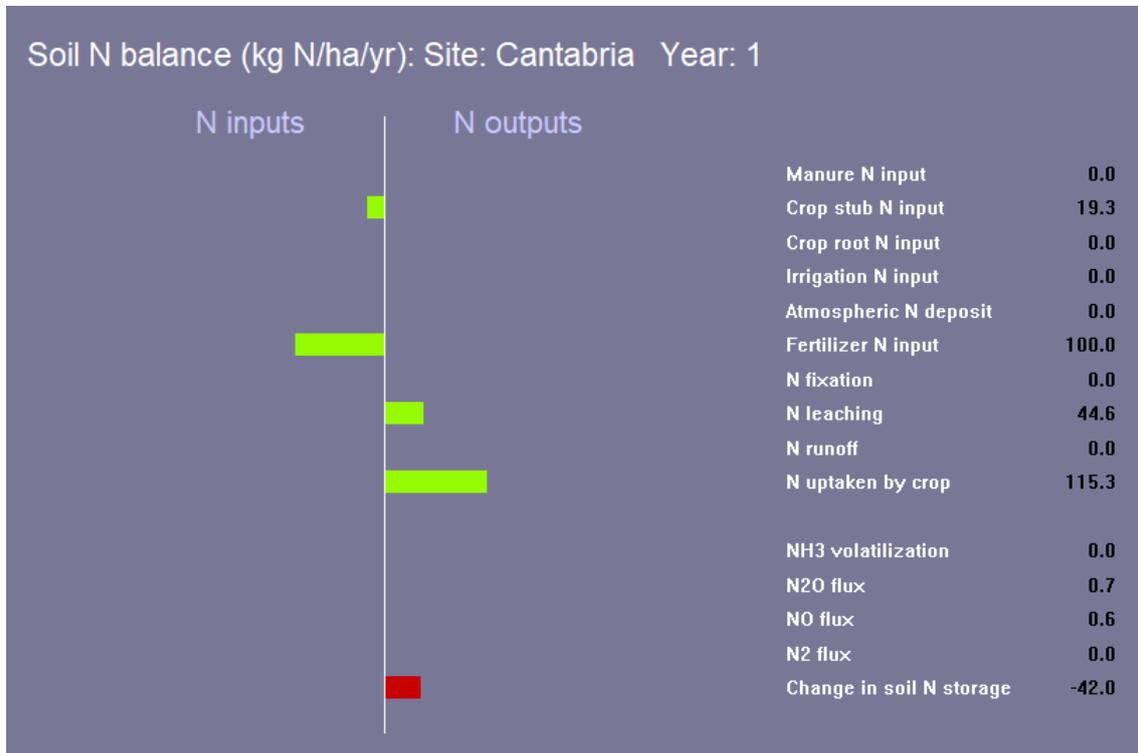


Figura 7. Ejemplo de los resultados aportados por el software DNDC respecto al balance de N.

6.2. Optimización de acuerdo a las funciones objetivo

Los resultados obtenidos de la simulación, se introdujeron como valores al modelo matemático de GAMS. Los resultados que proporciona GAMS serían el valor óptimo de la función objetivo que se utilice en cada caso.

Existen 3 funciones objetivo y 3 posibles escenarios, de manera que se hará una representación gráfica de las soluciones que ofrece la minimización de cada función objetivo para cada escenario.

Las figuras 8, 9 y 10 muestran las cantidades necesarias de cada producto para optimizar el modelo matemático en cada uno de los 3 escenarios considerados: escenario base, escenario 1 y escenario 2. La figura 8 se corresponde con el escenario

base (en el que todos los residuos orgánicos generados en Cantabria están disponibles para la fertilización del suelo), la figura 9 con el escenario 1 y, finalmente, la figura 10 con el escenario 2.

El rectángulo de color azul representa la minimización de lixiviados; el de color rojo la minimización de costes y el de color verde la minimización de fertilizante comercial. Por tanto, cada color hace referencia a una única función objetivo para una visualización más sencilla de los resultados.

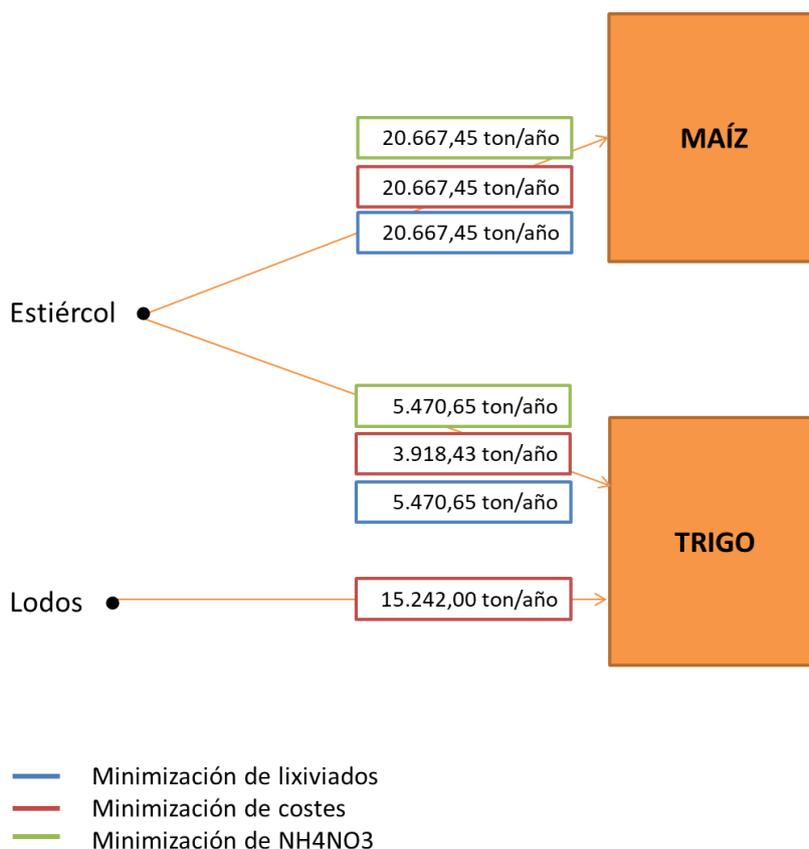


Figura 8. Cantidades de producto necesarias para optimizar el escenario base.

Analizando la figura 8, se observa que la cantidad de estiércol disponible en Cantabria es suficiente para cubrir las necesidades de nitrógeno de los dos cultivos. De hecho, para minimizar los lixiviados (color azul) únicamente es necesario el 0,7% del estiércol total generado en Cantabria.

Para minimizar los costes (color rojo) se deben utilizar estiércol y lodos. Como muestra la tabla 5, la aplicación de los lodos de depuradora es la mejor alternativa desde el punto de vista económico; sin embargo, la cantidad de lodos generados en Cantabria no es suficiente para cubrir las necesidades de ninguno de los cultivos; se deben combinar con el siguiente producto más barato, el estiércol, que no es necesario tratar y solo lleva asociados los costes de gestión.

Para minimizar la cantidad de nitrato de amonio (color verde) los resultados indican que únicamente es necesario utilizar estiércol. No obstante, como se ha comprobado, para minimizar esta función objetivo existen múltiples soluciones óptimas, ya que, con múltiples combinaciones de productos se podría eliminar el empleo de fertilizantes industriales.

Los flujos de productos que se obtienen al minimizar los lixiviados y el nitrato de amonio son exactamente los mismos.

Para cultivar el maíz es suficiente con utilizar estiércol para optimizar las 3 funciones objetivo.

Para cultivar el trigo minimizando lixiviados se necesita únicamente estiércol, al igual que ocurre si se minimiza el fertilizante comercial. Minimizando los costes se necesita estiércol y lodos.

Evidentemente, la recolección de todo el estiércol generado en Cantabria es una tarea difícil de llevar a la práctica, ya que la ganadería de la región se basa en pequeñas explotaciones. Por tanto, en los escenarios 1 y 2 se asumió que el estiércol no estaba disponible para el cultivo de maíz y trigo.

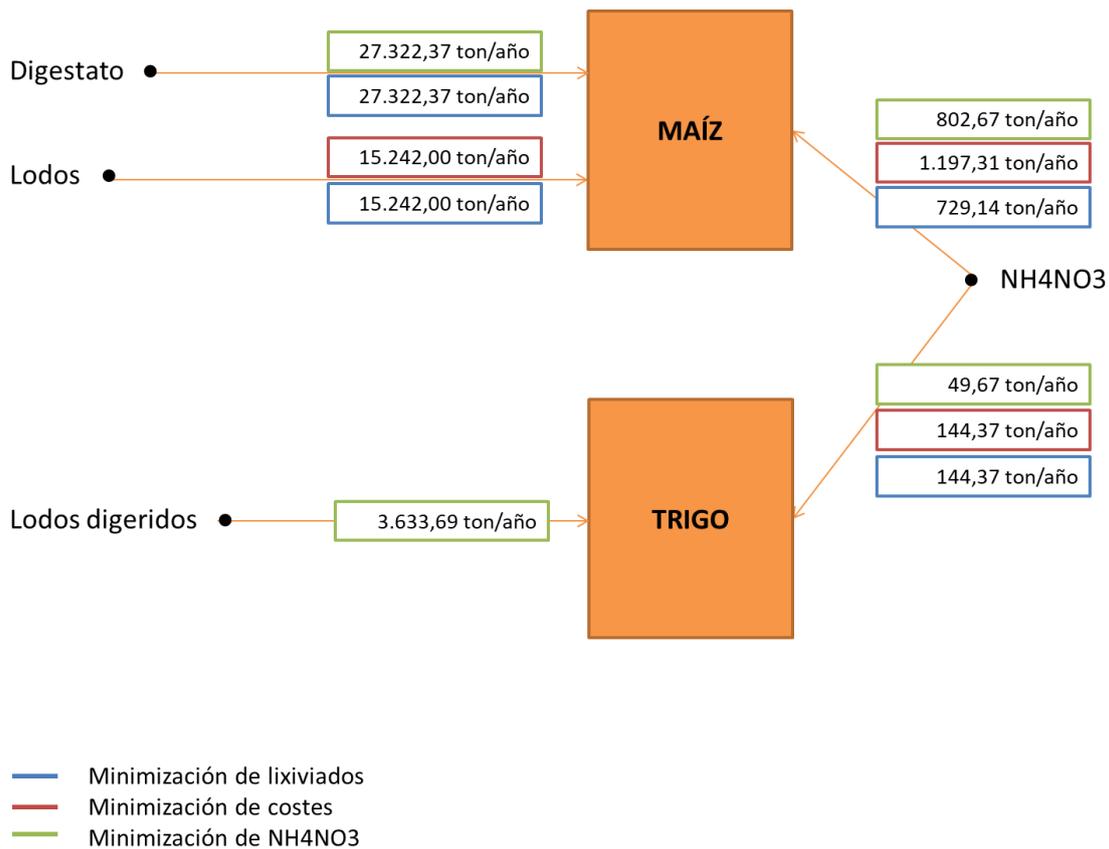


Figura 9. Cantidades de producto necesarias para optimizar el escenario 1.

Analizando la figura 9, se observa que el mayor cambio con respecto al escenario base recae en que en el escenario 1 sí que es necesario el fertilizante comercial para optimizar las 3 funciones objetivo. Por otra parte, este escenario hace uso de la digestión anaerobia, tanto de los residuos procedentes de la recogida selectiva, como de los lodos de depuradora. Esto se debe a que, como se observa en la Tabla A2 del Anexo, los productos digeridos de forma anaeróbica son productos con mayor proporción de nitrógeno inorgánico (fácil de asimilar por las plantas), y por tanto, pueden sustituir en mayor medida a los fertilizantes comerciales.

A pesar de que la producción de una tonelada de fertilizante es más cara que el tratamiento de los residuos orgánicos, puesto que las plantas absorben el nitrógeno inorgánico de forma más eficiente, y por tanto se requiere una cantidad inferior a la de fertilizantes orgánicos, los resultados demuestran que la aplicación de fertilizante es la segunda opción más barata después de la aplicación de los lodos de depuradora.

Además del fertilizante inorgánico, si se minimizan lixiviados se necesita digestato y lodos; si se minimizan costes sólo se necesitan lodos; y si se desea minimizar el nitrato de amonio se necesita digestato y lodos digeridos.

En este caso, para el cultivo del maíz, son los lodos, el digestato y el nitrato de amonio los que aplicados al suelo producen la mejor optimización de los resultados.

En cambio, para cultivar trigo, utilizando el fertilizante comercial y/o lodos digeridos se pueden minimizar las 3 funciones objetivo.

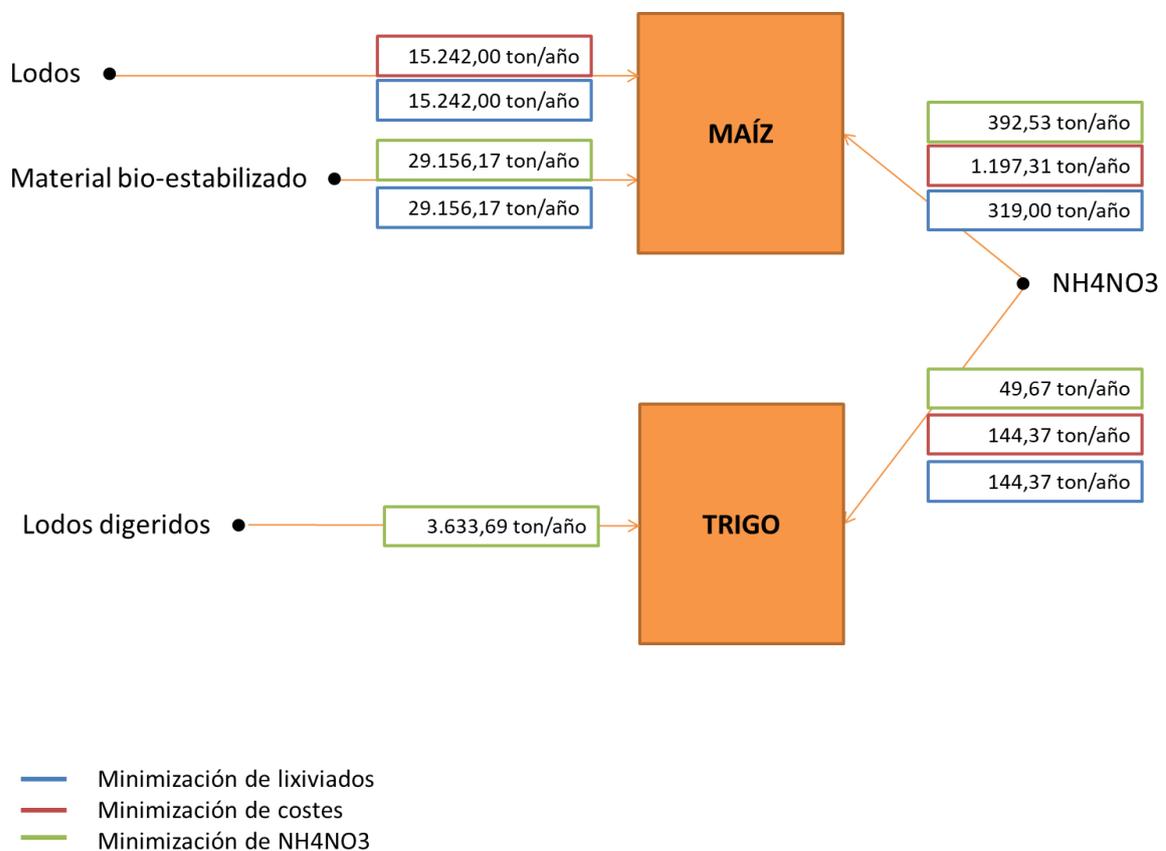


Figura 10. Cantidades de producto necesarias para optimizar el escenario 2.

De igual forma que en la figura 9, en la figura 10 también se necesita nitrato de amonio para optimizar las 3 funciones objetivos. Las restricciones del escenario 2 hacen que sea imposible la digestión anaeróbica de los residuos municipales; éstos únicamente

pueden producir material bio-estabilizado, que se aplica a la producción de maíz para minimizar el consumo de fertilizantes inorgánicos.

Para minimizar los lixiviados se deben utilizar lodos, material bio-estabilizado y nitrato de amonio.

Para minimizar los costes la mejor alternativa es utilizar lodos y fertilizante comercial. Como la cantidad de lodos generada en Cantabria no es suficiente para cubrir las necesidades de los cultivos, la segunda opción más barata vuelve a ser el nitrato de amonio.

Para minimizar la cantidad de nitrato de amonio, los resultados muestran que se pueden minimizar las 3 funciones objetivos utilizando el propio nitrato de amonio, lodos digeridos y material bio-estabilizado.

En este caso, para el cultivo del maíz se consiguen los mejores resultados utilizando lodos, material bio-estabilizado y fertilizante comercial.

Finalmente, para el cultivo del trigo únicamente con nitrato de amonio y/o lodos digeridos es suficiente para la minimización de las funciones objetivo planteadas.

Es necesario señalar que, para el cultivo del trigo, el escenario 1 y el escenario 2 son idénticos.

Cabe destacar, que con el escenario 2 se consiguen mejores resultados que con el escenario 1, a pesar de que las políticas europeas fomentan la implantación de la recogida selectiva (Parlamento y Consejo de la UE, 2008). Esto se debe a que la producción del digestato es más cara que la producción de material bio-estabilizado. Por otra parte, en el escenario 1 el consumo de fertilizantes inorgánicos es mayor que en el escenario 2, puesto que la tasa de recogida selectiva del 50% solo permite la digestión anaerobia del 50% de los residuos orgánicos municipales, mientras que en el escenario 2 el 100% de los residuos orgánicos municipales pueden transformarse en material bio-estabilizado.

En la tabla 7 aparecen los valores óptimos de las funciones objetivos de todos los escenarios.

Tabla 7. Valores de las funciones objetivos en todos los escenarios.

Función objetivo	Valores	Escenario base	Escenario 1	Escenario 2
Lixiviados	Función lixiviados [kg N/año]	101.240,44	196.918,35	152.811,76
	Función coste [€/año]	51.753,45	1.660.240,06	1.142.083,54
	Función nitrato de amonio [kg NH4NO3/año]	0,00	873.512,59	463.373,49
Costes	Función lixiviados [kg N/año]	101.401,39	239.194,50	239.194,50
	Función coste [€/año]	48.680,05	234.794,00	234.794,00
	Función nitrato de amonio [kg NH4NO3/año]	0,00	1.341.680,02	1.341.680,02
NH4NO3	Función lixiviados [kg N/año]	101.240,44	200.024,67	155.918,08
	Función coste [€/año]	51.753,45	1.877.318,25	1.359.161,73
	Función nitrato de amonio [kg NH4NO3/año]	0,00	852.341,27	442.202,18

De la tabla anterior, se puede observar que donde menos lixiviados de N se producen es en el escenario base minimizando tanto lixiviados como fertilizante inorgánico (101.240,44 kg N/año). De igual forma, el coste más barato se consigue minimizando los costes del escenario base (48.680,05 €/año). El caso en el que no se necesita

fertilizante inorgánico también es en el escenario base, ya que con los residuos orgánicos disponibles es suficiente para fertilizar todo el cultivo del maíz y del trigo.

La Directiva 91/676/CEE relativa a la protección de las aguas contra la contaminación causada por nitratos procedentes de fuentes agrícolas, establece que no se pueden aplicar más de 170 kg N/ha de estiércol (Comisión Europea, 1991). Este umbral no se supera en ningún caso.

Para concluir con el apartado de resultados, se normalizaron los datos obtenidos en la tabla anterior (dividiendo el valor de cada función objetivo entre el máximo valor de dicha función objetivo en cualquiera de los tres escenarios).

Así, las figuras 11, 12 y 13 muestran la normalización de resultados en el escenario base, escenario 1 y escenario 2 respectivamente. La figura 11 contiene dos imágenes; la imagen de la izquierda se corresponde con la normalización de los resultados, mientras que la imagen de la derecha es una ampliación de la imagen anterior para poder visualizar bien el eje del coste.

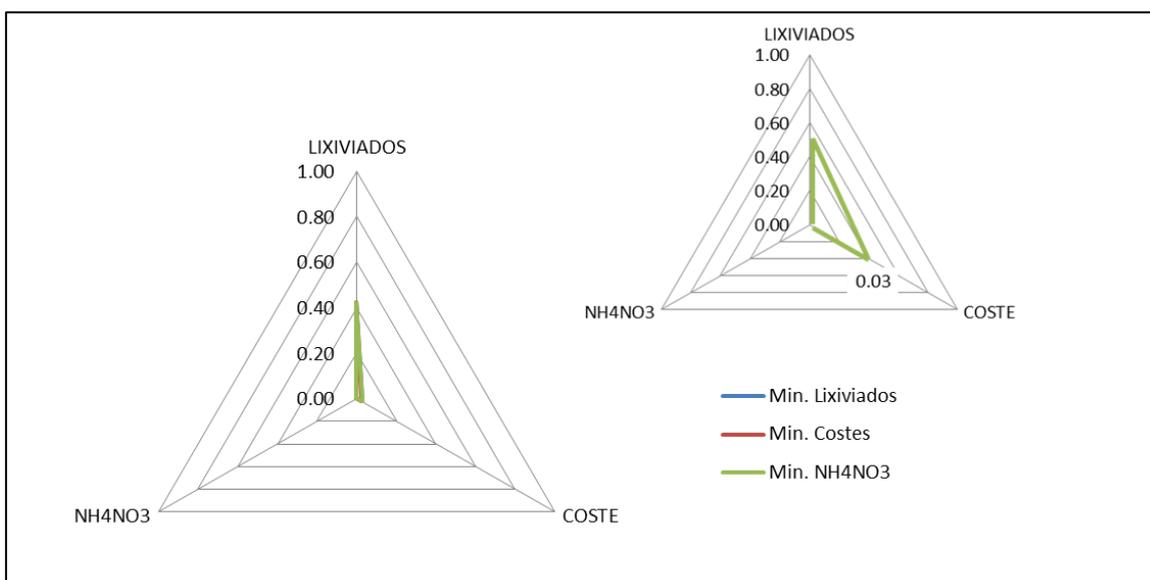


Figura 11. Resultados normalizados del escenario base.

Es notable destacar, que, en los resultados mostrados por la figura 11, minimizando las 3 funciones objetivos, se obtienen los mismos valores, con la impresión de que únicamente hubiera representada una función objetivo.

En esta figura 11 se observa que no se utiliza fertilizante comercial en ninguno de los tres casos, y que el coste es muy pequeño en comparación con los otros dos escenarios planteados. En cuanto a los lixiviados, puede observarse que apenas representan un 45% del 100% que ocurre en los otros dos escenarios.

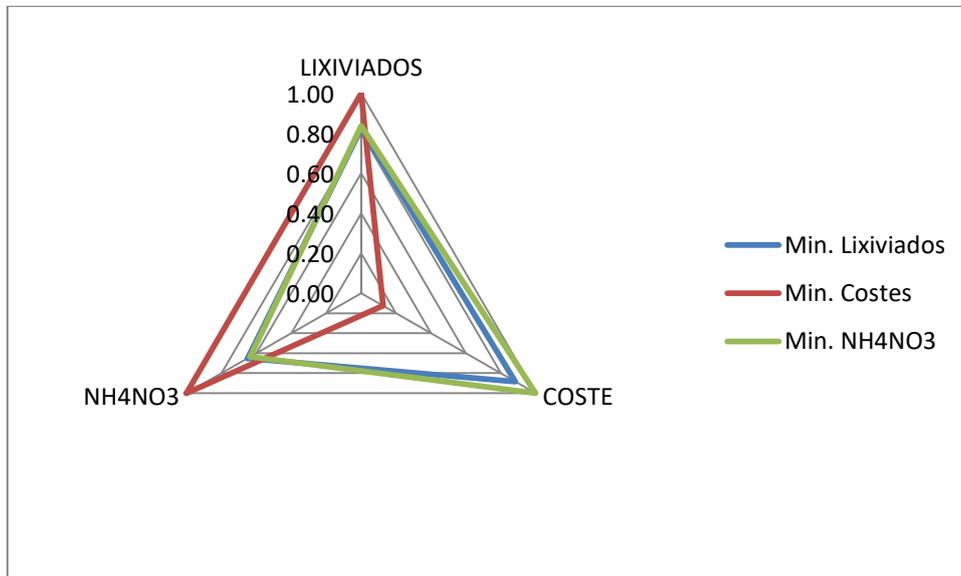


Figura 12. Resultados normalizados del escenario 1.

En cuanto a la figura 12, si se minimizan lixiviados y fertilizante inorgánico, prácticamente se obtienen los mismos resultados; aunque al minimizar el fertilizante comercial se obtiene un mayor valor en la función coste.

El valor máximo de lixiviados y de fertilizante inorgánico se obtiene al minimizar los costes.

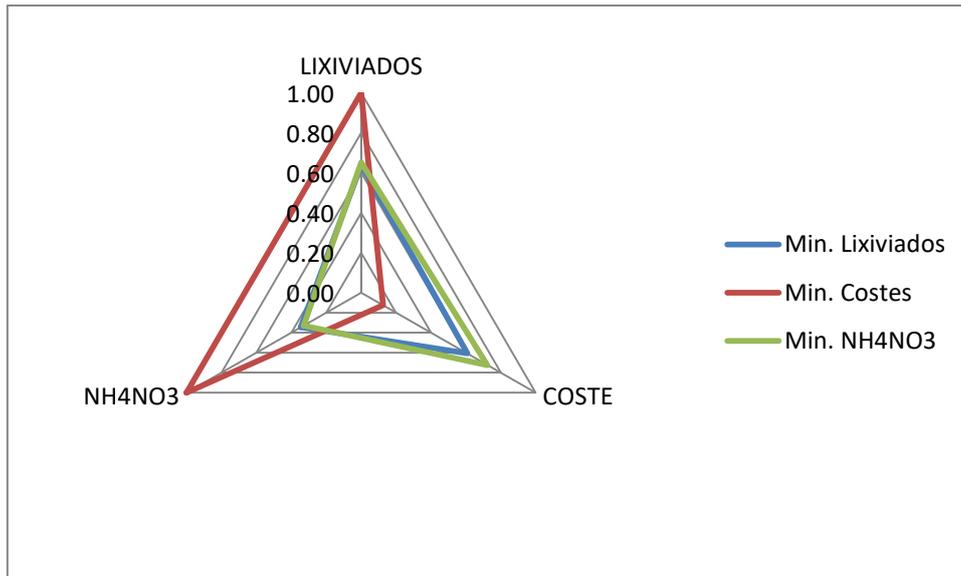


Figura 13. Resultados normalizados del escenario 2.

Analizando la figura 13, se observa que los lixiviados y el nitrato de amonio llegan a su máximo valor al minimizar los costes. Además, de forma similar a la figura 12, al minimizar los lixiviados y el fertilizante inorgánico se obtienen valores parecidos; siendo el coste de minimizar el fertilizante comercial ligeramente superior.

Como se mencionó anteriormente, otro de los resultados que ofrece el modelo matemático de GAMS son las hectáreas fertilizadas mediante los productos y mediante el fertilizante comercial. En los tres escenarios deben fertilizarse las 4.448 hectáreas de maíz y las 652 hectáreas de trigo. La tabla 8 muestra el porcentaje de hectáreas fertilizadas por los productos orgánicos dependiendo del escenario, la función objetivo y el cultivo.

Tabla 88. Porcentaje de hectáreas fertilizadas orgánicamente por cada escenario, función objetivo y cultivo.

Escenario	Función objetivo	Maíz	Trigo
Escenario base	Minimizar lixiviados	100%	100%
	Minimizar costes	100%	100%
	Minimizar NH ₄ NO ₃	100%	100%
Escenario 1	Minimizar lixiviados	42,63%	0,00%
	Minimizar costes	5,79%	0,00%
	Minimizar NH ₄ NO ₃	36,84%	65,60%
Escenario 2	Minimizar lixiviados	74,90%	0,00%
	Minimizar costes	5,79%	0,00%
	Minimizar NH ₄ NO ₃	69,11%	65,60%

Esta tabla muestra cómo, en el escenario base, es posible fertilizar las 4.448 y 652 hectáreas disponibles en Cantabria destinadas al cultivo del maíz y del trigo respectivamente, utilizando únicamente fertilizantes orgánicos.

Sin embargo, se observa que en los escenarios 1 y 2 no ocurre lo mismo, ya que entra en juego el fertilizante comercial; ocurriendo, en algún caso en concreto, que el trigo únicamente es fertilizado inorgánicamente, es decir, con el nitrato de amonio. Esto ocurre cuando se minimizan costes y lixiviados tanto en el escenario 1 como en el escenario 2.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo fin de grado se ha desarrollado la optimización de flujos residuales de N como fertilizante en agricultura orientado al cultivo de maíz y trigo bajo un enfoque de ingeniería de procesos en el contexto de la economía circular de nutrientes.

Como primera conclusión, es posible afirmar que, en base a las hipótesis utilizadas en este trabajo, la Comunidad Autónoma de Cantabria puede implementar medidas en forma de regulación regional o impositiva que faciliten la economía circular de nutrientes, ya que se dispone de suficientes residuos orgánicos generados a lo largo de un año para fertilizar los campos de maíz y trigo que son sembrados cada año.

Obviamente, dependiendo de la función objetivo que se desea minimizar, los valores de las otras dos funciones objetivo aumentan; esto quiere decir que hay que buscar un equilibrio entre lixiviados, coste y fertilizante inorgánico de cara a que el sistema sea lo más beneficioso posible tanto para el medio ambiente, como para la economía. Los valores presentados tratan de dar soporte a aquellos que son responsables de la toma de decisiones.

Como segunda conclusión tendríamos el hecho de que, a pesar de que a priori, el escenario base es el óptimo (se producen menos lixiviados, es el de menor coste y no se necesita fertilizante comercial) ya que únicamente con el estiércol es suficiente para fertilizar el área disponible en Cantabria para el cultivo de maíz y trigo. Procede por lo tanto, buscar un equilibrio para que también se puedan aprovechar el resto de residuos orgánicos que se generan en Cantabria, como son los lodos procedentes de EDARES y los residuos orgánicos municipales. Además, se ha de tener en cuenta que recuperar todo el estiércol generado anualmente en Cantabria es muy complicado, debido a la multitud de pequeñas explotaciones ganaderas que existen en la región.

La tercera conclusión que puede extraerse de este trabajo, es que incluso en el caso que se aplique más fertilizante comercial al suelo (1.342 ton NH_4NO_3 /año cuando se quiere minimizar costes en los escenarios 1 y 2), no se supera, ni siquiera se llega a la cantidad de fertilizantes nitrogenados que se utilizan habitualmente en Cantabria (2.185 ton N/año). Esto supone la reducción, casi del 50% de la cantidad de fertilizante

comercial necesario en Cantabria, ya que el maíz y el trigo representan 2 de los cultivos que más extendidos se encuentran en la Comunidad Autónoma.

Como trabajo futuro y complementario a este proyecto, cabe la posibilidad de ampliar el estudio y análisis que se ha hecho en este trabajo pero en lugar de centrar la atención en los flujos de N, incluir los flujos de P disponibles en Cantabria, ya que el P es otra de las fuentes fertilizantes utilizadas comúnmente en la agricultura.

8. NOMENCLATURA

C → Abreviatura de carbono

Cantidades_{estiércol} → Cantidades anuales que se generan en Cantabria de estiércol [toneladas]

Cantidades_{lodos_totales} → Cantidades anuales que se generan en Cantabria de lodos [toneladas]

Cantidades_{RO} → Cantidades anuales que se generan en Cantabria de residuos orgánicos municipales [toneladas]

Cantidades_{ha_cp} → Cantidades de producto fertilizante que se pueden aplicar por hectárea [kg producto/ha]

Cantidades_{ha_fert_c} → Cantidades de fertilizante comercial que se pueden aplicar por hectárea [kg nitrato de amonio/ha]

Cost_p → Coste de los productos fertilizantes [€/tonelada]

Cost_{fert} → Coste del fertilizante comercial [€/tonelada]

Eficiencias_p → Eficiencias de los productos fertilizantes [kg producto/tonelada de residuo]

Ha_c → Hectáreas de cada cultivo que han de ser fertilizadas [ha]

Ha_{fert_nitrato_c} → Hectáreas fertilizadas por el fertilizante comercial [ha]

Ha_{fert_orgánico_cp} → Hectáreas fertilizadas por los residuos orgánicos [ha]

Lix_{cp} → Lixivados producidos por los fertilizantes orgánicos [kg N/ha]

Lix_{fertilizante_p} → Lixiviados producidos por el fertilizante comercial [kg N/ha]

Lodos → Cantidad de lodos totales que se aplican directamente al suelo [toneladas]

Lodos_{dig} → Cantidad de lodos totales que pasan por la etapa de digestión anaerobia antes de ser aplicados al suelo [toneladas]

Lodos_totales → Cantidad de lodos que se generan anualmente en Cantabria a la salida de las EDARES [toneladas]

N → Abreviatura de nitrógeno

P → Abreviatura de fósforo

Residuos_p → Cantidades de producto fertilizante que se pueden generar [toneladas totales/ha]

RO → Residuos orgánicos municipales [toneladas/año]

X_{cp} → Cantidad necesaria de cada producto fertilizante en cada cultivo para optimizar el sistema [kg de producto total]

X_{fert_c} → Cantidad necesaria de fertilizante comercial en cada cultivo para optimizar el sistema [kg de nitrato de amonio]

9. BIBLIOGRAFÍA

Agropecuario (2018) *Fecha de recogida del trigo*. Disponible en: <http://www.agropecuario.org/agricultura/trigo> (Consultado: 11 Abril 2018).

Agroterra (2018) *Fecha de siembra del trigo*. Disponible en: <https://www.agroterra.com/blog/descubrir/siembra-de-trigo/77961/> (Consultado: 11 Abril 2018).

AINIA (2011) 'Líneas De Apoyo: Alimentación, Agricultura y Pesca, Biotecnología'. Disponible en: https://www.ainia.es/html/sites/09/pdf/ID_biogas_digestatos_mayo2008.pdf (Consultado: 11 Agosto 2018).

Álvarez, J., Roca, M., Valderrama C. and Cortina, J.L. (2018) 'A Phosphorous Flow Analysis in Spain', *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 612, pp. 995–1006. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.299.

Argus Media Group (2015) *Coste de los fertilizantes nitrogenados*. Disponible en: <https://www.argusmedia.com/es> (Consultado: 10 Agosto 2018).

Asociación Nacional de Fabricantes de Fertilizantes (2018) *Fertilizantes utilizados por CCAA*. Disponible en: [http://www.anffe.com/informaci%F3n sectorial/evoluci%F3n del consumo/index.html](http://www.anffe.com/informaci%F3n%20sectorial/evoluci%F3n%20del%20consumo/index.html) (Consultado: 25 Febrero 2018).

BOE (2011) *Ley 22/11 de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, Boletín Oficial del Estado (BOE-A-2011-13046)*.

Cobo, S., Dominguez-Ramos, A. and Irabien, A. (2018a) 'Minimization of Resource Consumption and Carbon Footprint of a Circular Organic Waste Valorization System', *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 6(3), pp. 3493–3501. doi: 10.1021/acssuschemeng.7b03767.

Cobo, S., Dominguez-Ramos, A. and Irabien, A. (2018b) 'Trade-offs between nutrient circularity and environmental impacts in the management of organic waste', *Environmental Science & Technology*. doi: 10.1021/acs.est.8b01590.

Comisión Europea (1991) 'Official Journal of the European Communities', *Official Journal of the European Communities*, L 375(31.12.1991), pp. 1–8.

Comisión Europea (2015) 'An EU action plan for the circular economy', *Com*, 614, p. 21. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

Comisión Europea (2018a) *Hacia una economía circular*. Disponible en: https://ec.europa.eu/commission/priorities/jobs-growth-and-investment/towards-circular-economy_es (Consultado: 28 Junio 2018).

Comisión Europea (2018b) *Lodos de aguas residuales*. Disponible en: <http://ec.europa.eu/environment/waste/sludge/index.htm> (Consultado: 30 Agosto 2018).

Ellen McArthur Foundation (2018a) *Principios de la economía circular*. Disponible en: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/es/economia-circular/principios> (Consultado: 6 Septiembre 2018).

Ellen McArthur Foundation (2018b) *Características de la economía circular*. Disponible en: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/es/economia-circular/caracteristicas> (Consultado: 6 Septiembre 2018).

Fundación COTEC para la Innovación (2017) *Situación y Evolución De La Economía Circular En España*. Disponible en: <http://cotec.es/media/informe-CotecISBN-1.pdf> (Consultado: 17 Julio 2018).

Fundación para la Economía Circular (2018) *Economía Circular en Europa, Economía Circular en Europa*. Disponible en: https://economiecircular.org/wp/?page_id=62 (Consultado: 28 Junio 2018).

GAMS Corporation (2018) *About the company*. Disponible en: <https://www.gams.com/about-the-company/> (Consultado: 24 Agosto 2018).

Gilhespy, S. L., Anthony, S., Cardenas, L., Chadwich, D., del Prado, A., y cols. (2014) 'First 20 years of DNDC (DeNitrification DeComposition): Model evolution', *Ecological Modelling*. Elsevier B.V., 292, pp. 51–62. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2014.09.004.

Gobierno de Cantabria (2017) 'Plan de residuos de la comunidad Autónoma de Cantabria 2017-2023'. Disponible en: <http://www.cantabria.es/documents/16894/4699136/PLAN+RESIDUOS+CANTABRIA+2017-2023+%28BOC+30-3-2017%29.pdf/acba2296-4953-6f4b-899d-cb86e8d2c2e6>.

Grigatti, M., Pérez, M., Blok, W., Ciavatta, C. and Veeken, A. (2007) 'A standardized method for the determination of the intrinsic carbon and nitrogen mineralization capacity of natural organic matter sources', *Soil Biology and Biochemistry*, 39(7), pp. 1493–1503. doi: 10.1016/j.soilbio.2006.12.035.

INNOVAGRI (2018) *Fecha de siembra del maíz*. Disponible en: <https://www.innovagri.es/investigacion-desarrollo-inovacion/influencia-de-la-fecha-de-siembra-en-el-maiz.html> (Consultado: 11 Abril 2018).

Klinglmair, M., Vadenbo, C., Astrup, T. and Scheutz, C. (2017) 'An MFA-based optimization model for increased resource efficiency: Phosphorus flows in Denmark', *Resources, Conservation and Recycling*. Elsevier B.V., 122, pp. 1–10. doi: 10.1016/j.resconrec.2017.01.012.

Lenntech (2018) *Tipos de lodos*. Disponible en: <https://www.lenntech.es/tipo-de-lodos.htm> (Consultado: 24 Agosto 2018).

MAGRAMA (2015) 'Plan Estatal Marco De Gestión De Residuos (PEMAR) 2016-2022', *BOE*, pp. 1–182. Disponible en: https://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/pemaraprobado6noviembrecondae_tcm30-170428.pdf (Consultado: 31 Agosto 2018).

MAPAMA (1990) 'Real Decreto 1310/1990U - Utilización de los lodos de depuración', *BOE*, 262, pp. 32339–32340. Disponible en: <https://www.boe.es/boe/dias/1990/11/01/pdfs/A32339-32340.pdf> (Consultado: 17 Septiembre 2018).

MAPAMA (1995) 'El estiércol y las prácticas agrarias respetuosas con el medio ambiente', *Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación*, pp. 1–24. Disponible en: http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1994_01.pdf

(Consultado: 5 Agosto 2018).

MAPAMA (2018a) *Economía Circular en la Comisión Europea, Economía Circular en la Comisión Europea*. Disponible en: <https://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/comision-europea/> (Consultado: 28 Junio 2018).

MAPAMA (2018b) *Hectáreas cultivadas por CCAA*. Disponible en: <https://www.mapama.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/esyrce/> (Consultado: 13 Junio 2018).

MAPAMA (2018c) *Interpretación de Directivas*. Disponible en: https://www.mapama.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/libro-blanco-del-agua/manuales_interpret_directivas.aspx (Consultado: 17 Septiembre 2018).

MAYA (2018) *Fecha recogida del maíz*. Disponible en: <https://www.mayasl.com/cosecha-del-maiz-como-se-lleva-a-cabo/> (Consultado: 11 Abril 2018).

Ministerio de Economía y Competitividad (2016) 'Estrategia española de Bioeconomía Horizonte 2030', p. 6. Disponible en: <http://bioeconomia.agripa.org/download-doc/102163> (Consultado: 15 Agosto 2018).

Muñoz, N. (2015) *Valorización de Residuos de la Industria Agroalimentaria. Codigestión de estiércol de vacuno lechero y suero de quesería*. Tesis doctoral. Departamento de Química e Ingeniería de Procesos y Recursos [Universidad de Cantabria].

Planeta Huerto (2018) *Cultivo del maíz*. Disponible en: https://www.planetahuerto.es/revista/cultivo-del-maiz_00171 (Consultado: 11 Abril 2018).

Punto focal de residuos de Cantabria (2018) *Tratamiento de lodos de depuradora*. Disponible en: https://puntofocalderesiduos.cantabria.es/residuos-especiales/-/asset_publisher/Dk24ntMBIq3S/content/ind-11-tratamiento-de-lodos-de-depuradora?inheritRedirect=false (Consultado: 1 Septiembre 2018).

Red de Especialistas en Agricultura (2018) *Fertilizantes más habituales en la*

agricultura. Disponible en: <http://agriculturers.com/los-fertilizantes-en-la-agricultura/> (Consultado: 17 Septiembre 2018).

SusChem-España (2018) *Economía circular*. Disponible en: http://www.suschem-es.org/economia_circular.asp (Consultado: 17 Septiembre 2018).

Parlamento y Consejo de la UE (2008) 'Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008 , sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.', p. 28 pags. (43 artículos). Disponible en: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:01:ES:HTML>.

Yoshida, H., Nielsen, M., Scheutz, C., Jensen, L., Christensen, T., Nielsen, S. and Bruun, S. (2015) 'Effects of sewage sludge stabilization on fertilizer value and greenhouse gas emissions after soil application', *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 65(6), pp. 506–516. doi: 10.1080/09064710.2015.1027730.

10. ANEXO

En este anexo aparecen los datos adicionales que han sido necesarios para la realización de la simulación en el software DNDC.

Las relaciones carbono-nitrógeno orgánico de cada producto son las que aparecen en la tabla A1; mientras que el porcentaje de nitrógeno en forma de nitrógeno orgánico, amonio y nitrato de cada producto es lo que se muestra en la tabla A2.

Tabla 9. Relaciones C/N de cada producto.

Producto	Relación C/N [-]	Referencia
Compost	22,90	(Cobo y cols., 2018)
Digestato	31,75	
Materia bio-estabilizado	20,05	
Estiércol	19,79	(Grigatti y cols., 2007)
Lodos	16,28	(Yoshida y cols., 2015)
Lodos digeridos	7,15	

Tabla 10. Porcentaje de nitrógeno orgánico, amonio y nitrato de cada producto.

Producto	N orgánico [%]	NH4+ [%]	NO3- [%]	Referencia
Compost	93,00	1,00	6,00	(Cobo y cols., 2018)
Digestato	62,96	37,04	0,00	
Materia bio-estabilizado	93,00	1,00	6,00	
Estiércol	99,45	0,42	0,13	(Grigatti y cols., 2007)
Lodos	92,00	6,86	1,14	(Yoshida y cols., 2015)
Lodos digeridos	88,50	11,27	0,23	