

SOSTENIBILIDAD

FERTILIZACIÓN Y N₂O. IMPLICACIONES EN LA HUELLA DE CARBONO

**ANTONIO VALLEJO, DIEGO ÁBALOS, ÁNGELA TÉLLEZ,
GUILLERMO GUARDIA** Dpto. Química y Análisis Agrícola. ETSI
Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid

Todos los alimentos obtenidos de origen vegetal llevan asociada una cierta cantidad de **emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)**, que se cuantifican a través de su huella de carbono. De los GEI, la agricultura es principalmente responsable de la emisión de óxido nitroso (N₂O), que es el que presenta mayor poder de calentamiento global. La metodología del IPCC, aparte de sobreestimar con su valor por defecto las emisiones de N₂O de nuestros **agrosistemas**, no tiene en cuenta el fin último de la agricultura que es satisfacer la demanda mundial de alimentos, fibras y combustibles. Por ello, en este artículo se propone **evaluar las emisiones de N₂O en base al rendimiento del cultivo**. Posteriormente, se enumeran una serie de buenas prácticas agrícolas cuyo fin es aumentar la eficiencia del uso del N por parte del cultivo así como reducir las emisiones de N₂O.

N₂O Y HUELLA DE CARBONO

Independientemente de los sistemas de producción utilizados (convencional, integrada o ecológica) todos los alimentos de origen vegetal llevan asociada una cierta cantidad de emisiones de GEI, cuya cuantificación se hace necesaria en el cálculo de la huella de C. Estas emisiones están fundamentalmente asociadas a tres gases: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), siendo la contribución de cada uno de ellos muy diferente en la huella de C de un determinado alimento. Para facilitar su cálculo e interpretación, los GEI se expresan en una misma unidad: kg equivalentes de dióxido de carbono (CO₂eq). Esta equivalencia se obtiene al multiplicar los

kg de CO₂, CH₄ o de N₂O generados en una actividad concreta por los factores de 1, 25 y 298, respectivamente. Estos factores están relacionados con la capacidad de calentamiento global de cada uno de estos gases en la atmósfera en relación a la misma masa de CO₂ y para un periodo de 100 años. Así el N₂O, que es de los tres GEI el que se encuentra en la atmósfera a una concentración más baja (en torno a las 320 ppb v/v), presenta un poder de calentamiento global aproximadamente 298 veces superior al del CO₂ para ese periodo de tiempo.

Según estimaciones del IPCC la Agricultura mundial contribuye entre 5.1 y 6.1 miles de millones de toneladas de CO₂eq, lo que supone el 10 – 12% del total de GEI

¿QUÉ ES LA HUELLA DE CARBONO?

La huella de carbono de los productos agroalimentarios es una medida de las emisiones totales de Gases de Efecto Invernadero (GEI), que son causadas directa o indirectamente por todas las actividades de su ciclo de vida (materias primas, producción, preparación por la industria, transporte, gestión y valorización de residuos, etc.). Su cuantificación resulta interesante, pues puede ser utilizado como herramienta que permita al consumidor comparar alimentos en base a la contaminación generada durante su producción y suministro.

emitidos a la atmósfera. El CH₄, con cerca de 1790 millones de toneladas de CO₂eq, es el gas que más contribuye desde el sector ganadero, mientras que en el sector agrícola y forestal, el N₂O procedente de los suelos genera en torno a 2100 millones de toneladas de CO₂eq (Bellarby *et al.*, 2005). Otras actividades del ciclo de vida de los productos agroalimentarios, como la producción de fertilizantes minerales, manejo de estiércoles o el gasto energético asociado al riego tienen un peso relativamente inferior (410, 410 y 360 millones de toneladas de CO₂eq, respectivamente). Tienen también un peso inferior las emisiones asociadas al laboreo y a la

Experimentos del grupo de investigación COAPA, realizados en la finca experimental "El Encín" (IMIDRA, foto A) y "La Canaleja" (INIA, derecha, foto B).



producción de plaguicidas. Es importante, en este sentido, valorar el esfuerzo llevado a cabo por el sector de los fertilizantes para rebajar las emisiones asociadas a la producción de estos agroquímicos, obteniéndose una eficacia energética elevada en los fertilizantes obtenidos en las fábricas modernas. No ocurre lo mismo con la aplicación de fertilizantes (orgánicos y minerales) a los cultivos, donde las emisiones son en muchos casos elevadas, existiendo un potencial importante para la mitigación de GEI mediante la implementación de ciertas prácticas agrícolas (Adviento-Borbe *et al.*, 2007).

Nitrificación y desnitrificación

El N_2O es un gas que se emite desde los suelos, agrícolas o forestales, independientemente de que se apliquen o no fertilizantes nitrogenados. Se produce fundamentalmente a través de dos procesos bioquímicos inherentes al ciclo del N: nitrificación y desnitrificación.

El proceso de nitrificación, como es conocido, permite la transformación del N amónico, procedente de la mineralización de la ma-

Según estimaciones del IPCC la Agricultura mundial supone el 10-12% del total de GEI emitidos a la atmósfera. El CH_4 es el gas que más contribuye desde el sector ganadero, mientras que en el sector agrícola y forestal es el N_2O

teria orgánica o del aporte de fertilizantes ureicos o amónicos, en N nítrico. En este proceso participan microorganismos que obtienen energía a través de la transformación del amonio. Durante esta transformación bioquímica se generan óxidos de N, como el óxido nítrico (NO), gas altamente reactivo en la atmósfera que genera ozono troposférico, y también el N_2O . El proceso es aeróbico, por lo que se produce en cantidades apreciables tras el aporte de una fuente de N a suelos húmedos pero bien aireados. El proceso de desnitrificación ocurre de manera temporal cuando la concentración de O_2 baja en los poros del suelo. En estas circunstancias, una amplia variedad de microorganismos (desnitrificantes) sustituyen el O_2 atmosférico por moléculas con elevado contenido en oxígeno como el

En esta finca nuestro grupo colabora con el grupo de investigación COSVE del INIA. Nuestra investigación en esta línea no hubiese sido posible sin el apoyo de estas entidades y el de los técnicos que colaboran en los ensayos de campo.

NO_3^- , utilizándolo para oxidar sustratos orgánicos y obtener así energía. En el proceso se genera NO, N_2O y N_2 , este último inocuo desde el punto de vista ambiental. Las condiciones que favorecen la desnitrificación son las que tienen lugar en los suelos después de un periodo de lluvias o de riego, manteniéndose llenos de agua más del 60% de los macro y/o microporos. Es importante destacar que el mecanismo es bastante complejo y no resulta fácil predecir la proporción de N_2O (gas nocivo) frente a N_2 (gas inocuo) que se produce en unas condiciones dadas.

Situación actual de la investigación

La reducción de emisiones es beneficiosa desde el punto de vista ambiental, y muy necesaria en



países como España, donde se superan las emisiones asignadas en los acuerdos internacionales. Gracias a las múltiples investigaciones realizadas en este campo en los últimos años, es posible en estos momentos discernir qué prácticas agrícolas asociadas al manejo de los cultivos podrían contribuir a reducir las emisiones de este gas. Desde el punto de vista económico, es previsible que en un futuro próximo se incentive a las explotaciones agrícolas que contribuyan a reducir el total de emisiones de GEI a través de lo que se denomina buenas prácticas agrícolas (manejo adecuado de fertilizantes y agua, rotación de cultivos, laboreo, etc). Esto permitiría reducir las emisio-

los suelos agrícolas, y muy especialmente en los factores a aplicar como consecuencia de la aplicación de fertilizantes. Actualmente se asignan índices idénticos a todos los fertilizantes y situaciones de cultivo, lo que indudablemente no coincide con la situación real de los agrosistemas, y no reproduce la posible reducción de emisiones conseguida a través de buenas prácticas agrícolas. Dado que la emisión de N_2O tiene un peso importante en las emisiones asociadas a alimentos poco elaborados, resulta imprescindible mejorar este conocimiento para poder competir con nuestros productos desde este punto de vista ambiental en un mercado cada vez más exigente. La obtención de índices desagregados y reconocidos internacionalmente, que tengan en cuenta las condiciones de cultivo, es un camino que habrá que recorrer si se quiere aprovechar las necesidades de los mercados.

PAC Y N_2O

La reducción de las emisiones de N_2O de las actividades agrícolas es uno de los puntos tratados en la Política Agraria Común (PAC) en el horizonte 2020. Este marco de programación europeo aborda el papel de la agricultura en la mitigación del cambio climático buscando una agricultura más sostenible y competitiva.

En concreto, este objetivo se enmarca dentro de las prioridades Comunitarias de Desarrollo Rural, en el cual se promulga el "uso eficiente de los recursos, economía baja en carbono y resistente al cambio climático". Una consecuencia directa de las anteriores directivas medioambientales de la PAC (1990-2006) ha sido la reducción de las emisiones de GEI provenientes del sector agropecuario europeo en un 20%.

nes estimadas en los inventarios nacionales. Adicionalmente puede generarse un valor añadido al suministrar alimentos con una huella de C más baja, previsiblemente más demandados en el futuro por el consumidor, lo que puede quedar plasmado en una ecoetiqueta que permita su identificación.

En estos momentos algunos investigadores y técnicos están colaborando con diferentes entidades y empresas para generar calculadoras de huella de carbono para alimentos, lo que permitirá asignar etiquetas a los diferentes productos agrícolas según su origen, manejo de sistema, etc. No obstante, en todas ellas hay gran incertidumbre en lo que se refiere a las emisiones procedentes de

N_2O Y FERTILIZACIÓN NITROGENADA

De entre los factores que afectan a las emisiones de N_2O , la fertilización nitrogenada es, sin duda, el más importante. Este hecho queda de manifiesto si tenemos en cuenta que las emisiones actualmente se estiman como una proporción del fertilizante aportado, sin tener en cuenta ningún otro factor. En concreto, la metodología IPCC asume que el 1% del fertilizante aportado a un suelo agrícola se pierde en forma de N_2O . Este factor, que forma parte de la directiva Tier 1 de dicha metodología, se aplica por defecto para el cálculo de inventarios nacionales a los países con escasa información específica sobre la magnitud y condiciones determinantes de sus emisiones. Para países con más información se aplica el Tier 2, donde la metodología permite índices desagregados a cultivos, condiciones climáticas, etc. España pertenece al grupo de países del Tier 1; sin embargo, estudios recientes muestran que ese valor del 1% está asociado a una gran incertidumbre en nuestras condiciones edafoclimáticas. Esto es debido a que las emisiones de N_2O se ven

muy influenciadas por la humedad, temperatura, C y N mineral del suelo, así como por el manejo de los cultivos. Por ejemplo, usando la literatura disponible se ha comprobado que el factor real de emisión para cultivos en secano es considerablemente inferior en zonas de clima mediterráneo, pudiendo estar por debajo del 0.2% del fertilizante aplicado en cereales de invierno (Aguilera *et al.*, 2013). Gran parte de los resultados que se emplearon en este estudio estadístico (meta-análisis) de emisiones fueron realizados por nuestro grupo de investigación a lo largo de los últimos 12 años en suelos del Centro de España (Grupo COAPA de la ET-SI Agrónomos -Universidad Politécnica de Madrid). Este valor más bajo se debe a la coincidencia del aporte de fertilizante, especialmente el de cobertera, en un periodo en el que el suelo está frío (febrero-marzo) y el nivel de lluvias no suele ser elevado. Además, los suelos de estas zonas bajo clima mediterráneo suelen tener un nivel bajo de materia orgánica, sustrato del que obtienen energía los desnitrificantes y regula su actividad. Las condiciones son por tanto poco favorables para la desnitrificación y para la emisión de N_2O asociado a este proceso en la mayor parte del periodo de cultivo. En base a este hecho y a lo anteriormente comentado, es importante para nuestro país conocer mejor nuestros sistemas agrícolas, generando una base de datos de emisiones en diferentes comarcas y para diferentes cultivos y sistemas de manejo, que nos permitan desagregar los índices y aplicar valores específicos que sean más cercanos y favorables a nuestra realidad.

La importancia de considerar el rendimiento del cultivo

Aparte de esta negativa incertidumbre asociada a la utilización de un índice general, la metodología del IPCC no tiene en cuenta el fin último de la agricultura, que es la obtención de buenos rendimientos para la provisión de fibras, alimentos y combustibles a una población mundial en conti-

Es importante valorar el esfuerzo llevado a cabo por el sector de los fertilizantes para rebajar las emisiones asociadas a la producción de estos agroquímicos, obteniéndose una eficacia energética elevada

nuo y exponencial crecimiento. Por ello, recientemente se ha introducido el concepto de Yield-scaled N_2O emissions (emisiones de N_2O en base al rendimiento). Si nos atenemos al IPCC, no aplicar fertilizante o hacerlo en cantidades mínimas sería lo recomendable, sin importar las consecuentes pérdidas de rendimiento asociadas a estas prácticas. Basado en esta condición se han lle-

vado a cabo estudios que analizan el Yield-scaled N_2O en función de la dosis de N aplicada a múltiples cultivos en diferentes zonas del mundo (van Groenigen et al., 2010). Los resultados se resumen en la **Figura 1**, en la que se representa dicho índice en función de la cantidad de N aplicada como fertilizante. Se observa que las emisiones no guardan una linealidad con la dosis de N, produciendo un incremento exponencial a los valores más elevados. Para entender mejor este hecho se analizaron también en ese mismo estudio, las emisiones en función del NUE (N use efficiency) (**Figura 2**). Se observa que el Yield-scaled N_2O disminuye al aumentar la eficiencia en el uso de N. De este hecho se deduce claramente la recomendación de que las buenas prácticas agrícolas para reducir emisiones de N_2O deben dirigirse a maximizar la absorción de N por parte de los cultivos (eficiencia en el uso del N).

EMISIONES INDIRECTAS

La estimación de la huella de carbono de un agrosistema no debe tener sólo en cuenta las emisiones directas (desde el suelo) de N_2O , ya que existen otras fuentes indirectas que contribuyen a incrementar el valor de CO_{2eq} . Además de las ya citadas emisiones asociadas a los fertilizantes orgánicos (almacenamiento) y minerales (síntesis) y a su transporte hasta las explotaciones agrarias, es necesario considerar también dos procesos que dan lugar a pérdidas dentro del ciclo del N: la lixiviación de NO_3^- y la volatilización de NH_3 .

La lixiviación de NO_3^- supone una reducción de la Eficiencia en el Uso de Nitrógeno y es fuente de contaminación de aguas subterráneas y superficiales, desde las cuales pueden producirse también pérdidas de N_2O gaseoso procedentes de la desnitrificación del NO_3^- .

El NH_3 volatilizado puede trans-

portarse largas distancias en la atmósfera y reaccionar formando partículas (aerosoles) como nitrato o sulfato amónico. Además del impacto sobre los ecosistemas naturales (acidificación de suelos, eutrofización de aguas...) y la salud humana, estas partículas depositadas (de forma seca o húmeda vía precipitaciones), suponen una fuente adicional de N susceptible de perderse como N₂O hacia la atmósfera. Las pérdidas indirectas de N₂O por lixiviación y volatilización suponen de media un 0.75% y 1% del N aportado, respectivamente (De Klein *et al.*, 2006).

BUENAS PRÁCTICAS AGRÍCOLAS

Definir unas prácticas agrícolas que contribuyan a disminuir el Yield-scaled N₂O en los cultivos no resulta sencillo, ya que no siempre su aplicación garantiza una bajada en las emisiones. Condiciones ambientales no previstas que modifiquen sustancialmente el NUE del cultivo, que afecten al régimen de humedad del suelo, etc., podrían generar resultados no esperados, tanto en rendimiento como en emisiones. No obstante, en la mayoría de las ocasiones su aplicación podría resultar muy positiva. En este sentido, y en relación con el uso de fertilizantes nitrogenados, la premisa que debe mantenerse es la anteriormente comentada de mejorar el NUE del cultivo, ya que una mayor eficacia en el sistema es consecuencia de un menor nivel de pérdidas de N, entre ellas las de N₂O. Las siguientes prácticas permiten reducir emisiones de N₂O, frecuentemente por aumento del NUE.

1. Ajustar la dosis de fertilizante a las necesidades de la planta, minimizando el N residual

Para ello, es necesario:

- Implementar un buen sistema de diagnóstico de las necesidades de N, que tenga en cuenta el N mineralizable durante el periodo de cultivo.
- Conocer bien la dinámica de mineralización de los fertilizan-

Figura 1. Relación entre Yield-scaled N₂O emissions (emisiones de N₂O en base al rendimiento) y N application rate (cantidad de fertilizante nitrogenado aportado). Fuente: Van Groenigen *et al.*, 2010.

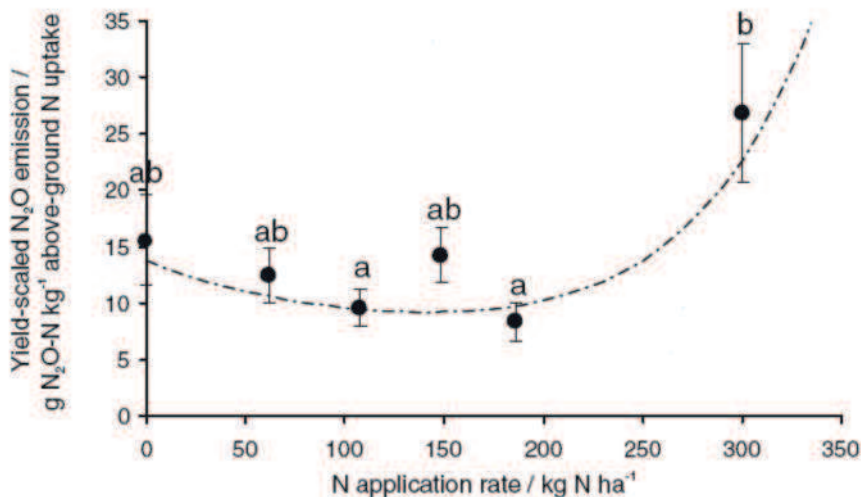
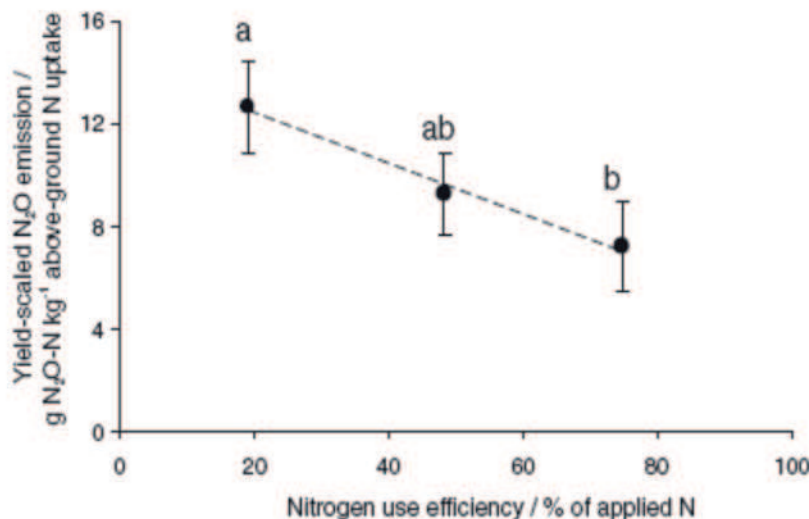


Figura 2. Relación entre Yield-scaled N₂O emissions (emisiones de N₂O en base al rendimiento) y NUE. Fuente: Meta-análisis realizado por Van Groenigen *et al.*, (2010) a partir de 147 bases de datos.



tes. Esto es especialmente importante cuando se aportan fertilizantes o residuos orgánicos.

- Aplicar según la demanda de la planta. La distribución de fertilizante en varias aplicaciones en cobertura se considera una buena estrategia para reducir pérdidas gaseosas. La fertirrigación tiene unas posibilidades extraordinarias para aportar niveles bajos de N racionalizando el uso del agua. La aplicación de N en presembrado no se recomienda, ya

que puede contribuir a incrementar emisiones al coincidir la aplicación de N con una demanda baja por parte de la planta.

- Hacer un seguimiento del estado nutritivo de la planta mediante medidores de clorofila (tipo Spad) u otras técnicas de diagnóstico para mantener rendimientos adecuados.
- Calibrar los equipos de fertilización, para no sobre fertilizar ciertas zonas dentro de la parcela de cultivo.

La metodología IPCC asume que el 1% del fertilizante aportado a un suelo agrícola se pierde en forma de N₂O. En España, sin embargo, estudios recientes muestran que ese valor está asociado a una gran incertidumbre en nuestras condiciones edafoclimáticas

- Utilizar técnicas basadas en agricultura de precisión que aporten el N según un mapa de demanda dentro de la parcela.
- Enterrar el fertilizante, o en cultivos de secano aplicar cuando exista una previsión de lluvia que lo incorpore rápidamente en el suelo.

2. Tipos de fertilizante

- La forma de N aplicada en el fertilizante afecta a las emisiones. Los fertilizantes amónicos o ureicos están sometidos al proceso de nitrificación, por lo que generan emisiones de N₂O adicionales cuando sólo se usa nitrato (que genera fundamentalmente pérdidas por desnitrificación). Por este motivo en algunos artículos se ha comprobado que el aporte de urea o fertilizantes amónicos incrementa las emisiones en relación al aporte exclusivo de nitrato. Esto ha sido corroborado por nuestro grupo de investigación en suelos del Centro de España.
- Utilización de fuentes orgánicas frente a fuentes minerales. En este punto hay controversia según zonas climáticas. En zonas mediterráneas los trabajos realizados hasta la fecha indican una menor emisión en orgánicos que en minerales (Aguilera *et al.* 2013). Nuestra hipótesis es que en condiciones desnitrificantes, el aporte de C facilita la transformación del N₂O a N₂ en el suelo.
- Utilización de inhibidores de la nitrificación junto con fertilizantes sintéticos o abonos orgánicos. Está demostrado que el uso de inhibidores de la nitrificación tales como el DMPP o el DCD reducen la emisión de N₂O y NO al disminuirla velocidad de nitrificación de fuentes amónicas. Su eficiencia depende no obstante

de las condiciones de humedad en los días posteriores a su aplicación.

- Utilización de inhibidores de la ureasa. Este tipo de inhibidores actúa reduciendo la volatilización de NH₃, y por tanto las emisiones indirectas de N₂O asociadas. Nuestros resultados indican que en condiciones favorables a la nitrificación también reducen los flujos directos de N₂O.

3. Emplear técnicas de cultivo más eficientes

- Uso de cultivos captura en el periodo intercultivo para zonas de regadío. El N residual que queda en otoño es susceptible de perderse por lixiviación, pero también por emisión a la atmósfera por efecto de las lluvias de otoño-invierno. Por ello, la incorporación de un cultivo captura que utilice ese N lo antes posible es una buena estrategia para reducir emisiones. Se requieren cultivos que desarrollen rápidamente su sistema radicular en una época de otoño-invierno (gramíneas, etc.).
- Rotación con leguminosas. Las rotaciones de cultivos que incluyen leguminosas también se consideran una estrategia para reducir emisiones, ya que el N fijado durante el periodo de cultivo no contabiliza en las emisiones, al no requerir fertilización nitrogenada. La huella de C de productos obtenidos con rota-

El agua es un factor clave para las emisiones, por ello el riego puede ser utilizado para reducir flujos

ción de leguminosas puede ser por ello menor si la dosis de N fertilizante aplicada es también menor que en monocultivo.

4. Mejorar el uso del agua en el riego

El agua es un factor clave para las emisiones, por ello el riego puede ser utilizado para reducir flujos. También afecta de manera importante a la lixiviación de nitrato que contribuye a las emisiones indirectas. En este sentido se recomienda:

- Utilización de riego por goteo. Al mantener una menor proporción de superficie húmeda las emisiones se reducen.
- Evitar el encharcamiento del suelo durante el riego que promovería desnitrificación.
- Utilización de riego después de la fertilización. La incorporación del fertilizante en el suelo puede reducir emisiones. Todas estas prácticas han demostrado reducir emisiones de N₂O manteniendo o incluso mejorando el rendimiento de los cultivos. Algunas, no incluidas en esta propuesta también han demostrado potencialidad para la mitigación de N₂O, aunque todavía hay un cierto grado de controversia en los resultados publicados. Este es el caso de los sistemas de agricultura de conservación que parecen ser eficientes después de 10 años de implantación, o la utilización de fertilizantes de liberación controlada, donde los beneficios esperados están muy condicionados por el coste económico de estos productos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la CAM y a la Dirección General Científica y Técnica del Ministerio de Economía e Innovación que financia el programa Agrisost (S2009/AGR-1630) y el proyecto AGL2012-37815-C05-01, respectivamente, y los contratos de algunos de los autores de este artículo. ■

Bibliografía

Queda a disposición del lector interesado en el correo de redaccion@editorialagricola.com