

El nitrógeno en la agricultura argentina
Alternativas para incrementar la eficiencia de uso en los cultivos de grano y mitigar las
emisiones de óxido nitroso

Fernando O. García¹, Miguel A. Taboada², María Fernanda González Sanjuan³ y Liliana I. Picone⁴

¹ IPNI Cono Sur, fgarcia@ipni.net; ² Instituto de Suelos, CIRN, INTA, mtaboada@agro.uba.ar; ³ Fertilizar Asociación Civil, mfgonzalez@fertilizar.org.ar; ⁴ Unidad Integrada FCA-INTA Balcarce, lpicone@balcarce.inta.gov.ar

Resumen Ejecutivo

El óxido nitroso (N₂O) es uno de los principales gases de efecto invernadero (GEI) junto con el dióxido de carbono (CO₂) y el metano (CH₄). Si bien las emisiones de N₂O son mucho menores que las de CO₂ a nivel global, representan el 7.9% de los GEI. El N₂O presenta un efecto de calentamiento 296 veces superior al del CO₂ y es el principal GEI emitido por la agricultura, representando el 21% del total de las emisiones GEI de la Argentina. Su liberación a la atmósfera es colateral a los procesos de desnitrificación y de nitrificación, por lo que depende de la cantidad de nitrógeno (N) que entra anualmente a los suelos agrícolas.

Este escrito aporta elementos para la discusión del manejo de N, buscando mejorar la eficiencia de uso de fertilizantes nitrogenados que resulte en la mitigación de las emisiones de N₂O. Asimismo, una mejor eficiencia en el uso del N impactará positivamente en los resultados productivos y económicos y, también, sobre otros efectos ambientales. Se presentan aspectos relacionados con: i) el consumo de N actual y proyectado al 2020 en Argentina; ii) la eficiencia de uso del N en la agricultura de granos actual y proyectada; iii) el rol de la agricultura y de los fertilizantes nitrogenados en emisiones de N₂O; y iv) las posibilidades de mejorar la eficiencia de uso de fertilizantes nitrogenados y reducir las emisiones de N₂O. Finalmente, se plantea una propuesta para la mitigación de emisiones de N₂O, poniéndose énfasis en sistemas de producción de cultivos anuales de la región pampeana argentina.

El consumo de fertilizantes nitrogenados a nivel país se ha incrementado notablemente en los últimos años, pasando de 117 mil toneladas N en 1993 a 727 mil toneladas N en 2012, con un pico de 894 mil toneladas N en 2007. La tasa de crecimiento anual durante el período 1993-2012 fue de 34.3 mil toneladas N por año. La información disponible sobre consumo de fertilizantes, indica que el trigo, la cebada, el maíz y el sorgo están siendo fertilizados en un 67-94% del área, con dosis promedio de 43 a 76 kg N/ha. A pesar del incremento observado en el consumo de fertilizantes nitrogenados en los últimos años, la relación aplicación/remoción muestra un balance negativo, reponiéndose solamente un 36% del N extraído en grano por los

1 El nitrógeno en la agricultura argentina
Alternativas para incrementar la eficiencia de uso en los cultivos de grano y mitigar las emisiones de óxido nitroso
<http://lacs.ipni.net/article/LACS-1210>

principales cuatro cultivos (soja, maíz, trigo y girasol), promedio de las tres últimas campañas agrícolas (2010 a 2012).

A escala de país, la eficiencia de uso de los nutrientes aplicados vía fertilizantes puede evaluarse a través de indicadores como el balance parcial de nutrientes (BPN) y la productividad parcial del factor (PPF), N en este caso. El BPN es la relación entre los kg de nutriente extraído y los kg de nutriente aplicado, mientras que la PPF es la relación entre la producción de grano y la cantidad de nutriente aplicado. Las estimaciones de BPN muestran que, en el caso de los cereales, a través de los últimos años, los valores se han ido acercando al nivel de 1, considerado adecuado según las referencias bibliográficas. Los valores de PPF para trigo se encuentran dentro del rango de 40 a 80 kg de grano por kg N, considerado óptimo a nivel mundial para cereales. Para maíz, los valores de PPF son algo elevados, indicando que probablemente el cultivo aún se abastezca de N de la fracción orgánica de los suelos, acentuando la degradación de la fertilidad de los suelos.

Tomando en cuenta la línea de base 2010 y la proyección de área y producción de granos propuesta en el Plan Estratégico Agroalimentario y Agroindustrial (PEA2, Minagri) para el 2020, se pueden plantear distintos escenarios de consumo de N en los principales cultivos de grano, considerando distintas eficiencias de uso. Estos escenarios para 2020, resultan en necesidades de fertilizantes nitrogenados superiores en un 86% a 187% del consumo registrado en 2010.

De acuerdo con la Segunda Comunicación Nacional del Gobierno Argentino a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, en el año 2000 (último año informado) las emisiones de GEI de la Argentina fueron 238.702,9 Gg CO₂-equivalente (una medida que estima todos los GEIs en conjunto en base a su poder de calentamiento). La agricultura argentina (i.e. agricultura y ganadería) ha sido responsable, en ese año, del 43% del total de emisiones del país. De este 43%, la producción agrícola emitió un 21% (mayormente N₂O), mientras que la ganadería un 22% (mayormente CH₄). El uso de fertilizantes nitrogenados contribuyó en un 12% de la emisión de N₂O, según estimaciones considerando las directrices del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC). Este porcentaje se mantendría estable hacia 2012 dadas las compensaciones de aumento de uso de fertilizantes nitrogenados y los cambios en las directrices del IPCC.

Los GEI generados por la agricultura son producidos por mecanismos complejos y heterogéneos y las emisiones presentan una alta variabilidad. Las numerosas evaluaciones, actualmente en curso en el país, de emisiones de N₂O y otros GEI bajo diversos sistemas de producción y condiciones de manejo, permitirán determinar con mayor certeza los valores reales a campo y las condiciones que los afectan. Sin embargo, la necesidad de plantear alternativas inmediatas para la mitigación de emisiones requiere que se planteen distintas opciones a partir de la información y conocimiento existentes.

La Argentina no podría plantear una reducción en el uso de fertilizantes nitrogenados considerando las metas de producción del Plan Estratégico Agroalimentario y Agroindustrial (PEA2). Por el contrario, deberá incrementar el uso de los mismos para alcanzar esas metas de producción. Obviamente, sí debería plantearse un uso eficiente del N bajo condiciones actuales y a futuro. Las condiciones futuras implican una mayor emisión absoluta de N₂O pero una menor emisión de N₂O por unidad de producto. Por ejemplo, menor emisión por tonelada de grano cosechado. No debiéramos repetir experiencias del siglo pasado, en que la muy baja reposición de nutrientes vía fertilizantes condujo a un importante empobrecimiento de los suelos.

Podrían aplicarse muchas de las tecnologías conocidas actualmente para reducir la emisión de GEI: manejo de tierras y suelos, manejo del pastoreo, restauración de suelos degradados, gestión de biosólidos y producción de bioenergía. La adopción de mejores prácticas de manejo (MPM) de nutrientes y fertilizantes siguiendo el Manejo Responsable de los 4Rs (los cuatro requisitos) permite generar mayores eficiencias de uso de los nutrientes disponibles y/o aplicados. La adopción de la dosis correcta aplicada con la fuente correcta, en el momento correcto y la ubicación correcta permite maximizar la producción y la eficiencia de uso de otros recursos e insumos, mantener y/o mejorar la fertilidad de los suelos y evitar problemas de contaminación de aguas, suelos y aire.

Poniendo como objetivo una intensificación sustentable de la agricultura que reduzca el impacto ambiental y social y maximice la productividad del sistema agrícola, es que los autores proponemos mejorar la eficiencia de uso del N aplicado como fertilizante para mitigar las emisiones de N₂O. Entre las MPM de suelos y cultivos que contribuyen a este propósito, según la condición específica de sitio a nivel de predio, cuenca o región, podemos indicar: rotaciones con mayor intensidad de cultivo, prácticas de manejo de suelos que reduzcan la erosión hídrica y eólica y la desertificación, integración de agricultura con ganadería en pastoreo, siembra directa con adecuadas rotaciones de cultivos, nutrición de suelos y cultivos, y muchas otras. Estas prácticas deben resultar en una menor emisión de GEI, mayor captura de carbono en los suelos, mayor eficiencia de uso del agua, mayor diversidad y actividad biológica en los suelos, uso adecuado y responsable de agroquímicos. La Argentina, sus instituciones, profesionales y productores, deben seguir trabajando en mejorar la eficiencia de uso del N aplicado, así como también del N del suelo y del N proveniente de fijación biológica. Considerando las metas 2020 del PEA2, puede plantearse un escenario de mejoras de eficiencia de uso de N del orden del 5-10% que deberían lograrse utilizando las MPM.

Finalmente debe enfatizarse la necesidad de que las investigaciones actuales y futuras sobre el ciclo del N integren los procesos, y cuantifiquen las transformaciones del N en los agroecosistemas a escala de lote y cuenca. De esta manera, se podrá contar con información básica no solo a los efectos de alcanzar una mayor producción y eficiencia de uso del nutriente, sino también para conocer con mayor detalle los impactos ambientales en el uso del N. En

estos casos, y teniendo en cuenta las frecuentes limitaciones de orden metodológico y/o económico para investigar en este tema. El sector productivo y el país deberían considerar prioritario el apoyo financiero a estas investigaciones. Los resultados que surjan de ellas servirán de base para generar una estrategia de defensa ante posibles medidas parancelarias por parte de los países compradores de nuestras exportaciones.

Introducción

El sostenido crecimiento demográfico, la escasez de tierras agrícolas y el fuerte crecimiento de los países emergentes han determinado una creciente demanda global de alimentos, forrajes, fibras, biocombustibles y biomateriales. La producción de granos debe responder a esta creciente demanda a través de la expansión en área cultivada y/o el aumento de los rendimientos de las superficies actualmente bajo cultivo. Las limitaciones en la expansión hacia tierras y ecosistemas más frágiles resultan en la necesidad de intensificar sustentablemente la producción en los sistemas actuales, es decir: incrementar los rendimientos.

El nitrógeno (N) es considerado el nutriente más importante para la producción vegetal, debido a las cantidades requeridas por los cultivos y a la frecuencia con que se observan deficiencias en suelos agrícolas. La intensificación agrícola depende en gran medida del abastecimiento de N en tiempo y forma. Por otra parte, las condiciones económicas y la necesidad de preservar el medio ambiente, básicamente los recursos suelo, agua y atmósfera, requieren del uso más eficiente del N.

El óxido nitroso (N_2O) es el principal gas efecto invernadero (GEI) emitido por la agricultura, representando el 21% del total de las emisiones GEI de la Argentina. Su liberación a la atmósfera es colateral a los procesos de desnitrificación y de nitrificación, por lo que depende de la cantidad de N mineral que entra anualmente a los suelos agrícolas.

Este escrito aporta elementos para la discusión del manejo de N, buscando mejorar la eficiencia de uso de fertilizantes nitrogenados que resulte en la mitigación de las emisiones de óxido nitroso (N_2O). Asimismo, una mejor eficiencia en el uso del N impactará positivamente en los resultados productivos y económicos y, también, sobre otros efectos ambientales, como la reducción de las pérdidas por lavado de nitratos, que es fuente de contaminación de aguas subterráneas y superficiales. Se presentan aspectos relacionados con: i) el consumo de N actual y proyectado al 2020 en Argentina; ii) la eficiencia de uso del N en la agricultura de granos actual y proyectada; iii) el rol de la agricultura y de los fertilizantes nitrogenados en emisiones de N_2O ; y iv) las posibilidades de mejorar la eficiencia de uso de fertilizantes nitrogenados y reducir las emisiones de N_2O . Finalmente, se plantea una propuesta para la mitigación de emisiones de N_2O . Se hace énfasis en sistemas de producción de cultivos anuales de la región pampeana argentina.

Consumo actual de N en Argentina

El consumo de N a nivel país se ha incrementado notablemente en los últimos años, pasando de 117 mil toneladas en 1993 a 727 mil toneladas en 2012, con un pico de 894 mil toneladas en 2007 (**Figura 1**). La tasa de crecimiento anual durante el período 1993-2012 fue de 34.3 mil toneladas N por año.

La información de las campañas 2010/11 y 2011/12, generada a partir de encuestas de Fertilizar Asociación Civil, indicaría que el trigo, la cebada, el maíz y el sorgo están siendo fertilizados en un 67-94% del área, con dosis promedio de 43 a 76 kg/ha de N (**Tabla 1**). A pesar del incremento observado en el consumo de fertilizantes nitrogenados en los últimos años, la relación aplicación/remoción muestra un balance negativo, reponiéndose solamente un 36% del N extraído en grano por los principales cuatro cultivos (soja, maíz, trigo y girasol), promedio de las tres últimas campañas agrícolas (2010 a 2012) (**Figura 2**).

El mayor desbalance de N en cultivos de grano se produce en soja (Cordone y Martínez, 2004). Considerando que el índice de cosecha de N (N en grano/N total absorbido) en soja es del 70-80%, cuando la fijación biológica de N (FBN) aporta porcentajes de N menores a este índice de cosecha, el cultivo estaría exportando en grano, N proveniente del suelo. Investigaciones recientes indican que, en la región centro y norte productora de soja del país, entre el 26% (Concepción del Uruguay, Entre Ríos) y el 71% (Virginia, Tucumán) del N acumulado, con una media del 50%, procede de la FBN (Collino et al., 2007). Con un valor medio de aporte por FBN al N del grano del 50%, y considerando que prácticamente no se aplica fertilizante nitrogenado, el desbalance anual de N generado por soja podría estimarse en aproximadamente 1.14 millones de toneladas de N, promedio para las tres últimas campañas 2010-12, el cual representa un 65% de la extracción total de N de los cuatro cultivos principales de Argentina. En las estimaciones de la **Figura 2**, se descontó un 50% de la extracción del N en el grano de soja que sería aportado por la FBN.

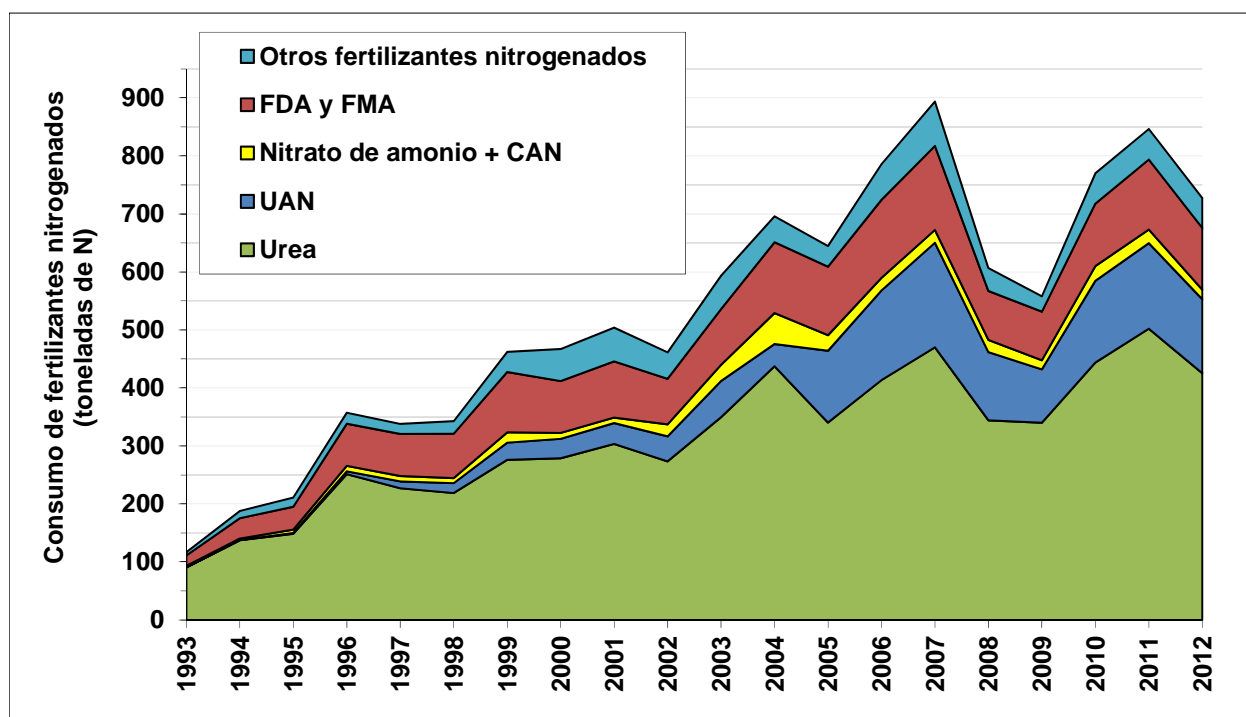


Figura 1. Evolución del consumo estimado de fertilizantes nitrogenados, en toneladas de nutriente N, en Argentina para el período 1993-2012. Fuente: Fertilizar Asociación Civil.

Tabla 1. Consumo de N como fertilizante para los principales cultivos de grano en Argentina. Campaña 2011/12. Fuente: Fertilizar Asociación Civil.

Cultivo	Área (ha)	Porcentaje Área Fertilizada (%)	Dosis nutriente (kg/ha)	Consumo (t N)
Trigo	4.608.749	84	57	218.881
Cebada	1.202.717	94	53	59.456
Maíz	4.777.721	75	76	271.955
Girasol	1.813.169	34	35	21.757
Sorgo	1.437.784	67	43	41.319
Todos	32.202.638	74	62	613.368

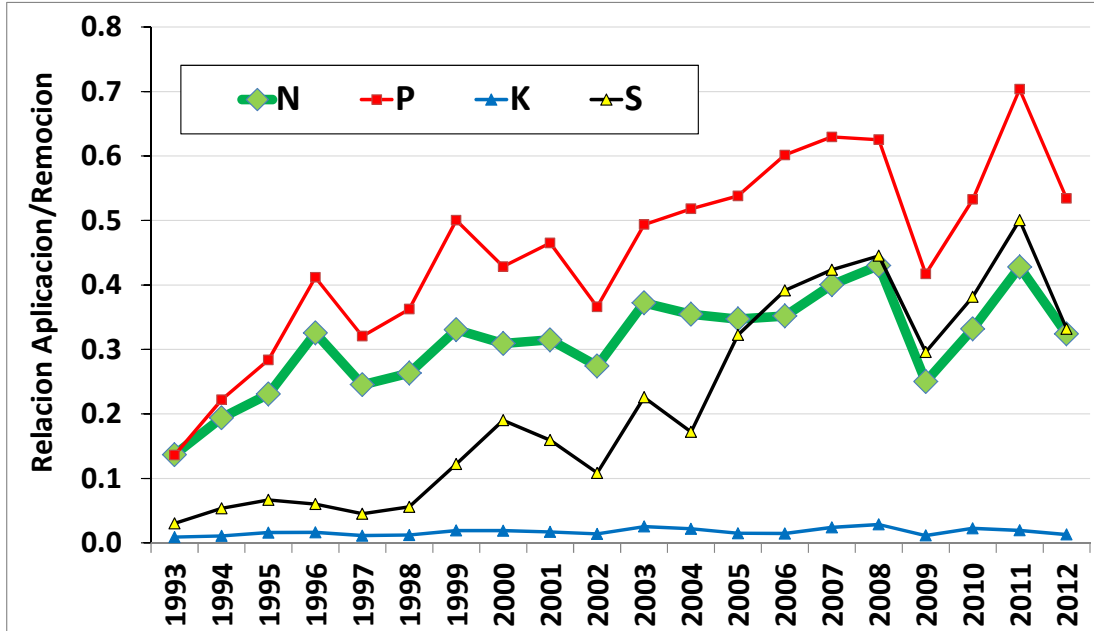


Figura 2. Evolución de la relación aplicación/remoción de N, P, K y S, aplicados como fertilizantes en los cuatro principales cultivos de grano, en Argentina para el período 1993-2012. En estas estimaciones, se descontó un 50% de la extracción del N en el grano de soja, considerando que la fijación biológica de N aporta esa cantidad de N al grano.

¿Con qué eficiencia estamos usando el N en la producción de granos en el país?

A escala de país, la eficiencia de uso de los nutrientes aplicados vía fertilizantes puede evaluarse a través de indicadores como el balance parcial de nutrientes (BPN) y la productividad parcial del factor (PPF), N en este caso. El BPN es la relación entre los kg de nutriente extraído y los kg de nutriente aplicado, mientras que la PPF es la relación entre la producción de grano y la cantidad de nutriente aplicado (Dobermann, 2007).

Las estimaciones de BPN muestran que, en el caso de los cereales, a través de los últimos años, los valores se han ido acercando al nivel de 1, considerado adecuado según las referencias, mientras que el valor es aún muy alto para girasol (BPN cercanos a 3) (**Tabla 2, Figura 3**). Los valores de PPF para trigo se encuentran dentro del rango de 40 a 80 kg de grano por kg N, considerado óptimo a nivel mundial para cereales (Snyder y Bruulsema, 2007). Para maíz, los valores de PPF son algo elevados, indicando que probablemente el cultivo aún se abastezca de N de la fracción orgánica de los suelos, acentuando la degradación de la fertilidad

de los suelos. La PPF para N en maíz en EE.UU. se estima entre 60 y 70 kg de maíz por kg N. Valores elevados de PPF se asocian con bajos valores de BPN, por lo que, probablemente, la situación de mayor sustentabilidad se logre con valores intermedios para ambos índices: levemente mayores o iguales a 1 kg N extraído/kg N aplicado para BPN y el rango mencionado de 40-80 kg por kg N para PPF.

Los índices de eficiencia de uso de nutrientes, en particular N, deben utilizarse en forma combinada para conocer mejor el funcionamiento del sistema. Si bien a nivel macro el BPN y la PPF son los de más sencilla estimación, a nivel más detallado la eficiencia agronómica (EA, kg incremento en rendimiento por kg nutriente aplicado) y la eficiencia de recuperación (ER, kg incremento de nutriente absorbido por kg nutriente aplicado) son otros índices que pueden contribuir significativamente a definir la eficiencia de uso de los nutrientes en nuestros sistemas de producción. En cereales, se consideran adecuados valores de 10 a 30 kg grano/kg N aplicado para EA, y de 0.5 a 0.8 kg N absorbido/kg N aplicado para ER (Dobermann, 2007; Snyder y Bruulsema, 2007). Es difícil establecer un valor de EA y ER de N a nivel nacional porque se estiman comparando rendimientos y absorción de N de cultivos fertilizados con los de cultivos sin fertilizar. Es posible contar con este tipo de información experimental de ensayos en los cuales se puede realizar esta estimación. A modo de ejemplo, la **Tabla 3** incluye ejemplos de EA y ERN en trigo y maíz de diversas experiencias realizadas en el ámbito nacional. Los valores de EA informados se encuentran dentro del rango indicado como adecuado, pero obviamente los mismos varían fuertemente con la condición de fertilidad del sitio, el ambiente de producción del cultivo y las dosis de N evaluadas en los ensayos. Así, el amplio rango observado en algunos valores puede deberse a contrastes entre producción de secano y de riego (Gregoret et al., 2006), o dosis de N (Pagani et al., 2009). Los reportes de ER son de mucha menor frecuencia al requerir la determinación de la absorción de N en condiciones sin y con fertilización. Los aquí informados se ubican dentro de los valores indicados por la literatura (Ladha et al., 2005).

Tabla 2. Indicadores de eficiencia de uso de N en cultivos de grano en Argentina, promedios del trienio 2010-12. Elaborado a partir de información de MAGPyA y Fertilizar AC.

Cultivo	Balance parcial de N		Productividad parcial del factor N	
	Referencia ¹	Argentina	Referencia ²	Argentina
	<i>kg N extraído/kg N aplicado</i>		<i>kg grano/kg N aplicado</i>	
Cultivos de grano ³	-	2,8	-	139
Maíz	Algo mayor a 1	1,4	40-80	108
Trigo	Algo mayor a 1	1,3	40-80	72
Girasol	Algo mayor a 1	3,3	-	154

¹Snyder y Bruulsema (2007), ² Doberman (2007), ³ incluye soja considerando que 50% del N del grano proviene de la fijación biológica de N.

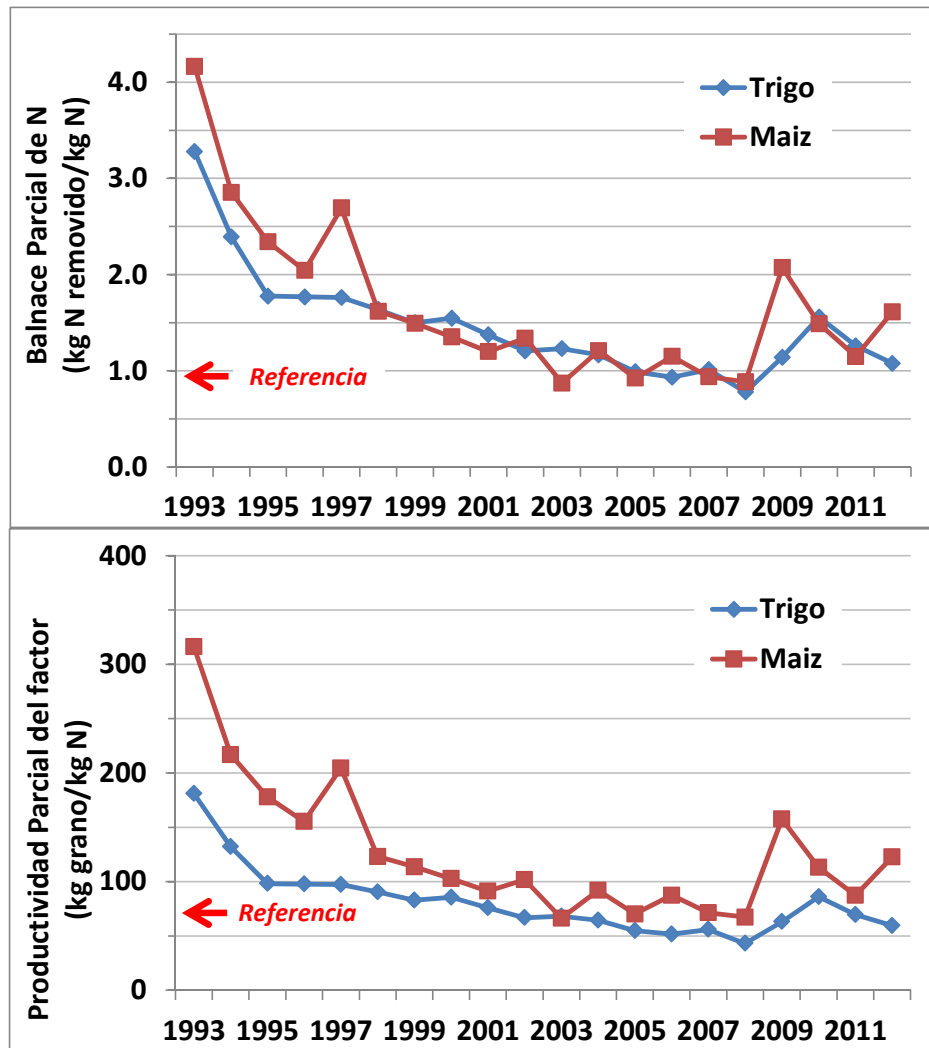


Figura 3. Evolución del BPN (superior) y la PPF (inferior) de N estimados para trigo y maíz en Argentina en el período 1993-2012.

Tabla 3. Eficiencia agronómica (EA) y eficiencia de recuperación (ER) de N para experimentos a campo a nivel nacional.

Cultivo/Zona	EA	ER	Fuente
	<i>Incremento en rendimiento/kg N aplicado</i>	<i>kg N absorbido/kg N aplicado</i>	
Maíz Sudeste de Buenos Aires	20-42	0.63-0.96	Sainz Rozas et al., 2004
Maíz Centro de Córdoba	23-71	-	Gregoret et al., 2006
Maíz Buenos Aires	17-22	0.48-0.60	Rimski-Korsakov et al., 2008
Maíz Sudeste de Buenos Aires	15-35	0.25-0.50	Barbieri et al., 2010
Maíz Sur de Santa Fe-Sudeste de Córdoba	13-31	-	García et al. (2010)
Maíz Sudeste de Buenos Aires	14-19	-	Divito et al., 2011
Maíz Sur de Santa Fe	15-28	-	Salvagiotti et al. (2011)
Maíz Sur de Santa Fe	17-27	0.46-0.60	Salvagiotti et al. (2012)
Maíz Sudeste de Córdoba	23-27	-	Muñoz y Zorzin, 2013
Trigo Sur de Santa Fe	11	0.47	Salvagiotti et al. (2009)
Trigo Buenos Aires	12-45	-	Pagani et al., 2009
Trigo Región Pampeana Arenosa	9	-	Barraco et al., 2009
Trigo Región Pampeana	11-16	-	Ferrari et al., 2010
Trigo Sudeste de Buenos Aires	21-28	-	Divito et al., 2011
Arroz Entre Ríos	15-49	0.45-0.83	Quintero et al., 2011
Cebada Buenos Aires	13	0.48	Lazzari et al., 2005
Colza Buenos Aires	16	0.73	Rubio et al., 2007
Sorgo Centro de Santa Fe	23-32	-	Fontanetto et al., 2010

Consumo proyectado de N en Argentina

Considerando la línea de base 2010 y la proyección de área y producción de granos propuesta en el Plan Estratégico Agroalimentario y Agroindustrial (PEA2, Minagri) para el 2020, se pueden plantear dos escenarios de consumo de N en los principales cultivos de grano (**Tabla 4**). El Escenario A contempla un manejo de N similar al actual en cuanto a dosis por ha y porcentaje de área fertilizada, mientras que el Escenario B incluye un incremento en la dosis para alcanzar valores de BPN y PPF cercanos a los recomendados por las referencias y un incremento en el porcentaje de área fertilizada por una menor oferta de N de los suelos. Ambos escenarios resultan en incrementos significativos en el consumo de fertilizantes nitrogenados, 86% de aumento para el Escenario 2020A y 187% de aumento para el Escenario 2020B.

La **Tabla 5** muestra el BPN y la PPF de N estimados para la línea de base 2010 y las metas 2020 del PEA2. Los estimados de BPN son mayores a 1 para la línea de base 2010 y mejorarían a niveles más cercanos a 1 en girasol y maíz y a 1 en trigo para el Escenario 2020B. Las PPF son elevadas para maíz y girasol en la línea de base 2010 y mejoran sustancialmente en el Escenario 2020B para los dos cultivos, para el caso de trigo la PPF en el Escenario 2020B sería similar al línea de base 2010. En el escenario 2020A, de lograrse la producción y los rendimientos esperados con los consumos de N indicados, los valores estimados de BPN y PPF muestran que se habrá provisto al cultivo, en gran parte, de N proveniente de la materia orgánica (MO), lo que seguramente genere un impacto no deseado sobre el recurso. Las diferencias observadas entre estos valores de BPN y PPF para la línea de base 2010 y las indicadas en la **Tabla 2**, resaltan la urgente necesidad de contar con relevamientos más precisos en cuanto al uso de nutrientes por cultivo y por zona en el país, una deuda significativa si se pretende hacer un uso sustentable de los recursos naturales.

Tabla 4. Proyección de consumo de N según áreas y rendimientos de cultivos previstos en el PEA2 para 2020. Los datos de 2010 corresponden a la línea de base del PEA2. La información de dosis de N y porcentaje de área fertilizada para 2010 fue proporcionada por Fertilizar Asociación Civil.

Cultivo	Rendimiento (kg/ha)		Superficie (millones ha)		Producción (millones ton)		Dosis N (kg/ha)			Porcentaje área fertilizada (%)			Consumo (ton)		
	2010	2.020	2010	2020	2010	2020	2010	2020A	2020B	2010	2020A	2020B	2010	2020A	2020B
Girasol	1.490	2167	1,5	2,4	2,2	5,2	35	35	40	34%	34%	60%	17.850	28.560	57.600
Maíz	7.810	9766	2,9	4,7	22,7	45,9	76	76	120	75%	75%	90%	165.300	267.900	507.600
Soja	2.900	3302	18,1	21,5	52,7	71,0	0	0	0	0%	0%	0%	0	0	0
Trigo	2.680	3268	3,3	7,1	8,8	23,2	57	57	65	84%	84%	90%	158.004	339.948	415.350
Total			25,8	35,7	86,4	145,3							341.154	636.408	980.550

Tabla 5. Índices de eficiencia de uso de N, balance parcial y productividad parcial del factor, estimados para la línea de base 2010 y las metas 2020 del PEA2.

Cultivo	Balance Parcial de N (BPN) (kg N removido/kg N aplicado)			Productividad Parcial del Factor N (PPF) (kg grano/kg N aplicado)		
	2010	2020A	2020B	2010	2020A	2020B
Girasol	1,58	2.33	1.16	123	182	90
Maíz	1,77	2.20	1.16	137	171	90
Trigo	1.00	1.22	1.00	56	68	56

Emisiones de N₂O: Impacto de la agricultura y los fertilizantes nitrogenados

Las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI) se han estimado en 49 Gt CO₂-eq por año hacia 2004, de las cuales 13.5% son emitidas por la agricultura (**Figura 4**) (*Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC, 2007*). El N₂O es uno de los principales GEI junto con el dióxido de carbono (CO₂) y el metano (CH₄). Si bien las emisiones de N₂O son mucho menores que las de CO₂, representa el 7.9% de los GEI, el N₂O presenta un efecto de calentamiento 296 veces superior al del CO₂.

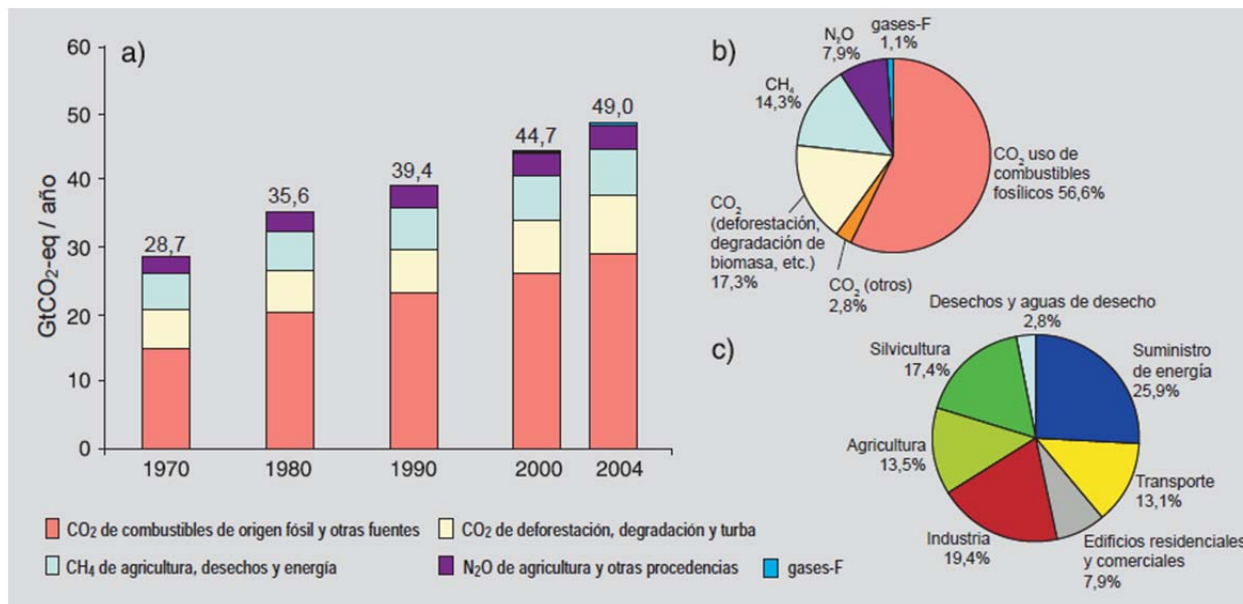


Figura 4. Emisiones anuales mundiales de GEI antropógenos entre 1970 y 2004 (a), parte proporcional que representan diferentes GEI antropógenos respecto de las emisiones totales en 2004, en términos de CO₂ equivalente (b), y parte proporcional que representan diferentes sectores en las emisiones totales de GEI antropógenos en 2004, en términos de CO₂ equivalente (En el sector silvicultura se incluye la deforestación) (c). Tomado de IPCC (2007).

De acuerdo con la Segunda Comunicación Nacional del Gobierno Argentino a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, en el año 2000 (último año informado), las emisiones de GEI de la Argentina fueron de 238.702,9 Gg CO₂-eq. La agricultura argentina (agricultura y ganadería) ha sido responsable, en año 2000, del 43% del total de emisiones del país. De este 43%, la producción agrícola emitió un 21% (mayormente N₂O) mientras que la ganadería un 22% (mayormente CH₄). Este inventario excluye al cambio de uso de la tierra (Gobierno Argentino, 2007; Taboada y Cosentino, 2011). A nivel mundial, la agricultura es responsable de la emisión del 58-62% del N₂O (IPCC, 2007).

El N₂O es el principal gas emitido por la agricultura mundial y argentina (Taboada y Cosentino, 2011). Se origina a partir del N que entra anualmente a los suelos agrícolas cuyas

fuentes más importantes son los fertilizantes sintéticos y los residuos de los cultivos. En ganadería, el aporte del estiércol y la orina de los animales constituye una importante fuente de N.

La emisión de N_2O a partir de estas fuentes se produce en forma natural en los suelos como producto intermedio o secundario de los procesos microbianos de nitrificación y desnitrificación. La nitrificación es la producción de nitratos a partir de amonio, el cual puede provenir de la mineralización del N orgánico o de fuentes amoniacaes aplicadas al suelo, como la urea u otros fertilizantes amoniacaes. La desnitrificación es la reducción de los nitratos con producción de N en varias formas gaseosas, entre las que se encuentra el N_2O , que ocurre en condiciones anaeróbicas o de anaerobiosis parcial.

Los procesos de nitrificación y desnitrificación en el suelo constituyen las emisiones directas de N_2O . Se consideran emisiones indirectas aquellas que incluyen al N_2O generado por deposición de amoníaco volatilizado desde fertilizantes u orina animal, o por lixiviación de nitratos en profundidad. En general, se considera que las emisiones directas son cuantitativamente más importantes, aun cuando existe discrepancia respecto al tema (Taboada y Cosentino, 2011).

Las emisiones de N_2O varían fuertemente según distintos factores que afectan los procesos de nitrificación y desnitrificación: abundancia de nitratos, contenido de agua del suelo, contenido de carbono del suelo, clima, textura y porosidad del suelo, drenaje, pH, sistema de labranza, dosis, momento, ubicación y fuente de N aplicado a través de los fertilizantes y otros abonos, y tipo de cultivo, entre otros (Snyder et al., 2009). Debido a los numerosos factores que las afectan, las emisiones presentan una alta variabilidad espacial y temporal y, en determinaciones a campo, se reportan coeficientes de variación típicamente del 100% al 300%.

IPCC (2006) ha propuesto un coeficiente del 1% del N de fertilizante emitido como N_2O , y es este valor el que se usa en las estimaciones de emisión a nivel mundial. Este valor varía ampliamente según la región del mundo, condiciones ambientales y manejo del sistema de cultivo, indicándose un rango de incertidumbre de 0.3% a 3%. A nivel global, se considera que los fertilizantes nitrogenados contribuyen al 23% de la emisión total de N_2O (IFA/FAO, 2001; citado por Snyder et al., 2009), pero el nivel de contribución varía regionalmente de acuerdo al volumen y eficiencia de uso de los fertilizantes nitrogenados.

En Argentina, la Segunda Comunicación Nacional indica que el año 2000 un 12% de la emisión de N_2O provino del uso de fertilizantes nitrogenados. Este cálculo fue realizado sobre la base del total de N incorporado a los suelos como fertilizante, que sumando sus diferentes fuentes (urea, UAN, etc.) en 2000 fueron 459.290 toneladas. La proporción de N_2O proveniente de los fertilizantes era sólo 2% en 1990, cuando el total de N aplicado como fertilizante era 84.671 toneladas. La Segunda Comunicación Nacional se realizó siguiendo los protocolos de

IPCC (1997, 2001), con factores de emisión por defecto establecidos para el caso de N₂O, para suelos de clima templado, de 1,25 %, una emisión de 0,0125 kg N₂O por cada kg que entra al suelo de N mineral. Cabe destacar que la nueva metodología de IPCC (2007), aún no utilizada en las Comunicaciones Nacionales, ha disminuido ese valor por defecto a 1%. Como es sabido, la cantidad de N via fertilizantes se incrementó hasta un máximo en 2007 de 923.308 de ton, llegando a 770.108 de ton en 2010. Dado que también aumentó la cantidad de residuos incorporados de los cultivos, la proporción de N de los fertilizantes, y por ende de N₂O emitido, no se alteró sustancialmente luego de 2000.

Además, otro inconveniente de la metodología utilizada (IPCC, 1997), es que ésta contemplaba cuatro fuentes principales de N para el cálculo de las emisiones directas: (i) los fertilizantes sintéticos; (ii) el manejo del estiércol y orina animales; (iii) los cultivos fijadores de N (soja, alfalfa, etc.); y (iv) el enterramiento en el suelo de los residuos de los cultivos. La nueva metodología de IPCC (2007) producirá algunos cambios en la contabilización de las fuentes de N, dado que se suprime la fijación biológica como una de las fuentes de N pasible de ser luego emitido, y se incluyen otras fuentes de N como el aportado por heces y orina de animales en pastoreo, y el aportado por la mineralización del N presente en la materia orgánica del suelo. De este modo, las fuentes de N a prestar atención en la agricultura argentina son las siguientes:

1. fertilizantes sintéticos (FSN)
2. N presente en heces y orina depositado en las pasturas por los animales en pastoreo (FPRP);
3. N en residuos de biomasa aérea y subterránea, incluyendo a cultivos no fijadores y fijadores de N y las forrajeras durante la renovación de las pasturas (FSR).
4. mineralización del N asociada con la pérdida de materia orgánica que resulta del cambio de uso de la tierra, o el manejo de los suelos minerales (FSOM).

Dos factores de emisión son requeridos para estas fuentes:

- FE1: se refiere a la cantidad de N₂O emitido a partir de N en fertilizantes, en residuos y el mineralizado desde la materia orgánica. A la luz de nueva evidencia, este valor fue modificado respecto del anterior. Se establece un valor por defecto de 1 % (0,01) con un rango de incertidumbre de 0,003 – 0,03.
- FE3PRP: estima las emisiones de N₂O emitidas a partir desde la orina y las heces de animales en pastoreo. En el caso de ganado vacuno el valor por defecto FE3PRP,CPP es 0,02 (0,007-0,06). En el caso de ganado ovino y otros animales, el valor por defecto FE3PRP,SO es 0.01 (0.003 – 0.03).

Se incluye también el N mineralizado resultante de la pérdida de stocks de C orgánico en suelos minerales debido al cambio de uso de la tierra o de prácticas de manejo.

La **Figura 5** muestra una simple aproximación de lo que probablemente será considerado en la futura Tercera Comunicación Nacional. No es seguro que la disminución de emisiones de N_2O , respecto de la Segunda Comunicación, sea de magnitud pues el futuro inventario deberá incluir también el cambio de los stocks de carbono en el suelo, debido a los cambios de uso de la tierra que tuvieron lugar en el país en los últimos 15 años (i.e. expansión de la frontera agropecuaria), así como también la influencia del N que aportan los animales en pastoreo.

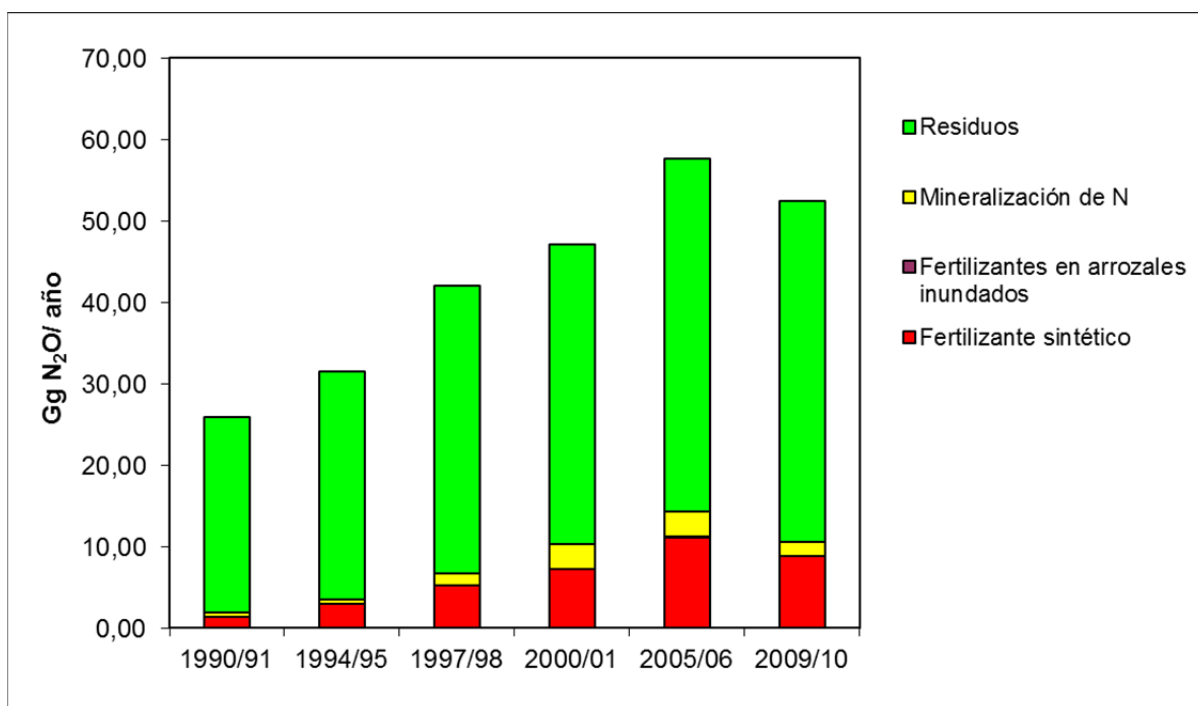


Figura 5. Participación de los residuos de las cosechas, la mineralización de materia orgánica y los fertilizantes minerales en las emisiones (Taboada y Cosentino, 2011).

¿Cómo podemos mejorar la eficiencia de uso del N aplicado como fertilizante y mitigar las emisiones de N_2O ?

Los GEI generados por la agricultura son producidos por mecanismos complejos y heterogéneos. Sin embargo, el manejo del sistema agrícola brinda posibilidades para la mitigación, ya que muchas de las tecnologías conocidas actualmente podrían aplicarse para reducir la emisión de GEI: manejo de tierras y suelos, manejo del pastoreo, restauración de suelos degradados, gestión de biosólidos y producción de bioenergía. Frecuentemente, la implementación de prácticas de manejo afecta diferencialmente la emisión de los distintos GEI,

por lo que se debe considerar el efecto neto de la practica en la emisión global de GEI (Flynn y Smith, 2010).

La búsqueda de la sustentabilidad de los sistemas agrícolas implica la consideración de los aspectos económicos, ambientales y sociales, ente los que se incluye la mitigación de emisiones de GEI. Una agricultura sustentable requiere del uso adecuado de tierras (ordenamiento territorial), el mantenimiento y/o mejoramiento de los recursos suelo, agua y aire, la reducción de impactos ambientales negativos, y el desarrollo económico y social de las comunidades involucradas en el proceso productivo. El concepto de intensificación sustentable, o intensificación productiva sustentable, está alineado dentro del marco de agricultura sustentable con un foco en el incremento de la producción sin aumentar la superficie cultivada, para satisfacer las crecientes demandas globales con mínimo impacto ambiental y buscando el desarrollo social, a través de distintos enfoques alternativos y/o complementarios (Matson et al., 1997; Cassman, 1999; Caviglia y Andrade, 2010; Godfray et al., 2010; FAO, 2011; Tilman et al., 2011; Garnett et al., 2013).

Para una intensificación productiva sustentable, las eficiencias de uso de los recursos e insumos involucrados deben maximizarse, siendo el N un recurso e insumo esencial para alcanzar altos rendimientos. La adopción de mejores prácticas de manejo (MPM) de nutrientes y fertilizantes siguiendo el Manejo Responsable de los 4Rs (los cuatro requisitos) permite generar mayores eficiencias de uso de los nutrientes disponibles y/o aplicados (IPNI, 2013). La adopción de la dosis correcta aplicada con la fuente correcta, en el momento correcto y la ubicación correcta permite maximizar la producción y la eficiencia de uso de otros recursos e insumos, mantener y/o mejorar la fertilidad de los suelos y evitar problemas de contaminación de aguas, suelos y aire.

En las siguientes secciones se discuten algunos aspectos del ciclo del N en agroecosistemas y las MPM de N evaluadas en la producción de cultivos de grano en el país, relacionados a la eficiencia de uso de N y su posible mejora.

El ciclo del nitrógeno

El ciclo del N se puede evaluar a distintas escalas, desde un nivel global hasta un nivel micro (por ej., la rizósfera de una planta). A escala de cultivos, sistema suelo-planta-atmosfera, existe abundante información en el país. En general, estos trabajos abordan un proceso dentro del ciclo del N (por ej., Picone et al., 1997; García et al., 1999; Racca et al., 2001; Sainz Rozas et al., 2001; Zubillaga et al., 2002; Portela et al., 2006; Collino et al., 2007; Rimski-Korsakov et al., 2007a, b y 2008; Aparicio et al., 2008; Ciampitti et al. 2008), o varios procesos y el balance de N del sistema (Videla et al., 1996; Sainz Rozas et al., 2004; Álvarez y Steinbach, 2006 a y b; Álvarez et al., 2007; Bianchini et al., 2008).

En el manejo de fertilizantes nitrogenados, es de gran importancia conocer el destino final y, por ende, la eficiencia de uso del N aplicado. La **Tabla 6** sintetiza información sobre el destino del N aplicado como fertilizante en cultivos anuales en la región pampeana. Se recomienda consultar la revisión de Lavado et al. (2007) para un mayor detalle de los diferentes procesos del N y su cuantificación para la región. Desde el punto de vista ambiental, el N está involucrado tanto en la emisión de N₂O, como así también en la contaminación de aguas superficiales y subterráneas debido al lavado y escurrimiento de nitratos, por lo que las MPM que mitiguen las emisiones también reducirán los impactos negativos en aguas.

Tabla 6. Principales destinos del N de fertilizante y rangos reportados en la región pampeana, expresados en porcentaje del N aplicado a cultivos de maíz y trigo (Adaptado de Lavado et al., 2007).

Destino	Rango	Referencias
Planta	35 al 80%	Melaj et al. 2003; Portela et al. 2006; Rillo y Richmond 2006; Rimski-Korsakov et al. 2008
Materia orgánica	7 al 29%	Sainz Rozas et al. 2004; Portela et al. 2006 ; Rimski-Korsakov et al. 2008;
Volatilización	1.1 al 30%	Videla et al., 1996; García et al. 1999; Fontanetto et al., 2001; Sainz Rozas et al. 2004; Rimski-Korsakov et al. 2007a
Desnitrificación	0.13 al 6.9%	Palma et al. 1997; Picone et al. 1997; Sainz Rosas et al. 2001; Ciampitti et al. 2008
Lixiviación	<0.01 al 23%	Rimski-Korsakov et al., 2004 ; Sainz Rozas, et al. 2004; Portela et al., 2006 ; Aparicio et al., 2008

Mejores prácticas de manejo de fertilizantes nitrogenados

Se han realizado numerosas investigaciones y experiencias evaluando dosis, formas, momentos y fuentes de N adecuadas para el manejo de fertilizantes nitrogenados, de las cuales, al igual que en la sección anterior, se pueden citar algunas a modo de referencia: González Montaner et al. (1991 y 1997), Berardo (1994), García y Fabrizzi (1998), Ruiz et al. (2001), Satorre et al. (2001), Melchiori (2012), Álvarez et al. (2003), Bergh et al. (2003), Melaj et al. (2003) y Sainz Rozas et al. (2008). Los trabajos de Álvarez (2005) y García y Daverede (2007) presentan una síntesis del diagnóstico de la fertilización nitrogenada en maíz y trigo. El libro de Prystupa (2007) compila la información existente en cuanto a fuentes, formas y momentos de aplicación.

La investigación y experimentación es constante y necesaria para generar información en las distintas zonas y desarrollar MPM de acuerdo a los cultivos, rotaciones, tipos de suelos y condiciones climáticas. Una breve síntesis de las MPM para la fertilización nitrogenada de maíz y trigo incluye:

- **Dosis correcta de N.** Los umbrales críticos de disponibilidad de N a la siembra (N-nitratos suelo, 0-60 cm, + N fertilizante) constituyen el método más difundido para determinar las necesidades de N de maíz y trigo. Estos umbrales varían según el cultivo, la zona y el nivel de rendimiento objetivo.

En maíz, las evaluaciones de resultados experimentales más recientes indican que disponibilidades de 150-170 kg N ha⁻¹, según el potencial de rendimiento, maximizan el beneficio económico de la fertilización nitrogenada (Álvarez et al., 2003; García et al., 2010).

En trigo, se pueden mencionar umbrales de 175 kg/ha para alcanzar rendimientos de 6000 kg/ha en el sudeste de Buenos Aires (Información CREA Mar y Sierras), y de 130-140 kg/ha para rendimientos de 4000 kg/ha en el sur de Santa Fe (García et al., 2010). En ensayos recientes, Barbieri et al. (2008b) determinaron umbrales de 152 y 126 kg N/ha al momento de la siembra y al macollaje, respectivamente, para alcanzar el 95% del rendimiento máximo (promedios de 5000-5500 kg/ha) en el sudeste de Buenos Aires.

El uso de modelos de simulación es una alternativa de interés para incluir características específicas de suelo, fertilización nitrogenada, manejo de cultivo y de riesgo climático. El software *Triguero*, y su contraparte *Maicero*, (Satorre et al., 2005 y 2006) ha sido ampliamente evaluado y puede ser utilizado como una herramienta adicional para la toma de decisión en distintas regiones trigueras.

Otras metodologías alternativas, frecuentemente complementarias al análisis de N-nitratos en pre-siembra, son la evaluación de i) N-nitratos en V5-6 para maíz, ii) de nitratos en jugo de pseudotallos de trigo al macollaje o en jugo de base de tallos de maíz en V5-6, iii) el índice de verdor a través del clorofilometro Minolta SPAD 502, y iv) el NDVI determinado por sensores remotos como el GreenSeeker® que se puede utilizar para aplicaciones variables de N en tiempo real. La determinación de N mineralizado en incubaciones anaeróbicas cortas (Nan) es una medida promisoría para diferenciar suelos de acuerdo a su capacidad de mineralización de N durante el ciclo del cultivo (Sainz Rozas et al., 2008).

- Momento correcto de aplicación de N. En trigo, las aplicaciones de N a la siembra del cultivo generalmente resultan en eficiencias de uso similares o superiores que las de aplicaciones al macollaje, en situaciones de baja ocurrencia de precipitaciones durante el período siembra-fin de macollaje. Esta situación es común para una gran parte de la región triguera argentina. Sin embargo, en regiones con excesos hídricos a la siembra y/o probabilidad de precipitaciones elevadas durante el período siembra-fin de macollaje, las aplicaciones diferidas al momento de macollaje pueden presentar una mayor eficiencia del N aplicado resultando en mayores rendimientos y menores pérdidas de N que las aplicaciones a la siembra. Al respecto, Reussi Calvo y Echeverría (2006) estimaron que se pueden registrar excesos hídricos durante el período siembra-macollaje que generen pérdidas de N por lavado en un 33% y 35% de los años, en Balcarce y Tres Arroyos, respectivamente.

En maíz, las aplicaciones en V5-6 resultan generalmente en eficiencias de uso de N mayores que las aplicaciones a la siembra, debido a la alta frecuencia de precipitaciones entre siembra y V5-6. Sin embargo, en situaciones de precipitaciones inferiores a 150-200 mm en dicho período, no se han observado diferencias entre momentos de aplicación (Barraco y Díaz Zorita, 2005). Recientemente, Melchiori (2011) informó incrementos en la eficiencia de uso de N en maíz con aplicaciones postergadas hasta 8-10 hojas.

Otros factores a considerar para la decisión de aplicar el N a la siembra o en forma postergada, macollaje o V5-6, son el rendimiento potencial, la disponibilidad inicial de N y la logística.

- Fuente correcta de aplicación de N. La disponibilidad de fuentes de fertilizantes nitrogenadas en el mercado argentino es amplia y permite la elección de la misma según el precio por unidad de N, la eficiencia de cada fuente según la condición ambiental de aplicación, el abastecimiento y la logística de almacenaje y de aplicación. Las evaluaciones realizadas a campo demuestran que, bajo condiciones adecuadas de manejo para cada fuente, fundamentalmente forma de aplicación, las eficiencias de uso por unidad de N pueden ser similares entre las fuentes más difundidas: urea, nitrato de amonio, UAN, y sulfato de amonio (Keller et al., 1997; Fontanetto et al., 2001).
- Forma correcta de aplicación de N. La forma de aplicación de N más eficiente es la incorporación. Sin embargo, las distintas fuentes de N permiten alcanzar eficiencias de uso similares en aplicaciones superficiales (al voleo) cuando se controlan o se conocen algunos factores relacionados con el clima (temperatura, humedad, precipitaciones) y el manejo del suelo (presencia de residuos). Estas diferencias se deben fundamentalmente a la potencial ocurrencia de pérdidas de amoníaco por volatilización a partir de aplicaciones superficiales de urea o fertilizantes que la contengan. Así, aplicaciones superficiales de urea con temperaturas medias del aire inferiores a los 15°C, frecuentemente muestran respuestas a N similares a las aplicaciones incorporadas. Aplicaciones de N como UAN chorreado en superficie son más eficientes que las aplicaciones del mismo producto pulverizado (García et al., 1999). El uso de inhibidores de la enzima ureasa como el nBTPT (comercialmente Agrotain®), permite obtener adecuadas eficiencias de uso de N en aplicaciones superficiales de urea al disminuir marcadamente las pérdidas por volatilización de amoníaco (Ferraris et al., 2009; Barbieri et al., 2010; Salvagiotti et al., 2012).

Es importante entender que las MPM no son independientes unas de otras, es decir que la mejor fuente corresponde a un determinado momento y determinada ubicación del fertilizante. Así, por ejemplo, en un maíz al estado de 5-6 hojas se podría recomendar la aplicación de urea si la misma es incorporada o si se adiciona un inhibidor de ureasa cuando es

aplicada al voleo en superficie, pero no se recomendaría si se aplica superficialmente sin inhibidor por las pérdidas potenciales de N por volatilización de amoníaco.

¿Cuál puede ser el impacto de la adopción de MPM de fertilizantes nitrogenados en las emisiones de N₂O?

La mayor eficiencia de uso de N, y la consiguiente mitigación de emisiones de N₂O, depende de muchos factores de manejo de suelos y cultivos y de la interacción entre ellos. Por lo tanto, la cuantificación del impacto de MPM sobre la eficiencia de uso de N, y eventualmente sobre la emisión de GEI, es difícil de estimar porque el mismo depende de la situación de base que se considere y las MPM que se implementan, individualmente o en conjunto. Las estimaciones de las eficiencias de uso de N ante distintas prácticas se pueden realizar a partir de las investigaciones realizadas a campo o a partir de modelos calibrados y validados para las condiciones locales. Dichas estimaciones se pueden plantear a escala regional/nacional a manera de hipótesis de trabajo. La **Tabla 7** lista una serie de prácticas de manejo que pueden contribuir a mejorar la eficiencia de uso de N y a mitigar las emisiones de N₂O.

Sin lugar a dudas, la implementación de MPM del cultivo y del suelo permitirá reducir la emisión de N₂O por unidad de producto cosechado al incrementar el uso de recursos e insumos. Ese debe ser uno de los objetivos para los sistemas de producción en una agricultura sustentable que provea a la seguridad alimentaria con el menor impacto ambiental y social. Un ejemplo de los efectos de MPM del suelo y del cultivo sobre emisiones de N₂O se puede observar en la **Tabla 8** que muestra datos preliminares correspondientes a la campaña 2011/12 del cultivo de maíz en Balcarce (Buenos Aires). Estas determinaciones se realizaron en el marco del proyecto de Intensificación Sustentable de la Producción de Granos de INTA-FCA Balcarce-FONCyT-IPNI-Fertilizar. El sistema de producción intensificado registró similares ($p > 0.05$) emisiones acumuladas de CO₂ y N₂O durante un período de 146 días que el sistema de manejo actual, predominante en la zona. Considerando las diferencias en rendimiento del cultivo y de dosis de N aplicada, el manejo intensificado tendió a producir más maíz por unidad de N₂O emitido y a emitir menos N₂O por kg de N aplicado como fertilizante.

Recientemente, dos trabajos argentinos muestran que las emisiones de N₂O medidas durante el invierno pueden ser muy bajas, debido a la limitación de procesos microbianos. En la Pampa Semiárida, ello sucede por los bajos niveles de humedad edáfica y la falta de lluvias (Álvarez et al. 2012), mientras que en la Pampa Ondulada, por temperaturas de suelos inferiores a 15°C (Cosentino et al. 2013).

Tabla 7. Prácticas de manejo que pueden contribuir a mejorar la eficiencia de uso de N y a mitigar las emisiones de N₂O.

Práctica	Referencias
Rotaciones	Studdert et al., 1997; Díaz Zorita et al., 2002; MinCyT, 2012
Integración de agricultura con ganadería en pastoreo	Franzluebbers et al. 2013
Cultivos de cobertura que provean carbono y N	Capurro et al., 2010; Cordone, 2011
Fijadores simbióticos en soja y otras leguminosas	Racca et al., 2001; Collino et al., 2007
Empleo de promotores de crecimiento y fijadores libres de N	Ferraris et al., 2008; Díaz Zorita y Fernández Caniggia, 2009
Correcto manejo del cultivo (fecha y densidad de siembra, arreglo espacial)	Barbieri et al., 2008a
Manejo integrado de plagas, malezas y enfermedades	Carmona y Sautua, 2011
Asegurar la adecuada disponibilidad de otros nutrientes potencialmente deficitarios (fósforo, azufre, otros)	Rubio et al., 2007; Salvagiotti et al., 2009; Fontanetto et al., 2010
Uso de análisis de suelo pre-siembra	González Montaner et al., 1991; Álvarez, 2008; Pagani et al., 2008; Barbieri et al., 2009; Ferrari et al., 2010; Salvagiotti et al., 2011
Uso de análisis de suelos en macollaje de trigo o V5-6 de maíz	Barraco y Díaz Zorita, 2005; Pagani et al., 2008; Barbieri et al., 2009
Uso de modelos de simulación para la recomendación de dosis	Satorre et al., 2005 y 2006; Mercau, 2010
Uso de sensores locales y remotos para aplicación variable	Ferrari et al., 2010; Melchiori, 2011
Tecnologías de agricultura por ambientes	Urricarriet et al., 2004; Gregoret et al., 2006; Ross et al., 2011; Melchiori, 2012; Peralta et al., 2012; Simón et al., 2013, Vázquez Amabile et al., 2013
Calibración de equipos aplicadores de fertilizantes nitrogenados	Martínez Peck y Fernández Poeta, 2009
Aplicación postergada o divida de fertilizantes nitrogenados (sincronización con la demanda del cultivo)	Sainz Rozas et al., 1999; Sainz Rozas et al., 2004; Barbieri et al., 2008b; Melchiori, 2011; Velasco et al., 2012
Uso correcto de fuentes nitrogenadas	Fontanetto et al., 2001; Fontanetto, 2004; Quintero et al., 2011
Uso de inhibidores de la ureasa	Ferraris et al., 2009; Barbieri et al., 2010; Salvagiotti et al., 2012

Tabla 8. Emisiones de N₂O en sistemas de manejo actual y de manejo intensificado durante el ciclo del cultivo de maíz, campaña 2011-12, en Balcarce (Buenos Aires). Fuente: Picone et al. (2013).

Variable	Manejo Actual	Manejo Intensificado
Emisiones de N-N ₂ O (g N-N ₂ O/ha)	227	273
kg maíz/g N-N ₂ O	26	28
g N-N ₂ O/kg N aplicado	5.3	4.1

Una propuesta en la búsqueda de la mitigación de emisiones de N₂O

En términos generales, IPCC (2007) propone como tecnologías de mitigación de GEI para la agricultura *“Mejora de la gestión de las tierras de cultivo y de pastoreo para incrementar el almacenamiento de carbono en el suelo; restauración de suelos turbosos cultivados y de tierras degradadas; mejora de las técnicas de cultivo del arroz, y gestión del ganado y del estiércol para reducir las emisiones de CH₄; mejora de las técnicas de aplicación de fertilizantes nitrogenados, para reducir las emisiones de N₂O; cultivos especializados para la sustitución de los combustibles fósiles; mejora de la eficiencia energética; mejora del rendimiento de los cultivos”*, las cuales pueden ser generadas a través de políticas de *“Incentivos y reglamentaciones financieros para mejorar la gestión de las tierras, el mantenimiento del contenido de carbono en los suelos, la utilización eficiente de los fertilizantes, y la irrigación”*.

A nivel nacional, actualmente se están realizando numerosas determinaciones de emisiones de N₂O y otros GEI bajo diversos sistemas de producción y condiciones de manejo (Ciampitti et al., 2008; Álvarez et al., 2012; Cosentino et al., 2013; Picone et al., 2013). Estas evaluaciones permitirán determinar con mayor certeza los valores reales a campo y las condiciones que los afectan. Sin embargo, la necesidad de plantear alternativas inmediatas para la mitigación de emisiones requiere que se planteen distintas opciones a partir de la información y conocimiento existentes.

La Argentina no podría plantear una reducción en el uso de fertilizantes nitrogenados considerando las metas de producción del PEA2, por el contrario deberá incrementar el uso de los mismos para alcanzar esas metas de producción. Obviamente, sí se debería plantear el uso eficiente del N bajo condiciones actuales y a futuro. Las condiciones futuras implican una mayor emisión absoluta de N₂O pero una menor emisión de N₂O por unidad de producto, por ej., menor emisión por tonelada de grano cosechado. No debiéramos repetir experiencias del siglo pasado, en que la muy baja reposición de nutrientes vía fertilizantes condujo a un importante empobrecimiento de los suelos (Lavado y Taboada, 2009). Resulta notable que aun cuando el

uso de fertilizantes nitrogenados se octuplicó a partir de la década del '90, la proporción con que los fertilizantes participan de la matriz de emisiones de N₂O no superó 12%, valor muy inferior al de otros países de la región, como Brasil y EE.UU. (Gobierno Argentino, 2007).

Los índices de eficiencia de uso actual y proyectado de N de fertilizante a nivel de producción de granos muestran, en general, valores adecuados a las referencias internacionales. Sin dudas, la tarea a resolver es el desbalance que estaría generando la elevada demanda de N del cultivo de soja. La Argentina, sus instituciones, profesionales y productores, deben seguir trabajando en mejorar la eficiencia de uso del N aplicado, así como también del N del suelo y del N proveniente de fijación biológica. Considerando las metas 2020 del PEA2, puede plantearse un escenario de mejoras de eficiencia de uso de N del orden del 5-10% que deberían lograrse utilizando MPMs como las listadas en la **Tabla 7**.

El documento “Evaluación de necesidades tecnológicas ante el cambio climático. Informe final sobre tecnologías para mitigación” del MinCyT (2012), plantea un análisis multicriterio para la priorización de tecnologías agrícolas para la mitigación de emisiones de N₂O que lista en orden de importancia a las rotaciones con gramíneas, la necesidad de investigaciones locales, el uso de factores de crecimiento y mejoradores de la fijación biológica en leguminosas, el uso de fijadores biológicos en gramíneas, la partición de dosis de fertilizante, la incorporación al suelo del fertilizante, el uso de inhibidores de liberación de N, el uso de fuentes nitrogenadas menos volátiles.

Las alternativas planteadas por el documento suman activamente a la mitigación de emisiones de N₂O y deberían ser complementadas con la visión integral del sistema de producción. Este escrito se ha restringido a discutir aspectos relacionados a la emisión de N₂O a partir de fertilizantes nitrogenados. Sin embargo, los fertilizantes nitrogenados solamente representan el 6% y 12% de las emisiones totales de N₂O de la agricultura utilizando directrices IPCC (1996) o IPCC (2006) respectivamente, según estimaciones de MinCyT (2012) (**Tabla 9**).

Nuestra agricultura debe buscar una intensificación sustentable que reduzca el impacto ambiental y social y maximice la productividad del sistema agrícola, incluyendo todas las MPM de suelos y cultivos que contribuyan a este propósito según la condición específica de sitio a nivel de predio, cuenca o región: rotaciones con mayor intensidad de cultivo, prácticas de manejo de suelos que reduzcan la erosión hídrica y eólica y la desertificación, integración de agricultura con ganadería en pastoreo, siembra directa, nutrición de suelos y cultivos, y muchas otras. Estas prácticas deben resultar en una menor emisión de GEI, mayor captura de carbono en los suelos, mayor eficiencia de uso del agua, mayor diversidad y actividad biológica en los suelos, uso adecuado y responsable de agroquímicos, etc.

Finalmente debe enfatizarse la necesidad de que las investigaciones actuales y futuras sobre el ciclo del N integren los procesos, y cuantifiquen las transformaciones del N en los agroecosistemas a escala de lote y cuenca. De esta manera, se podrá contar con información

básica no solo a los efectos de alcanzar una mayor producción y eficiencia de uso del nutriente, sino también para conocer con mayor detalle los impactos ambientales en el uso del N. En estos casos, y teniendo en cuenta las frecuentes limitaciones de orden metodológico y/o económico para investigar en este tema. El sector productivo y el país deberían considerar prioritario el apoyo financiero a estas investigaciones. Los resultados que surjan de ellas servirán de base para generar una estrategia de defensa ante posibles medidas parancelarias por parte de los países compradores de nuestras exportaciones.

Tabla 9. Estimaciones de emisiones de N₂O del sector agrícola estimadas por MinCyT (2012).

Sub-Categoría	IPCC 1996		IPCC 2006		Diferencia
	Millones TnCO ₂ eq	%	Millones TnCO ₂ eq	%	Millones TnCO ₂ eq
La mineralización de N relacionada con la pérdida de materia orgánica	-	0%	2,17	5%	2,17
Cultivos fijadores de N	16,77	26%	-	0%	-16,77
Residuos agrícolas	14,85	23%	11,88	28%	-2,97
Fertilizantes sintéticos ¹³²	4,24	6%	4,77	11%	0,53
Lixiviación	2,22	3%	0,67	2%	-1,56
Deposición atmosférica	0,25	0%	0,25	1%	-
N ₂ O directo de los suelos por los bovinos en pastoreo	14,96	23%	14,96	36%	-
N ₂ O indirecto de los suelos por el estiércol de los bovinos	7,17	11%	3,21	8%	-3,96
N ₂ O directo de los suelos por otras especies en pastoreo	3,34	5%	3,34	8%	-
N ₂ O indirecto de los suelos por el estiércol de otras especies	1,77	3%	0,79	2%	-0,98
Total	65,57		39,86		-23,54

Referencias

- Álvarez C, A Costantini, CR Álvarez, BJR Alves, CP Jantalia, EE Martellotto & S Urquiaga. 2012. Soil nitrous oxide emissions under different management practices in the semiarid region of the Argentinian Pampas. *Nutr. Cycl. Agroecosyst* 94:209-220.
- Álvarez C, Rimski-Korsakov H, Prystupa P y Lavado RS. 2007. Nitrogen dynamics and losses in direct drilled maize systems. *Communication in Soil Science and Plant Analysis* 38 (15-16):2045-2059.

- Álvarez, R. (Ed.). 2005. Fertilización de Cultivos de Granos y Pasturas: Diagnóstico y recomendación en la Región Pampeana. Buenos Aires: Editorial Facultad de Agronomía-Universidad de Buenos Aires.
- Álvarez, R. 2008. Analysis of Yield Response Variability to Nitrogen Fertilization in Experiments Performed in the Argentine Pampas. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39:7, 1235 – 1244.
- Álvarez R y Steinbach HS. 2006a. Salidas de nitrógeno del agrosistema. In: Álvarez R (Ed). *Materia orgánica. Valores agronómicos y dinámica de suelos pampeanos*. EFA, Buenos Aires, Argentina. pp: 99-117
- Álvarez R y Steinbach HS. 2006b. Entradas de nitrógeno al agrosistema. In: Álvarez R (Ed.). *Materia orgánica. Valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos*. EFA, Buenos Aires, Argentina. pp: 93-98
- Álvarez R., H. Steinbach, C. Álvarez y S. Grigera. 2003. Recomendaciones para la fertilización nitrogenada de trigo y maíz en la pampa ondulada. *Informaciones Agronómicas* 18:14-19. INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- Aparicio, V., J. Costa y M. Zamora. 2008. Nitrate leaching assessment in a long-term experiment under supplementary irrigation in humid Argentina, *Agric. Water Manage.* doi:10.1016/j.agwat.2008.06.003.
- Barbieri P. A., H. E. Echeverría, y H. R. Sainz Rozas. 2009. Nitratos en el suelo a la siembra o al macollaje como diagnóstico de la nutrición nitrogenada en trigo en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 27:41-48.
- Barbieri, P.A., Echeverría, H.E., Sainz Rozas, H.R., y Andrade, F.H., 2008a. Nitrogen use efficiency in maize as affected by nitrogen availability and row spacing. *Agron. J.* 100, 1094–1100.
- Barbieri P. A., H. E. Echeverría, H. R. Sainz Rozas y M. Maringolo. 2010. Fertilización de maíz con urea de liberación lenta: Pérdida por volatilización y eficiencia de uso de nitrógeno. *Ciencia del Suelo* 28:57-66.
- Barbieri, P. A., Sainz Rozas, H. y Echeverría, H. E. 2008b. Time of nitrogen application affects nitrogen use efficiency of wheat in the humid pampas of Argentina. *Can. J. Plant Sci.* 88:849 857
- Barraco M. y M. Díaz Zorita. 2005. Momento de fertilización nitrogenada de cultivos de maíz en hapludoles típicos. *Ciencia del Suelo* 23:197-203.
- Barraco M., M. Díaz Zorita, C. Brambilla, C. Álvarez y C. Scianca. 2009. Respuesta del trigo a la fertilización nitrogenada y nitroazufrada en suelos arenosos. *Ciencia del Suelo* 27:217-224.
- Berardo A. 1994. Aspectos generales de fertilización y manejo del trigo en el área de influencia de la Estación Experimental INTA-Balcarce. *Boletín Técnico* No. 128. EEA INTA Balcarce.
- Bergh R., M. Zamora M. Seghezzi y E. Molfese. 2003. Fertilización nitrogenada foliar en trigo en el centro-sur de la provincia de Buenos Aires. *Informaciones Agronómicas* 19:15-19. INPOFOS Cono Sur.
- Bianchini A., F. García, y R. Melchiori. 2008. In J. Hatfield and R. Follet (Eds.). *Nitrogen in the environment: Sources, problems, and management*. Elsevier - Academic Press, San Diego, CA. USA pp. 105-124.
- Capurro J., M.J. Dickie, D. Ninfi, A. Zazzarini, E. Tosi y M.C. González. 2012. Vicia y avena como cultivos de cobertura en maíz. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 6:20-22. IPNI.
- Carmona M. y F. Sautua. 2011. Impacto de la nutrición y de fosfitos en el manejo de enfermedades en cultivos extensivos de la Región Pampeana. *Actas Simposio Fertilidad 2011*. F. García y A. Correndo (ed.). Pp. 73-82. IPNI Cono Sur-Fertilizar AC.
- Cassman, K.G. 1999. Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 96, 5952–5959.
- Caviglia O.P. y F.H. Andrade. 2010. Sustainable intensification of agriculture in the argentinean pampas: capture and use efficiency of environmental resources. *The Americas J. Plant Sci. Biotech.* 3, 1-8.
- Ciampitti I.A., Ciarlo E. A. y Conti M.E. 2008. Nitrous oxide emissions from soil during soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] crop phenological stages and stubbles decomposition period. *Biol Fertil Soils* (2008) 44:581–588.
- Collino, D., de Luca, M., Peticari, A., Urquiaga Caballero, S. y Racca, R. 2007. Aporte de la FBN a la nutrición de la soja y factores que la limitan en diferentes regiones del país. XXIII Reunión Latinoamericana de Rizobiología. Los Cocos, Córdoba, Argentina. 25-29 de marzo de 2007. Libro de Resúmenes
- Cordone G. 2011. Alternativas de reposición de nutrientes en secuencias basadas en soja de primera. *Actas Simposio Fertilidad 2011*. F. García y A. Correndo (ed.). Pp. 108-110. IPNI Cono Sur-Fertilizar AC.

- Cordone G. y F. Martínez. 2004. El monocultivo de soja y el déficit de nitrógeno. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 24:1-4. INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- Cosentino, V.R.N., Figueiro Aureggi, S.A., Taboada, M.A. 2013. Hierarchy of factors driving N₂O emissions in non-tilled soils under different crops. *European Journal of Soil Science*, 64, 550-557.
- Díaz-Zorita M. G., A. Duarte y J. H. Grove. 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research* 65:1-18.
- Díaz-Zorita, M. y M.V. Fernández Canigia. 2009. Field performance of a liquid formulation of *Azospirillum brasilense* on dryland wheat productivity. *European Journal of Soil Biology* 45: 163-167.
- Divito G., H. Sainz Rozas, H. Echeverria, G. Studdert y N. Wyngaard. 2011. Efectos a largo plazo de la fertilización en el sudeste bonaerense y comparación con la región pampeana central. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 4:19-26. IPNI.
- Dobermann A. 2007. Nutrient use efficiency – measurement and management. pp 1-28. *En Fertilizer Best Management Practices. IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practices (FBMPs). 7-9 March, 2007. Brussels, Belgium.*
- FAO. 2011. Ahorrar para crecer. Guía para los responsables de las políticas de intensificación sostenibles de la producción agrícola en pequeña escala. FAO. Roma. 102 pp.
- Ferrari M., J. Castellarin, H. Sainz Rozas, H. Vivas, R. Melchiori, y V. Gudelj. 2010. Evaluación de métodos de diagnóstico de fertilidad nitrogenada para el cultivo de trigo en la región pampeana. *Informaciones Agronómicas* 46:10-12. IPNI.
- Ferraris, G., L. Couretot y M. Díaz Zorita. 2008. Respuesta de trigo a tratamientos con *Azospirillum sp.* según niveles tecnológicos. CD Rom. VII Congreso Nacional de Trigo.V Simposio Invernal de Cereales de siembra Otoño –Invernal. I Encuentro del Mercosur.
- Ferraris, G., L. Couretot y M. Toribio. 2009. Pérdidas de nitrógeno por volatilización y su implicancia en el rendimiento del cultivo de maíz en Pergamino (Bs As). Efectos de fuente, dosis y uso de inhibidores. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 43:19-22. IPNI. Acassuso, Argentina.
- Flynn H. C. y P. Smith. 2010. Greenhouse gas budgets of crop production – current and likely future trends. 1a edición, IFA, Paris, Francia.
- Fontanetto H. 2004. Nutrición de los cultivos y manejo de la fertilidad del suelo en la región central de Santa Fe. In *Actas Fertilidad de Suelos para una Agricultura Sustentable. INPOFOS Cono Sur. Pag. 19-25.*
- Fontanetto H., O. Keller, L. Belotti, C. Negro y D. Giailevra. 2010. Efecto de diferentes combinaciones de nitrógeno y azufre sobre el cultivo de sorgo granífero (Campaña 2008/09). *Informaciones Agronómicas* 46:21-23. IPNI.
- Fontanetto H., H. Vivas, O. Keller y F. Llambías. 2001. Volatilización de amoníaco desde diferentes fuentes nitrogenadas aplicadas en trigo con siembra directa. *Anuario 2001 Agronomía. EEA INTA Rafaela. Santa Fe, Argentina.*
- Franzluebbers, A.J., Sawchik, J., Taboada, M.A. 2013. Agronomic and environmental impacts of pasture-crop rotations in temperate North and South America. *Agriculture, Ecosystems and Environment* (aceptado, Setiembre 2013).
- García F.; M. Boxler; J. Minteguiaga; R. Pozzi; L. Firpo; I. Ciampitti; A. Correndo; F. Bauschen; A. Berardo y N. Reussi Calvo. 2010. La Red de Nutrición de la Región Crea Sur de Santa Fe: Resultados y conclusiones de los primeros diez años 200-2009. 2a. ed. AACREA. Buenos Aires, Argentina. ISBN ISBN 978-987-1513-07-9. 64 pag.
- García F. e I. Daverede. 2007. Diagnóstico para recomendación de fertilización nitrogenada en cultivos de interés económico. *En T. Yamada, S. Abadía y G. Vitti (ed.). Nitrogenio e enxofre na agricultura brasileira. IPNI Brasil. Piracicaba, Sao Paulo, Brasil. pp. 277-320. ISBN 978-85-98519-03-6.*
- García F. O. y K. P. Fabrizzi. 1998. Fertilización de trigo y maíz bajo siembra directa en el Sudeste de Buenos Aires. *Boletín Técnico No. 150. EEA INTA Balcarce. Buenos Aires.*

- García F., K. Fabrizzi, L. Picone y F. Justel. 1999. Volatilización de amoníaco a partir de fertilizantes nitrogenados aplicados superficialmente bajo siembra directa y labranza convencional. 14^º. Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Pucón, Chile. 8-12 Noviembre 1999.
- Garnett T. et al. 2013. Sustainable intensification in Agriculture: Premises and policies. *Science* 341:33-34.
- Gobierno Argentino. 2007. Segunda Comunicación Nacional del Gobierno Argentino a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Proyecto BIRF No.TFO51287. (<http://www.fundacionbariloche.org.ar>).
- Godfray C., J. R. Beddington, I. R. Crute, L. Haddad, D. Lawrence, J. F. Muir, J. Pretty, S. Robinson, S. M. Thomas, C. Toulmin. 2010. Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. *Science* 327: 812-818.
- González Montaner, J., G. Maddonni, N. Mailland y M. Porsborg. 1991. Optimización de la respuesta a la fertilización nitrogenada en el cultivo de trigo a partir de un modelo de decisión para la Subregión IV (Sudeste de la Provincia de Buenos Aires). *Ciencia del Suelo* 9:41-51.
- González Montaner J., G. Maddonni y M. R. Di Napoli. 1997. Modeling grain yield and grain yield response to nitrogen in spring wheat crops in the Argentinean Southern Pampa. *Field Crops Research* 51:241-252.
- Gregoret M.C., J. Dardanelli, R. Bongiovanni y M. Diaz Zorita. 2006. Modelo de respuesta sitio-especifica del maíz al nitrógeno y agua edáfica en un haplustol. *Ciencia del Suelo* 24:147-159.
- Keller, O.; H. Fontanetto y S. Gambaudo. 1997. Dosis y fuentes nitrogenadas en siembra directa de maíz. I.N.T.A., E.E.A. RAFAELA. Publicación Miscelánea Nº 82: 130-131.
- IPCC. 1997. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Inventories. NGGIP Publications; Japan (<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>).
- IPCC. 2001. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. NGGIP Publications; Japan (<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>).
- IPCC. 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, H.S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara and K. Tanabe (Eds). Institute for Global Environmental Strategies, Tokyo, Japan.
- IPCC. 2007: Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.
- IPNI. 2013. Manual de Nutrición de Plantas 4R: Un Manual para Mejorar el Manejo de la Nutrición de Plantas. T.W. Bruulsema, P.E. Fixen, y G.D. Sulewski (eds.), International Plant Nutrition Institute, Norcross, GA, EE.UU. Traducción al español. 1^a. Ed. IPNI. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- Ladha, J.K., H. Pathak, T.J. Krupnik, J. Six, and C. van Kessel. 2005. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. *Advances in Agron.* 87: 85-156.
- Lavado R., H. Echeverría y H. Rimski-Korsakov. 2007. Balance of soil nitrogen in croplands of the Argentinean Pampas. Comparison between the two main productive areas. XVII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. SLCS. León, Mexico.
- Lazzari M.A., M.R. Landriscini y M. Echague. 2005. Patrones de absorción de nitrógeno nativo y del fertilizante en cebada cervecera con fertilizaciones cercanas a la siembra. *Ciencia del Suelo* 23:69-77.
- Martínez Peck R. y P. Fernández Poeta. 2009. Regulación de fertilizadoras a platillos. *Actas Simposio Fertilidad 2009*. F. García e I. Ciampitti (ed.). pp. 85-88. IPNI Cono Sur-Fertilizar AC.
- Matson P. A., W. J. Parton, A. G. Power, y M. J. Swift. 1997. Agricultural Intensification and Ecosystem Properties. *Science* 277:504-509.
- Mercau, J. 2010. Enfoques alternativos para el diagnóstico de fertilidad de suelos: una mirada con lentes de modelos funcionales de cultivo. *Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. 31 de Mayo al 4 de Junio de 2010. Rosario, Argentina. AACs. Cd-rom.

- Melaj MA, Echeverría HE, López SC, Studdert GA, Andrade F and Bárbaro NO. 2003. Timing of nitrogen fertilization in wheat under conventional and no-tillage system. *Agronomy Journal* 95: 1525-1531.
- Melchiori R.J.M. 2011. Avances en el manejo de nutrientes: Tecnologías de fertilización. *Actas Simposio Fertilidad 2011*. F. García y A. Correndo (ed.). Pp. 111-115. IPNI Cono Sur-Fertilizar AC.
- Melchiori, R.J.M. 2012. Fertilización variable con N: herramientas, criterios y recomendaciones. 19th ISTRO Conference – IV SUCS Meeting. Striving for Sustainable High Productivity. 24-28 Septiembre 2012. Montevideo, Uruguay.
- MinCyT. 2012. Evaluación de necesidades tecnológicas ante el cambio climático. Informe final sobre tecnologías para mitigación. Equipo ENT Nacional-MINCYT. Proyecto Evaluación de Necesidades Tecnológicas (ENT). Pp. 429-432.
- Muñoz S. y J.L. Zorzín. 2013. Respuesta a la re-fertilización nitrogenada en maíz en el sudeste de Córdoba. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 11:16-19. IPNI.
- Pagani A., H. Echeverría, H. Sainz Rozas y P. Barbieri. 2008. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 26:183-193.
- Pagani A., H. Echeverría, y H. Sainz Rozas. 2009. Respuesta a nitrógeno y azufre en el cultivo de maíz en diferentes ambientes de la provincia de Buenos Aires. *Ciencia del Suelo* 27:21-29.
- Palma RM, Rímolo M, Saubidet MI and Conti ME. 1997. Influence of tillage system on denitrification in maize cropped soils. *Biology and Fertility of Soils* 25: 142-146.
- Peralta N, J.L. Costa y F.M. Castro. 2012. Interpretación de la conductividad eléctrica aparente para la delimitación de zonas de manejo en el sudeste bonaerense. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 6:15-19. IPNI.
- Picone LI, Videla CC y García FO. 1997. Desnitrificación durante el cultivo de trigo en un Argiudol típico bajo siembra directa y labranza convencional. *Ciencia del Suelo* 15: 53-58.
- Picone L.I., Videla C.C., C. Bayer, R. Rizzalli y F.O. García. 2013. Emisiones de óxido nitroso y dióxido de carbono en maíz bajo sistemas de producción con distinta intensificación. *In* F. García y A. Correndo (ed.). *Actas CD Simposio Fertilidad 2013*. IPNI Cono Sur-Fertilizar AC. pp. 257-265.
- Portela SI, Andriulo AE, Sasal MC, Mary B y Jobbágy EG. 2006. Fertilizer vs. organic matter contributions to nitrogen leaching in cropping systems of the Pampas: ¹⁵N application in field lysimeters. *Plant and Soil* 289: 265-277.
- Prystupa P (Ed.). 2007. *Tecnología de la fertilización de cultivos extensivos en la Región Pampeana*. EFA, Buenos Aires, Argentina. 224 p.
- Quintero C., F. Prats, M.A. Zamero, E. Arevalo, N. Spinelli y G. Boschetti. 2011. Absorción de nitrógeno y rendimiento de arroz con diferentes formas de nitrógeno aplicado previo al riego. *Ciencia del Suelo* 29:233-239.
- Racca, R., D. Collino, J. Dardanelli, D. Basigalup, N. Gonzalez, E. Brenzoni, N. Hein y M. Balzarini. 2001. Contribución de la fijación biológica de Nitrógeno a la nutrición nitrogenada de la alfalfa en la región pampeana. Ediciones INTA. Buenos Aires.
- Reussi Calvo N and Echeverría HE. 2006. Estrategias de fertilización nitrogenada en trigo: balance hídrico para el sur bonaerense. *Ciencia del Suelo* 24: 115-122.
- Rillo S. y P. Richmond. 2006. Evaluación de tres criterios de fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz en siembra directa en un suelo hapludol. *Maíz en Siembra Directa*. 78-84. AAPRESID. Rosario, Santa Fe.
- Rimski-Korsakov, E., G. Rubio and R. S. Lavado. 2004. Potential Nitrate Losses under Different Agricultural Practices in the Pampas Region, Argentina. *Agric. Water Management*, 65:83-94.
- Rimski-Korsakov, H., Rubio, G. y Lavado, R.S. 2007a. Pérdidas por volatilización de amoníaco en cultivos de maíz fertilizados con nitrógeno. *In*: Lázari MA and Videla C (Eds.) *Isótopos estables en Agroecosistemas*. pp: 53-57.

- Rimski-Korsakov, H., Rubio, G. y Lavado, R.S. 2007b. Recuperación del nitrógeno aportado por fertilización en maíz. In: Lazzari MA and Videla C (Eds.) Isótopos estables en Agroecosistemas. pp:47-52
- Rimski-Korsakov H., G. Rubio, I. Pino y R. S. Lavado. 2008. Destino del nitrógeno del fertilizante en un cultivo de maíz. *Informaciones Agronómicas* 39: 1-5. IPNI Cono Sur.
- Ross F., J. Massigoge y M. Zamora. 2011. Fertilización de cebada cervecera en ambientes con tosca en el sur de Buenos Aires, Argentina. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 3:9-13. IPNI.
- Rubio G., J. Scheiner, M. Taboada, y R. Lavado. 2007. Distribución de nitrógeno, fosforo y azufre en un cultivo de colza: Efecto sobre el ciclado de nutrientes. *Ciencia del Suelo* 25:189-194.
- Ruiz R., E. Satorre, G. Maddoni, J. Carcova y M. Otegui. 2001. Umbrales de decisión para la fertilización nitrogenada en maíz. VII Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino, Buenos Aires, Argentina.
- Sainz Rozas H, P. Calviño, H. Echeverría, P. Barbieri, y M. Redolatti. 2008. Contribution of Anaerobically Mineralized Nitrogen to the Reliability of Planting or Presidedress Soil Nitrogen Test in Maize. *Agron J.* 100: 1020-1025.
- Sainz Rozas H; Echeverría, HE y Barbieri, P. 2004. Nitrogen balance as affected by application time and nitrogen fertilizer rate in irrigated no-tillage maize. *Agronomy Journal* 96: 1622-1631.
- Sainz Rozas H, Echeverría HE y Picone LI. 2001. Denitrification in maize under no-tillage: effect of nitrogen rate and application time. *Soil Science Society of America Journal* 65:1314-1323.
- Sainz Rozas H, Echeverría HE, GA Studdert y FH Andrade. 1999. No-Till Maize Nitrogen Uptake and Yield: Effect of Urease Inhibitor and Application Time. *Agron. J.* 91:950-955.
- Salvagiotti F., J. Castellarin, F. Ferraguti y H. Pedrol. 2011. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz según potencial de producción y disponibilidad de nitrógeno en la región pampeana norte. *Ciencia del Suelo* 29:199-212.
- Salvagiotti, F., Castellarin, J.M., Miralles, D.J., Pedrol, H.M. 2009. Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake. *Field Crops Research* 113, 170-177.
- Salvagiotti F., F. Ferraguti y A. Manila. 2012. Respuesta a la fertilización y eficiencia de uso del nitrógeno en maíz de siembra tardía sobre diferentes antecesores utilizando inhibidores de ureasa. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 8:2-5. IPNI.
- Satorre E. y col. 2001. Bases de decisión para la fertilización nitrogenada en las zonas Norte de Buenos Aires, Sur de Santa Fe y Centro de AACREA. Cuadernillo de Actualización Técnica No. 63. AACREA. Buenos Aires, Argentina.
- Satorre E., F. Menéndez y G. Tinghitella. 2005. El modelo Triguero: Recomendaciones de fertilización nitrogenada en trigo. Simposio "Fertilidad 2005: Nutrición, Producción y Ambiente". Rosario, 27-28 Abril. INPOFOS Cono Sur-Fertilizar A.C. pp. 3-11.
- Satorre, E.H., Micheloud, J.R., Belligoi, J. y Cavasassi. 2006. MAICERO: Nuevos Criterios para el Diagnóstico y Manejo de la Fertilización del Cultivo de Maíz en Argentina. Convenio AACREA y PROFERTIL S.A., software de aplicación agronómica.
- Simón M., N. Peralta y J.L. Costa. 2013. Relación entre la conductividad eléctrica aparente con propiedades del suelo y nutrientes. *Ciencia del Suelo* 31:45-55.
- Snyder C.S. y T.W. Bruulsema. 2007. Nutrient Use Efficiency and Effectiveness in North America: Indices of Agronomic and Environmental Benefit. International Plant Nutrition Institute. Reference # 07076.
- Snyder C.S., T.W. Bruulsema, T. Jensen, y P. Fixen. 2009. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Ag. Eco. Env.* 133:247-266.
- Studdert G.A; Echeverría H.E. y Casanovas E.M. 1997. Crop-pasture rotation for sustaining the quality and productivity of a typical argudoll. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:1466-1472.
- Taboada M. y V. Cosentino. 2011. Emisiones de gases con efecto invernadero provenientes de la agricultura. Estado actual del conocimiento en el mundo y en Argentina. Actas Simposio Fertilidad 2011. F. García y A. Correndo (ed.). Pp. 55-68. IPNI Cono Sur-Fertilizar AC.

- Tilman D., C. Balzer, J. Hill, y B. L. Befort. 2011. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *PNAS* 108, 50:20260–20264.
- Urricariet, S., M. Presutti, H. Rosatto, M. Amado, M. Niborski y G. Botta. 2004. Uso del modelo digital de elevación y mapa de suelos para un manejo sitio-específico de la fertilización nitrogenada en maíz. *En* Navone S. M., H. Rosatto y F. Vilella. (Eds.). *Teledetección aplicada a la problemática ambiental argentina*. CIATE-FAUBA. EFA, Buenos Aires, Argentina. Pp 85-95.
- Vázquez Amabile G., M. Gonzalo, M. Pella, G. Cueto y S. Galbusera. 2013. Nutrición y agricultura por ambientes: Avances en el sur de Buenos Aires.. *In* F. García y A. Correndo (ed.). *Actas CD Simposio Fertilidad 2013*. IPNI Cono Sur-Fertilizar AC. pp. 104-111.
- Velasco, J. L., Rozas, H. S., Echeverria, H. E. and Barbieri, P. A. 2012. Optimizing fertilizer nitrogen use efficiency by intensively managed spring wheat in humid regions: Effect of split application. *Can. J. Plant Sci.* 92: xxxxxx.
- Videla C, Ferrari J, Echeverria HE y Travaso MI. 1996. Transformaciones del nitrógeno en un cultivo de trigo. *Ciencia del Suelo* 14: 1-6.
- Zubillaga MS, Zubillaga MM, Urricariet S y Lavado RS. 2002. Effect of nitrogen sources on ammonia volatilization, grain yield and soil nitrogen losses in no-till wheat in an Argentine soil. *Agrochimica* 46: 100-107.