

Productividad y eficiencia en el uso de agua y nitrógeno en sistemas intensificados

Octavio P. Caviglia¹, R.H. Rizzalli², N.V. Van Opstal¹, P. Barbieri², R.J.M. Melchiori¹, A. Cerrudo², V.C. Gregorutti¹, J.P. Monzón², P.A. Barbagelata¹, J.J. Martínez², F.O. García³, y F.H. Andrade²

Introducción

La creciente población mundial y los cambios en sus ingresos y hábitos alimenticios demandarán, en el corto plazo, importantes aumentos en la producción de granos y otros productos agrícolas. Gran parte de las demandas mundiales deberán satisfacerse con la producción agrícola de Sudamérica (OECD-FAO, 2009). Este desafío debe ser logrado preservando los recursos naturales y la calidad de vida de la población rural y urbana (Lobell et al., 2009). Los actuales sistemas agrícolas de varios países de Sudamérica están fuertemente basados en cultivos estivales, principalmente soja, realizados como únicos cultivos en el año y manejados con prácticas agronómicas orientadas a lograr la mayor rentabilidad posible sin considerar el impacto sobre el deterioro potencial de los recursos naturales involucrados, especialmente el suelo, y el impacto sobre otros ecosistemas (Caviglia y Andrade, 2010). La utilización de prácticas mejoradas de producción que combinan todo el conocimiento agronómico disponible orientado a incrementar la producción de un cultivo individual con un mínimo impacto ambiental ha sido definida como intensificación ecológica (Cassman, 1999).

Por otra parte, la intensificación sustentable de la secuencia de cultivos (Caviglia y Andrade, 2010), a través del incremento de la cantidad de cultivos por unidad de tiempo, ha sido propuesta como una alternativa que permite incrementar la eficiencia en el aprovechamiento de los recursos del ambiente, principalmente agua y radiación solar. Ambos conceptos se complementan en la necesidad de una mayor producción y un mínimo impacto ambiental. El desafío de mayores rendimientos de los sistemas de producción requiere de la mayor eficiencia productiva de los recursos nitrógeno (N), agua y tierra, con el menor impacto posible sobre los recursos naturales suelo, atmósfera y aguas superficiales y subsuperficiales (Lobell, 2007).

Como respuesta a una iniciativa del Instituto Internacional de Nutrición de Plantas (IPNI) (<http://www.globalmaize.com/Home/>), en el año 2009 se iniciaron dos experimentos de largo plazo en Balcarce (Buenos Aires) y Paraná (Entre Ríos) con el objetivo de comparar, en el largo plazo, el manejo actual de los productores con sistemas intensificados de manejo de suelos y cultivos. La evaluación de los sistemas está basada en la productividad de los recursos y en

indicadores de impacto ambiental. En este trabajo se presentan indicadores de productividad y eficiencia de uso del agua y del N obtenidos en los primeros dos años de ambos experimentos.

Materiales y métodos

Cada experimento contempla la realización de una secuencia fija de 3 cultivos (trigo/soja de segunda – maíz) en 2 años, en las EEA INTA Paraná (32° S, 60° W) y Balcarce (38° S, 58° W). Se presentan los resultados correspondientes a las campañas 2009-10 y 2010-11. En ambos experimentos se incluyeron las dos fases de la rotación en cada año, es decir que el cultivo de maíz o el doble cultivo trigo/soja de segunda se realizaron todos los años. El objetivo de los experimentos es evaluar dos niveles del factor manejo agronómico, que se diferencian en los criterios para la toma de decisiones de manejo de cada cultivo:

1. **Manejo intensificado sustentable (MIS):** las decisiones se toman en base a conocimientos previos tendientes a mejorar la eficiencia del sistema, incrementar los rendimientos y la sustentabilidad en el largo plazo.
2. **Manejo actual del productor medio de la zona (MAP):** se utiliza el nivel promedio de manejo del productor de cada zona, basado en la opinión de asesores expertos.

Los componentes de manejo aplicados en cada tratamiento (MAP y MIS) fueron diferentes en Paraná y Balcarce (**Tabla 1**). En el año 2009 se desfasó la fecha de siembra de maíz en el tratamiento MAP, tanto en Paraná como en Balcarce. Las diferencias entre niveles de manejo del cultivo de soja en Paraná estuvieron sólo en la elección del genotipo (adaptado a la fecha de siembra vs. cultivar de grupo de madurez más difundido). En Balcarce no se diferenciaron los manejos para soja.

En Paraná se incluyó en el experimento el factor de intensificación de la secuencia (ISI), con dos niveles: Alto y Medio. En el nivel Alto se incluye un cultivo de cobertura invernal leguminoso (Melilotus, vicia o arveja), con el objetivo de incorporar N por vía de la fijación biológica para reducir los aportes inorgánicos del nutriente (fertilizantes) en la secuencia. El cultivo de cobertura, se incluye en el periodo más largo entre cultivos, luego de la cosecha de la soja y previo a la siembra de maíz.

¹ INTA EEA Paraná - Ruta 11, km 12.5 (3100) Paraná - Argentina. Correo electrónico: ocaviglia@parana.inta.gov.ar

² Unidad Integrada Balcarce INTA FCA-UNMDP - Argentina

³ IPNI Cono Sur

Tabla 1. Componentes del manejo actual del productor medio de la zona (MAP) y del manejo intensificado sustentable (MIS) en Paraná y Balcarce.

Sitio	Cultivo	Componente de manejo	MIS	MAP
Balcarce	Trigo	Cultivar	Alto potencial (cv. tipo Baguette)	Alta calidad (cv. tradicional)
		Densidad (sem m ⁻²)	400	360
		Fósforo	FDA* en línea a la siembra Reposición**	FDA en línea a la siembra 30% < que reposición
		Nitrógeno	Urea en macollaje Dosis según análisis de suelo y rendimiento objetivo	
		Fungicida e Insecticida	Según monitoreo	No
	Maíz	Cultivar	Alto potencial y estabilidad, RG***, Bt	RG
		Densidad (sem m ⁻²)	8	6.5
		Dist. e/ Hileras (m)	0.525	0.7
		Fósforo	FDA en línea a la siembra Reposición	FDA en línea a la siembra 30% < que reposición
		Nitrógeno	Dosis según análisis de suelo y rendimiento objetivo, UAN en V6	Dosis según análisis de suelo y rendimiento objetivo Urea a la siembra
Paraná	Trigo	Cultivar	Alto potencial	Más sembrado
		Densidad (sem m ⁻²)	400	350
		Fósforo	FDA en línea a la siembra Suficiencia	FDA en línea a la siembra Dosis fija (70 kg ha ⁻¹)
		Nitrógeno	Urea en macollaje Dosis según análisis de suelo (135-x****)	Urea en macollaje, Dosis fija (80 kg ha ⁻¹)
		Fungicida e Insecticida	Si	Si
	Maíz	Cultivar	Alto potencial, RG	Costo medio de semilla, RG
		Densidad (sem m ⁻²)	8	6
		Dist. e/ Hileras (m)	0.525	0.525
		Fósforo	FDA en línea a la siembra Suficiencia	FDA en línea a la siembra Dosis fija (120 kg ha ⁻¹)
		Nitrógeno	Urea en V6 Dosis según análisis de suelo (150-x****)	Urea en V6 Dosis fija (120 kg ha ⁻¹)

* FDA = Fosfato diamónico; ** Reposición implica la aplicación de cantidades de P equivalentes a la extracción en grano de cada cultivo; *** RG = Resistente a glifosato; **** Dosis de N a aplicar descontando x, la cantidad de N-NO₃ en el suelo (0-0.60 m).

El ISI (número de cultivos por año), es de 2 y 1.5 para los niveles Alto y Medio, respectivamente.

- Alto (ISI = 2, trigo/soja-melilotus/maíz)
- Medio (ISI = 1.5, trigo/soja-barbecho/maíz)

A madurez fisiológica de los cultivos se evaluó la biomasa aérea (MS) y el rendimiento en granos. Se estimó la evapotranspiración (ET) de los cultivos en base a mediciones de humedad del suelo y a la utilización de balances hídricos por simulación. Se

determinó la acumulación de N en la biomasa aérea y la concentración de N en los granos.

La eficiencia en el uso del agua (EUA) se estimó como el cociente entre el rendimiento en granos (EUA_g) total o materia seca total (EUA_{MS}) y la ET total de los cultivos. La eficiencia de captura de agua (ECA) se estimó como el cociente entre la ET total de los cultivos y las lluvias en el periodo evaluado, mientras que la productividad del agua (PA) se estimó como el producto de la EUA y la ECA (Caviglia et al., 2004).

La productividad parcial de N (PPN) se estimó como el rendimiento total de los cultivos sobre la dosis total de N aplicado con los fertilizantes (Dobermann, 2007). La eficiencia fisiológica de uso del N (EUN_{Fis}) se calculó como el cociente entre el rendimiento total y la cantidad total de N acumulado en la biomasa aérea (N_{Abs}). Se estimó un balance parcial de N (BPN) como el cociente entre el N total aplicado con los fertilizantes y el N exportado en los granos (N_{Exp}) (Dobermann, 2007).

Los índices de productividad y eficiencia en el uso del N y del agua fueron determinados para la rotación completa (2 años de duración). Se calculó el promedio de los índices obtenidos para cada una de las dos fases y se realizó un análisis de la variancia y test de comparación de medias dentro de cada sitio.

Resultados y discusión

Rendimiento en granos y en materia seca

El rendimiento total en granos fue mayor ($P < 0.0001$) con el MIS que con el MAP en ambos sitios (Figura 1). En Balcarce, el rendimiento total en granos fue un 18% y 29% mayor que en Paraná, en los tratamientos MIS y MAP, respectivamente. La contribución de cada cultivo al rendimiento total tuvo marcadas diferencias entre sitios y entre tratamientos. La contribución del maíz en el tratamiento de MAP en Paraná fue del 43%, mientras que en el resto de las situaciones estuvo en el 61-63% (Figura 2). En consecuencia, la contribución de la soja y del trigo fue más importante en el tratamiento de MAP en Paraná que en el resto de las situaciones.

El rendimiento de la soja fue muy poco afectado por los tratamientos (<11% de diferencia), así como el rendimiento del trigo en Paraná. El mayor efecto de los tratamientos se evidenció en el cultivo de maíz y en el cultivo de trigo en Balcarce (>20% de diferencia).

La producción de MS también fue significativamente afectada por los tratamientos de manejo en ambos sitios, aunque el impacto de los mismos fue menor que para el rendimiento en granos. La acumulación de MS fue de 35 277 y 33 019 kg ha⁻¹ en Paraná, y de 36 574 y 32 772 kg ha⁻¹ en Balcarce para los tratamientos MIS y MAP, respectivamente.

Uso del agua

La productividad del agua para granos (PA_g) se incrementó significativamente ($P < 0.0001$) en el tratamiento de MIS en comparación con el de MAP (Tabla 2), en mayor medida en Paraná (30%) que en Balcarce (19%). Un comportamiento similar se registró para la productividad del agua para materia seca (PA_{MS}), aunque con menor impacto de los tratamientos.

Los valores de PA_g obtenidos en el tratamiento de MIS son muy elevados comparados con los 3-4 kg ha⁻¹ mm⁻¹

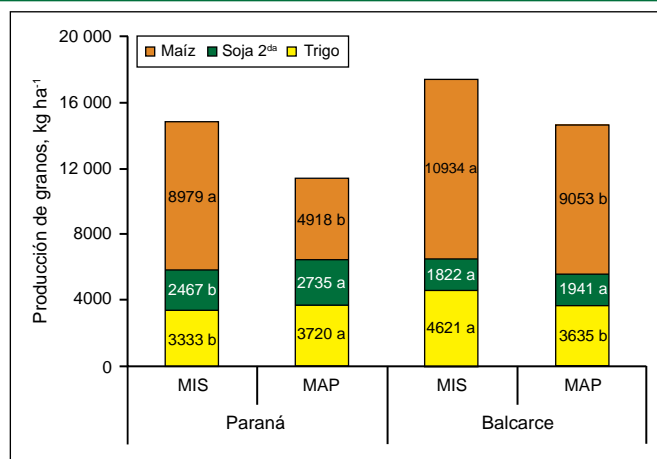


Figura 1. Rendimiento de trigo, soja de segunda y maíz en tratamientos MAP y MIS en EEA Balcarce y EEA Paraná. Datos promedio de las campañas agrícolas 2009/10 y 2010/11. Rendimientos expresados a 0% de humedad en el grano. Para cada variable letras distintas indican diferencias significativas entre manejos, dentro de cada sitio, según test de Tukey ($\alpha=0.05$).

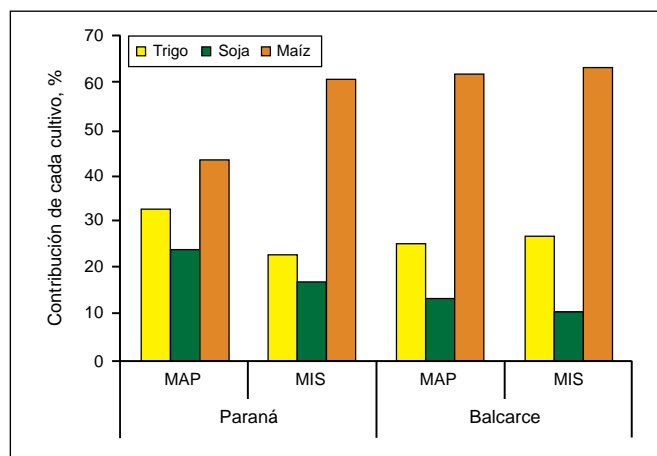


Figura 2. Contribución porcentual de cada cultivo a la producción total en grano en Paraná y Balcarce.

actualmente obtenidos en la Argentina (estimado en base a estadísticas MAGyP, 2011), reflejando la potencialidad de la aplicación de estas estrategias de manejo para incrementar la eficiencia de los sistemas. Aunque la PA_g de los tratamientos de MAP también fue superior a los valores medios del país, esto es atribuible a la composición de cultivos de este experimento (trigo/soja-maíz) en relación a la composición de la superficie cultivada a nivel nacional con alrededor del 60% de soja en su composición (estimado en base a estadísticas MAGyP, 2011).

Las mayores PA_g y PA_{MS} en los tratamientos de MIS estuvieron solamente asociadas con las mejoras en la EUA_g y EUA_{MS} , ya que no se registraron cambios en la ECA por efecto de los tratamientos de manejo. La mayor PA en Balcarce que en Paraná estuvo asociada con mayores ECA y EUA, tanto para grano como para materia seca. A su vez, la mayor EUA en Balcarce puede atribuirse al menor déficit de presión de vapor del sitio, tal como ha sido documentado previamente (Abbate et

al., 2004). La mayor ECA en Balcarce que en Paraná estaría asociada con la menor cantidad de precipitaciones registradas en Balcarce (21% menos) en los dos años de la experiencia aquí documentada.

La intensificación de la secuencia en Paraná, incluyendo un cultivo de cobertura leguminoso invernal previo al maíz, mejoró significativamente la ECA pero no la EUA_g , resultando en cambios poco importantes, pero significativos, en la PA_g (Tabla 3).

Los resultados obtenidos sugieren que mediante el MIS serían esperables pocas mejoras de la PA por incrementos en la ECA y mejoras muy importantes en la EUA_g , mientras que la intensificación de la secuencia, i.e. incrementando la cantidad de cultivos por unidad de tiempo, lleva a mejoras importantes principalmente en la ECA. Así, combinando ambas estrategias de intensificación se pueden lograr mejoras en la PA, mejorando el componente de eficiencia de uso a través del MIS y el componente de eficiencia de captura a través de la intensificación de la secuencia.

Uso del Nitrógeno

El N total acumulado (N_{Abs}) por los cultivos fue similar entre tratamientos de manejo en Paraná y mayor en el MIS en Balcarce (Tabla 4). La cantidad total del N_{Abs} fue mucho mayor en Paraná en comparación con Balcarce, lo que es atribuible a la mayor contribución de la soja al rendimiento total (Figura 1). La misma causa explica la mayor cantidad de N exportado (N_{Exp}) en los granos en Paraná, la que no difirió entre tratamientos de manejo en ambos sitios (Tabla 4). Como era esperable la PPN fue mayor en los tratamientos de MAP que en los de MIS, debido a que las dosis aplicadas en este último fueron mayores en relación al incremento en los rendimientos logrados.

Sin embargo, la eficiencia fisiológica de uso del N (EUN_{Fis}), i.e. la habilidad de los cultivos de generar grano por unidad de N_{Abs} , fue remarcablemente mejorada por los tratamientos de MIS en relación a los de MAP (11% en Balcarce, 30% en Paraná) (Tabla 4). La mayor EUN_{Fis} en Balcarce que en Paraná, se debería a la mayor contribución de maíz al rendimiento total, cultivo que tiene una alta eficiencia para transformar el N_{Abs} en grano y materia seca (Sinclair y Horie, 1989).

Tabla 2. Productividad del agua para granos (PA_g), para materia seca (PAMS), eficiencia el uso del agua para granos (EUA_g) y para materia seca (EUA_{MS}) y eficiencia de captura del agua (ECA) en el promedio de dos fases de rotación trigo/soja-maíz en Paraná (32° S; 60° W) y Balcarce (38° S, 58° W) durante las campañas agrícolas 2009/10 y 2010/11. Para cada variable letras distintas indican diferencias significativas entre manejos, dentro de cada sitio, según test de Tukey ($\alpha=0.05$).

Variable	Unidades	----- Paraná -----		----- Balcarce -----	
		MIS	MAP	MIS	MAP
PA_g	kg grano ha ⁻¹ mm ⁻¹	6.7 a	5.1 b	9.9 a	8.3 b
PA_{MS}	kg MS ha ⁻¹ mm ⁻¹	15.9 a	14.9 b	20.8 a	18.6 b
EUA_g	kg grano ha ⁻¹ mm ⁻¹	12.3 a	9.4 b	13.9 a	11.8 b
EUA_{MS}	kg MS ha ⁻¹ mm ⁻¹	27.4 a	25.3 b	29.4 a	26.5 b
ECA	mm _{Abs} mm _{pp} ⁻¹	0.59 a	0.59 a	0.71 a	0.70 a

Tabla 3. Productividad del agua para granos (PA_g), eficiencia el uso del agua para granos (EUA_g) y eficiencia de captura del agua (ECA) bajo diferentes manejos agronómicos (MIS y MAP), en el promedio de dos fases de rotación trigo/soja-maíz en Paraná (32° S; 60° W) durante las campañas agrícolas 2009/10 y 2010/11. Para cada variable letras distintas indican diferencias significativas entre manejes, dentro de cada sitio, según test de Tukey ($\alpha=0.05$).

Variable	Unidades	MIS	MAP
		----- (ISI = 1.5) -----	
PA_g	kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	6.2 a	5.6 b
EUA_g	kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	11.2 a	10.6 a
ECA	mm _{Abs} mm _{pp} ⁻¹	0.56 b	0.62 a

Tabla 4. Nitrógeno total absorbido por los cultivos (N_{Abs}), productividad parcial del N (PPN), eficiencia fisiológica de uso del N (EUN_{Fis}), N exportado en los granos (N_{Exp}) y balance aparente de N en el promedio de dos fases de rotación trigo/soja-maíz en Paraná (32° S; 60° W) y Balcarce (38° S, 58° W) durante las campañas agrícolas 2009/10 y 2010/11. Para cada variable letras distintas indican diferencias significativas entre manejos, dentro de cada sitio, según test de Tukey ($\alpha=0.05$).

Variable	Unidades	----- Paraná -----		----- Balcarce -----	
		MIS	MAP	MIS	MAP
N_{Abs}	kg ha ⁻¹	431 a	433 a	384 a	355 b
PPN	kg grano kg N_{fert} ⁻¹	78 b	90 a	108 b	132 a
EUN_{Fis}	kg grano kg N_{Abs} ⁻¹	34.3 a	26.4 b	45.8 a	41.3 b
N_{Exp}	kg N ha ⁻¹	311 a	312 a	311 a	287 a
BPN	kg N ha ⁻¹	0.62 a	0.41 b	0.54 a	0.4 b

Asimismo, el BPN fue mejorado por el MIS en un 35% y 51% en Balcarce y Paraná, respectivamente. Aunque en el MIS, el balance aparente se encuentra bastante alejado del óptimo de 1, debe tenerse en cuenta que no se consideró en este balance el aporte de N por fijación biológica de la soja.

Estos resultados demuestran que el MIS, combinando mejores prácticas de manejo, puede incrementar la eficiencia en el uso del N de manera considerable, mejorando los rendimientos, los aportes de residuos al suelo y el balance de N en el suelo. La mejora es atribuible principalmente a la utilización de genotipos más eficientes y al manejo ajustado de la nutrición de los cultivos, utilizando el conocimiento disponible en cada sitio.

Los resultados preliminares obtenidos en este trabajo son promisorios, ya que indican que la combinación de estrategias de manejo intensificado de los cultivos y de la secuencia pueden llevar a mejoras importantes en la eficiencia global de aprovechamiento de agua y N, lo que tendría su correlato en la reducción de la externalidades del sistema, ya que el N y el agua que no son aprovechados por el sistema agrícola intervienen en procesos degradativos del ambiente (Gregory et al., 2002).

Está previsto que la duración de esta experiencia sea, al menos, de 10 años y que se incorporen mediciones del impacto ambiental de cada uno de estos sistemas incluyendo la emisión de gases de efecto invernadero, impacto sobre el almacenamiento de carbono y N en el suelo, y la pérdida de nutrientes y plaguicidas por lixiviación.

Conclusiones

- En Balcarce y Paraná, el manejo intensificado sustentable (MIS) mejoró el rendimiento total en granos de sistema y el retorno de residuos de cosecha al suelo en comparación con el manejo del productor medio de la zona (MAP).
- La PA fue mejorada por el MIS en comparación con el MAP, principalmente por incrementos importantes en la eficiencia en el uso del agua. La ECA fue mejorada en Paraná por la intensificación de la secuencia, pero dicho incremento no fue suficiente para mejorar la PA.
- El MIS incrementó la EUN_{Fis} y el balance de N y redujo la PPN en comparación con el MAP.

Agradecimientos

A Andrea Irigoyen y Aida Della Maggiora de la UIB. A todos los participantes de la iniciativa de los sitios de Paraná y Balcarce. Este trabajo fue financiado por INTA, IPNI y FCA-UNMdP.

Bibliografía

- Abbate, P.E., J.L. Dardanelli, M.G. Cantarero, M. Maturano, R.J.M. Melchiori, y E.E. Suero. 2004. Climatic and water availability effects on water-use efficiency in wheat. *Crop Science*, 44:474-483.
- Cassman, K. 1999. Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and

precision agriculture. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 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. *Am. J. Plant Sci. Biotechnol* 3:1-8.

Caviglia, O.P., V.O. Sadras, y F.H. Andrade. 2004. Intensification of agriculture in the south-eastern Pampas. I. Capture and efficiency in the use of water and radiation in double-cropped wheat-soybean. *Field Crops Res.* 87:117-129.

Dobermann, A. 2007. Nutrient use efficiency - measurement and management. pp 1-28. In *Fertilizer Best Management Practices*. IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practices (FBMPs). 7-9 March, 2007. Brussels, Belgium.

Gregory, P.J., J.S.I. Ingram, R. Andersson, R.A. Betts, V. Brovkin, T.N. Chase, P.R. Grace, A.J. Gray, N. Hamilton, T.B. Hardy, S. Howden, A. Jenkins, M. Meybeck, M. Olsson, I. Ortiz-Monasterio, C.A. Palm, T.W. Payn, M. Rummukainen, R.E. Schulze, M. Thiem, C. Valentin, y M.J. Wilkinson. 2002. Environmental consequences of alternative practices for intensifying crop production. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 88:279-290.

Lobell, D.K., K. Cassman, y C. Field. 2009. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 2009. 34:4.1–4.26

MAGyP. 2011. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Base de datos sistema integrado de información agropecuaria. Disponible en: <http://www.minagri.gob.ar>. Acceso 3 de marzo de 2011.

OECD-FAO. 2009. *Agricultural Outlook 2009-2018*. Disponible en <http://www.agri-outlook.org/dataoecd/2/31/43040036.pdf>. Consultado septiembre 2011.

Sinclair, T.R., y T. Horie. 1989. Leaf nitrogen, photosynthesis and crop radiation use efficiency: A review. *Crop Science*, 29:90-98. 🌱



Grupo de investigadores visitando el ensayo de sistemas intensificados de Balcarce en Abril 2012.