

Artículo de divulgación

Distribución de cultivos, innovación tecnológica y la sostenibilidad de los agroecosistemas¹

Rótolo, G.C.

Sostenibilidad y Desempeño Ambiental
de Sistemas Agroalimentarios
INTA EEA Oliveros
rotolo.gloria@inta.gob.ar

Introducción

La agricultura es una actividad esencial que solo es posible desarrollarla en interacción dinámica con la comunidad local y global. En los últimos años, se fomentó un sistema alimentario orientado principalmente al mercado con el objeto de satisfacer la demanda de alimentos y fibras de una población mundial creciente y de una sociedad impulsada por la tecnología. La expansión y la intensificación de los cultivos han sido algunos de los cambios globales predominantes del siglo XX generando mayores rendimientos y aumentando la producción mundial de alimentos en un 145% (Pretty, 2002; Tilman et al., 2011). Sin embargo al mismo tiempo, se observa el agotamiento de los recursos, debido a problemas ambientales y sociales, así como el aumento de la desnutrición y la obesidad (Pretty, 2002; Manuel-Navarrete et al, 2005; Tilman et al., 2011).

Hoy en día la agricultura ocupa el 38% de la superficie libre de hielo del planeta, y un tercio de la misma (13%) corresponde a las tierras cultivadas. Considerando solo la tierra cultivada, el 18% está ocupado con maíz y soja, y el 14% con trigo (FAOSTAT, 2011). Argentina posee el 2,6% de la superficie agrícola mundial, con el 52% y 14% sembrada con soja y maíz en verano y 13% con trigo en invierno (FAOSTAT, 2011). En la actualidad esta proporción es similar en la región pampeana donde se produce más del 80% de los tres cultivos principales, resultando en una alta homogeneidad del paisaje (Manuel-Navarrete et al, 2005) que reduce la biodiversidad (Bilenca et al., 2012).

La diversificación de los cultivos en el tiempo (rotación) y en el espacio (cultivo en fajas y otros sistemas) tiene potencial para aumentar la producción (Forjan y Manso, 2012), así como preservar y mejorar la salud de los ecosistemas y los beneficios que estos ofrecen a la sociedad como por ejemplo la polinización, el aire limpio, la descomposición de residuos, la infiltración. Estas son las bases de los sistemas

¹ El artículo es resumen de la publicación: Rótolo, G. C., Montico, S., Francis C.A., Ulgiati, S. (2015). "How land allocation and technology innovation affect the sustainability of agriculture in Argentina Pampas: An expanded life cycle analysis". *Agricultural Systems* 141:79-93.

agroalimentarios resilientes (Naylor, 2008), y del bienestar regional de los agricultores y la población en general.

Desde la antigüedad hay referencias de la preocupación tanto por el uso sostenible de los recursos naturales para mantener las sociedades ricas y saludables, como por la interacción de los mismos con la comunidad local y su cultura. Sin embargo, aún no se percibe claramente que las políticas y las decisiones relacionadas con la producción y el consumo de alimentos son los principales impulsores del tipo de sistema de producción agrícola actual; que a su vez impactan en el paisaje, las comunidades y en el ambiente en donde todos están insertos y se desarrollan (Pretty, 2002).

Un reto importante es compatibilizar un concepto integral de diseño y manejo de la agricultura con el hecho de que tanto la planificación nacional agrícola para el año 2020, como la publicidad de las compañías agrícolas que promueven variedades e híbridos, se centran principalmente en alcanzar los máximos rendimientos de los cultivos en vez del óptimo rendimiento del sistema agrícola.

Las guías para el manejo químico de plagas se basan en ensayos anuales de monocultivos en vez de hacerlo sobre el sistema agrícola, agropecuario o agroalimentario. Estas estrategias que, entre otras, contribuyeron al monocultivo como forma de producción, fueron promovidas por una nueva infraestructura rural, el alquiler de la maquinaria agrícola, el arrendamiento de tierras, las políticas nacionales y los mercados internacionales. Sin descartar que existe una clara necesidad de estudiar los cultivos como “monocultivos” para mejorar su rendimiento y comprender su respuesta a plagas, a diferentes condiciones ambientales y de suelo entre otros, es también importante profundizar la investigación sobre cómo estos cultivos se desempeñan en la interacción con otros en el tiempo y en el espacio y en diferentes zonas del país. Estos retos requieren nuevos enfoques para medir el impacto del cambio tecnológico en la producción de cultivos y las consecuencias ambientales de las prácticas de manejo (Ringler et al., 2014).

Manuel-Navarrete et al. (2005), Viglizzo et al. (2006) y otros autores han discutido los impactos de la intensificación agrícola de Argentina. En este trabajo enriquecemos la comprensión del comportamiento de los sistemas con indicadores que tienen en cuenta el concepto de ciclo de vida expandido. El mismo es un enfoque multicriterio y multiescala que nos permite tener una imagen integral no sólo del desempeño del sistema en un determinado momento sino también de la trayectoria realizada y estimar su evolución futura siguiendo la tendencia de la impronta dejada. Los resultados de este tipo de abordaje ayudan a la toma de decisiones y a las planificaciones

Los objetivos de este estudio fueron [1] evaluar el uso de los recursos y los impactos ambientales de los esquemas agrícolas actuales en el norte de la región pampeana, [2] compararlos con los sistemas agrícolas de décadas anteriores, y [3] analizar la incidencia de las diferentes proporciones de tierras asignadas a los tres principales cultivos de la región en el espacio y en el tiempo.

Sistemas de producción analizados

Se analizaron los sistemas de cultivos anuales representativos de la zona norte de la región pampeana (maíz, soja y trigo/soja) en los ciclos agrícolas 1986-87, 1995-96 y 2009-10. Cada uno de estos períodos tiene características propias en cuanto al manejo de los sistemas y al contexto socio-económico.

Los datos de los sistemas de cultivos fueron proporcionados por el grupo CREA Sur de Santa Fe, siendo el año y la hectárea la escala espacio-temporal utilizada.

Cuatro fueron los sistemas elegidos para el estudio. Sin embargo, en el presente resumen se muestran solo los resultados de dos de ellos, el sistema denominado “de agricultores” y “simulado”, motivo fundamental del estudio (Tabla 1).

i) Sistema de Agricultores: son datos obtenidos de sistema reales, donde las proporciones de la distribución de tierra asignada para los cultivos fueron reportadas por los mismos responsables de los establecimientos en cada período.

ii) Los sistemas simulados: Las estimaciones de las diferentes proporciones de tierras asignadas a los mismos cultivos, se estimaron en base a recomendaciones de expertos y se utilizó como base el sistema de cultivos del período 2009-10. Estas estimaciones también se compararon a 1986 agricultores sistemas.

Tabla 1. Tierra, trabajo, servicios y rendimiento en los sistemas “agricultores” y “simulados”, de acuerdo a la secuencia de cultivos: maíz- soja- trigo/soja.

	Sistema Agricultores			Sistema Simulados de 2009-10				
	1986-87	1995-96	2009-10	C	D	E	H	P
Proporción Cultivo (%)	42-43-15	28-40-32	26-13-61	30-40-30	50-20-30	50-0-50	0-60-40	40-40-20
Distribución cultivo/lote ⁽¹⁾	4 : 3	4 : 3	4 : 3	4 : 3	4 : 3	3 : 2	3 : 2	4 : 3
Trabajo directo (h/ha-año)	9.65	8.07	3.01	3.27	3.36	3.90	3.36	3.04
Rend. (J/ha- año) ⁽²⁾	4.28 ¹⁰	7.78 ¹⁰	12.60 ¹⁰	11.85 ¹⁰	13.90 ¹⁰	14.68 ¹⁰	9.17 ¹⁰	12.48 ¹⁰
Rend. (USD/ha- año) ⁽³⁾	291.73	792.42	1221.46	1140.05	1220.89	1285.09	1050.89	1148.38
Servicios (USD/ha- año)	113.56	219.95	356.42	291.52	343.89	393.48	237.76	292.91

Nota: La proporción de la tierra asignada a alternativa simulada "C" es similar a la proporción de la tierra utilizada en 1995, y lo mismo con la alternativa "P" y el año 1986. **1-** Se refiere al número de parcelas ocupadas por cultivos, por ejemplo 4:3 = cuatro cultivos que ocupan 3 parcelas durante el año; **2-** Rendimiento según contenido energía en granos; **3-** Rendimiento según valor económico granos, (Márgenes Agropecuarios en los años correspondientes).

Método

Se utiliza un enfoque integral en donde intervinieron diferentes herramientas que se basan en un inventario de análisis de vida expandido (ACV expandido, Ulgiati et al., 2006). Esta perspectiva se asienta en el concepto de que la explotación de recursos naturales y los impactos al ambiente ocurren no sólo por el uso de los insumos y servicios en el momento de la producción (siembra, cosecha y comercialización de

maíz), sino también en la cadena hacia atrás (ejemplo: extracción de recursos de la naturaleza, producción de insumos). Este enfoque tiene en cuenta los flujos ambientales, las contribuciones provenientes de la sociedad (insumos y servicios) y las emisiones. Se obtienen así un conjunto de indicadores que abarca un amplio abanico para el análisis a través de diferentes escalas espaciales y temporales.

La descripción de los indicadores analizados se detalla a medida que se utilizan, ya que en el presente trabajo solo abordaremos algunos de los representados.

Resultados y Discusión

Los cambios tecnológicos que se produjeron durante el período analizado (1986-2010), incluyó la introducción de la siembra directa, el doble cultivo (trigo/soja), un mayor uso de fertilizantes químicos, la introducción de cultivos transgénicos, y una nueva generación de productos de agroquímicos que, según indican, tienen un menor impacto en el entorno. Estos cambios dieron lugar a un aumento del rendimiento total del 195% cuando el producto (granos) se expresa por su contenido energético (J/ha) y de 319% cuando se expresa por su valor económico (USD/ha) (Tabla 1).

Se tomó el año 1986 como año inicial ó base para el análisis y por lo tanto todos los indicadores fueron normalizados y comparados con ese año. De esta manera, todos los indicadores que entran dentro de los límites del año 1986 (trazo entero negro de las Figuras 1, 2 y 3) indican una mejora de ese indicador en el sistema a lo largo del tiempo, mientras que todos los que están fuera de ese límite indican un agravamiento del mismo.

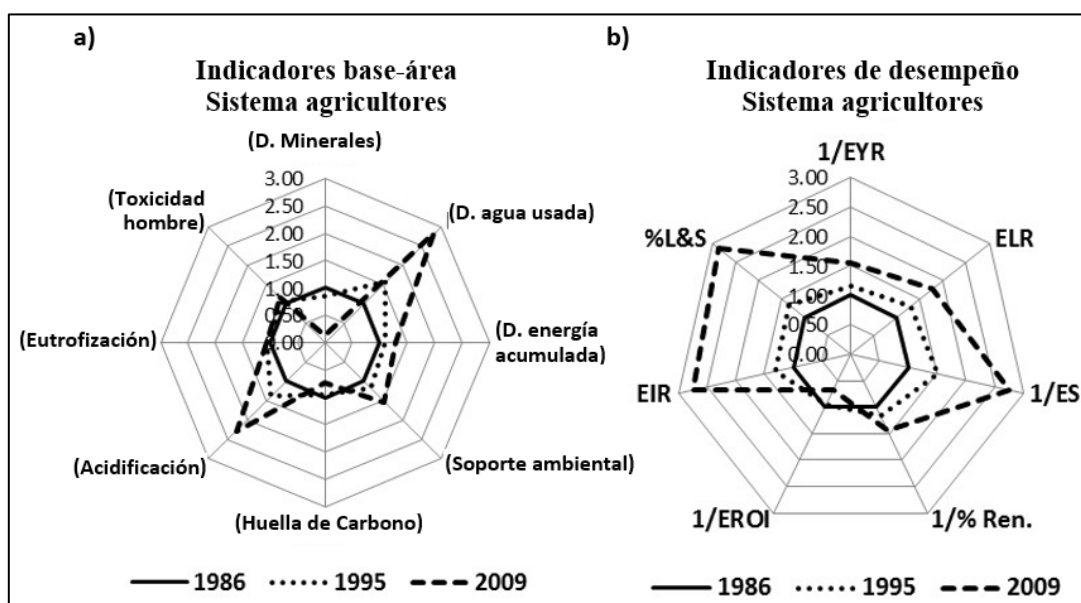
En el período analizado, el cambio hacia la siembra directa (SD) fue acompañado por la intensificación y por un aumento en la superficie destinada a cultivos. La adopción de la SD trajo aparejado una disminución en la erosión del suelo, menor uso de maquinarias que implicó una disminución tanto en la extracción de minerales (D. minerales) para su fabricación como en la emisión de gases efecto invernadero (H. de carbono) (Figura 1a).

Sin embargo, la SD co-evolucionó con un aumento en el uso de fertilizantes químicos, servicios (que se refiere al trabajo indirecto relacionado al know-how, infraestructura, etc.), y de tecnología relacionada a la semilla, siembra, pulverización y cosecha. Todo esto ha impactado en el trabajo directo e indirecto (%L&S), la acidificación, eutrofización y toxicidad al hombre, así como en la demanda de energía acumulada, agua usada y soporte ambiental requeridos para la producción de cada uno de los insumos utilizados. (Figuras 1 y 2).

A lo largo de los 25 años analizados, los indicadores por superficie (Figura 1a) y de desempeño (Figura 1b) **que son independientes del rendimiento**, han empeorado en comparación con el año de referencia (1986). Así vemos que 6 de los 8 indicadores calculados por superficie (Figura 1a) y 6 de los 7 indicadores de desempeño ambiental (Figura 1b) muestran un deterioro del sistema en el tiempo. Por ejemplo, el %REN (% de renovabilidad) muestra que el sistema utiliza menos recursos renovables para su desarrollo que en el año de referencia (1986). Hoy en día los sistemas analizados

pasaron de utilizar 38% de recursos renovables en 1986 a 19% en 2010. Aquí surge la pregunta, podemos considerar a los biocombustibles como "bio", si sólo el 19% de un cultivo es renovable?. Así, los sistemas también han disminuido su habilidad para utilizar los recursos renovables en función de los insumos invertidos (EYR) en un 36% y aumentado su carga ambiental relacionada a insumos externos (ELR) en 153%. Es decir, por más insumos externos que agreguemos, el sistema no activa, más de lo que ya está haciendo, el aprovechamiento de sus recursos renovables.

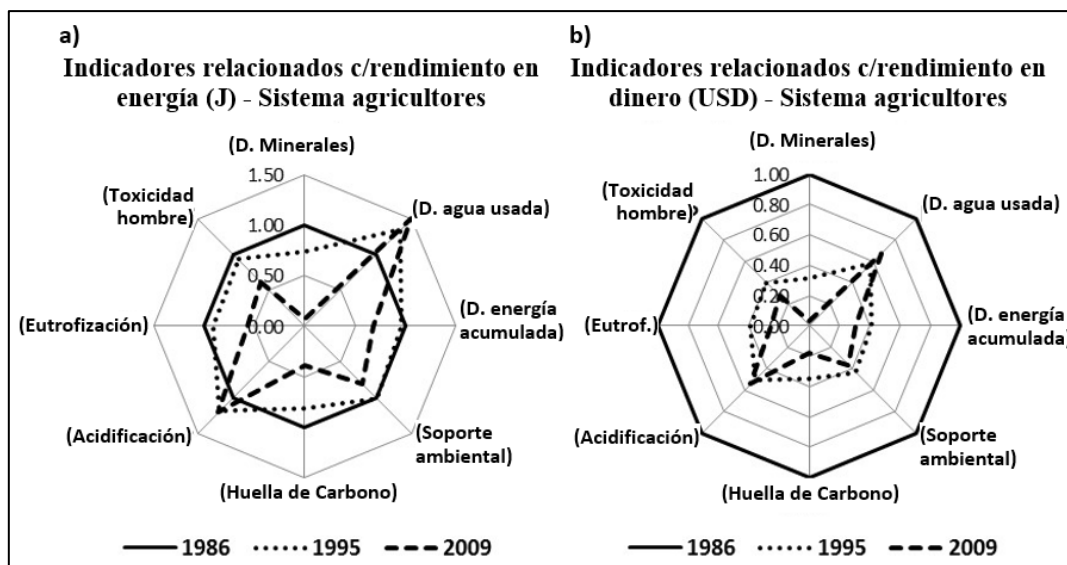
Figura 1. Indicadores independientes del rendimiento; por unidad de área (ha) y de desempeño ambiental



Nota: Los indicadores se muestran en cada vértice de las Figuras a y b. La línea sólida negra corresponde al año de referencia (1986) y todos los indicadores que entran dentro de esa área indican una mejora del sistema y todos aquellos que salen de la misma indican un agravamiento del mismo a lo largo del tiempo. **EYR:** Tasa de rendimiento del desempeño ambiental del sistema (indica la habilidad que tiene el sistema para utilizar los recursos naturales en función de los insumos utilizados); **ELR:** Tasa de carga ambiental del sistema; **%Ren:** Porcentaje de renovabilidad del sistema (% de recursos naturales utilizados por el sistema); **ESI:** Índice de sostenibilidad ambiental; **EIR:** Tasa de inversión ambiental ; **%L&S:** Porcentaje de trabajo directo e indirecto invertido en el sistema; **EROI:** Retorno de energía en función de la energía invertida.

Sin embargo, los indicadores calculados por energía de producto obtenido (J) y por el dinero recibido (USD), **que son dependientes del rendimiento**, mostraron mejoras en los sistemas estudiados ya que en el primer caso 6 indicadores de 8 mejoraron (Figura 2a) y el segundo todos los indicadores mejoraron (8 de 8) (Figura 2b).

Figura 2. Indicadores dependientes del rendimiento; por unidad de energía (J) y por unidad de dinero (USD)



Nota: Los indicadores se muestran en cada vértice de las Figuras a y b. La línea sólida negra corresponde al año de referencia (1986) y todos los indicadores que entran dentro de esa área indican una mejora y todos aquellos que salen de la misma indican un agravamiento del mismo a lo largo del tiempo.

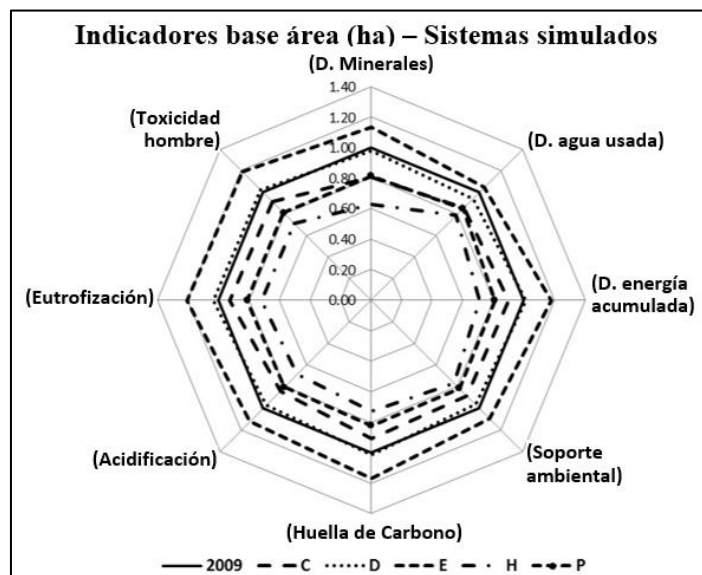
Así vemos, que según la base que se utilice para calcular los indicadores (por área, energía o dinero) puede asumirse que el sistema ha mejorado o empeorado a lo largo del tiempo. Por ejemplo los indicadores por área de energía acumulada (J/ha), de soporte ambiental (seJ/ha) y de agua utilizada (g agua/ha) (Figura 1a), muestran resultados diferentes que cuando se los calcula por energía (J/J), (seJ/J) y (g agua/J) (Figura 2a), ó por dinero (J/USD), (seJ/USD) y (g agua/USD) (Figura 2 b).

Los indicadores calculados en base a unidades independientes del rendimiento permiten gestionar el sistema en el largo plazo, mientras que cuando se calculan los indicadores en base a unidades indicativas de rendimiento, proveen un panorama puntual y de corto plazo del sistema. Entonces para tener una real dimensión del funcionamiento de un sistema, se deben tener en cuenta tanto los indicadores calculados en unidades dependientes como independientes del rendimiento.

En los sistemas simulados (Figura 3), la alternativa H (maíz=0%, soja=60% y trigo/soja=40%), que corresponde a una intensidad de 1.5 cultivos/año es la que muestra mejor comportamiento en los indicadores por área analizados debido a un menor uso de insumos y servicios (trabajo indirecto). Sin embargo el beneficio derivado de este menor uso, se contrarresta con la debilidad ecológica local al que se expone (Bilenca et al., 2012) y con la vulnerabilidad económica de tener en el 100% del campo un solo cultivo (soja) durante 4 meses. La alternativa E (maíz=50%, soja=0% y trigo/soja=50%), que también implica 1.5 cultivos/año, muestra el peor comportamiento ambiental. En cambio, la alternativa simulada D (maíz=50%, soja=20% y trigo/soja=30%), que significa una intensidad de 1.3 cultivos/año, tiene mejor comportamiento ambiental que la alternativa E. Se estima que existe potencial para mejorar muchos de

los indicadores de estos sistemas reduciendo el uso de recursos externos y aumentando la dependencia en los recursos renovables locales.

Figura 3. Indicadores independientes del rendimiento por unidad de área (ha) en los sistemas simulados tomando como base de referencia el año 2009



Nota: Los indicadores se muestran en cada vértice de las Figuras a y b. La línea sólida negra corresponde al año de referencia (1986) y todos los indicadores que entran dentro de esa área indican una mejora y todos aquellos que salen de la misma indican un agravamiento del mismo a lo largo del tiempo. Las proporciones relacionadas a las alternativas C; D; E; H y P se detallan en la Tabla 1.

Los resultados del análisis integral de sistemas realizado en este estudio sugieren que si se continúa la tendencia de manejo agrícola actual, en el largo plazo la misma no será de interés ni para los agricultores ni para la sociedad. El paradigma actual de la agricultura está centrado en la simplificación y la globalización del sistema de producción y orientado generalmente al mercado para la provisión de productos agrícolas.

Actualmente hay dos fuerzas actuando que parecería estuvieran en conflicto y que si bien ambas pretenden cuidar el ambiente sin afectar el bolsillo del productor, las mismas están caracterizadas por dar prioridad a motivaciones diferentes. Por un lado muchos académicos, asesores y grupos agrícolas y de extensión, recomiendan la rotación de cultivos y la diversificación como prácticas importantes para cuidar el ambiente y para la estructura y salud del suelo. También las recomiendan por ser prácticas esenciales para una producción y rendimiento sostenibles en el largo plazo. Este grupo está más interesado en el cuidado del ambiente, la salud y el bienestar de los agricultores y la sociedad. Por otro lado, las principales compañías de insumos ponen en marcha programas y publicidades que describen aumentos potenciales de los rendimientos que no afectan negativamente a los recursos naturales, el bienestar de los agricultores, o la vitalidad e infraestructura de la comunidad. Este grupo está más interesado en perseguir un modelo económico clásico con el foco en la nueva tecnología, las ventas de productos, y los beneficios para los agricultores y el sector

comercial que supuestamente asegura el crecimiento de la economía y un mayor bienestar para todos.

Sin embargo en general, los dos grupos hacen recomendaciones basadas en rendimientos obtenidos en ensayos anuales de monocultivos, porque existe escasa evidencia de investigación empírica sobre el rendimiento y el desempeño de un sistema de cultivos en las escalas espacial y temporal. Así, la planificación de la política nacional para el año 2020 se nutre con los datos disponibles y la visión económica convencional de una agricultura funcionando como un conjunto de cultivos independientes entre sí. Esta falta de datos sobre perspectivas más amplias del desempeño del sistema para ofrecer a los decisores políticos, remarca la importancia de las contribuciones que pueden realizar los análisis de ciclo de vida expandido como el realizado en este estudio.

De los resultados también deducimos que para brindar la mejor información posible a los decisores políticos y de establecimientos agropecuarios sobre una intensificación sostenible apropiada de la agricultura, se requerirá la introducción de análisis con un enfoque integrado que incluye múltiples dimensiones del proceso de producción, en definitiva un cambio de paradigma agrícola. El logro de este escenario representa uno de los mayores retos científicos y culturales actuales que enfrentamos.

Cuando vemos el paisaje en forma integral, conformado por una combinación de cultivos, pueblos y una miríada de otras especies, que interactúan a su vez con otras regiones vecinas, emerge una imagen que nos ayudará a cambiar las recomendaciones basadas en ensayos anuales de monocultivos, hacia los sistemas integrales de cultivos. Para planificar un cambio de este tipo se requerirá de un marco estratégico de política nacional agropecuaria a largo plazo para cada región. Nuestro estudio puede contribuir a la planificación y al bienestar regional si cualquier estrategia de sistema de cultivos seleccionada es acompañada no sólo con información sobre los requerimientos productivos sino también con las del desempeño ambiental y social del sistema agropecuario.

Conclusiones

- El panorama reflejado por los indicadores mostró diferencia si los mismos se calculan por unidad de producto (J ó USD), debido al aumento del rendimiento ó por unidad de área. Las recomendaciones entonces, son diferentes si los cálculos se basan en la producción por unidad de área o por unidad de rendimiento de los cultivos, y diferente de nuevo si se consideran el soporte ambiental dentro de los indicadores. Esto introduce una tensión entre los defensores del ambiente con una mirada en el largo plazo, los interesados en las ganancias a corto plazo, y los grupos que deben centrarse en los estados financieros y los beneficios a corto plazo.

- Los resultados, también demuestran que un mayor uso de la tecnología está acompañada por la intensificación de insumos y servicios que dan como resultado el empobrecimiento del ambiente. Los cálculos también mostraron un mejor rendimiento de alternativas que utilizan menos insumos externos, y que las decisiones deben tomarse

en base a aspectos ambientales y agronómicos demostrando la importancia de los estudios multidisciplinarios.

- Los especialistas y asesores agrícolas y de extensión recomiendan la rotación de cultivos y la diversificación, sin embargo, muchas decisiones de los agricultores, la publicidad de productos comerciales, las estrategias de ventas, y las decisiones de planificación nacional para el presente y para el año 2020 se basan en datos, insumos utilizados y expectativas de rendimiento obtenidos en ensayos anuales de monocultivos en vez de hacerlo sobre la base de un sistema, para lo cual este estudio aporta.

- Este trabajo de investigación proporciona un set de indicadores con un enfoque de ciclo de vida expandido porque incluye el soporte del ambiente, contribuyendo con información alternativas de eficiencia y desempeño de los esquemas de producción agrícola.

- Los resultados también revelan que un solo indicador (como la huella de carbono o huella de agua) no es lo suficientemente robusto como para fundamentar las decisiones, y que ninguna medida, si es única, será óptima para describir el comportamiento del sistema. El tipo de esquema de sistema agrícola que debe ser recomendado dependerá de la importancia que se da a cada indicador, basado en los objetivos del agricultor, la economía y la normativa vigente, la productividad en el corto y largo plazo, los impactos ambientales a largo plazo, así como el corto/largo plazo de las economías regionales. Parece claro que las evaluaciones multicriterio como la presente, resaltan la necesidad de tomar decisiones tendientes a la optimización del sistema agrícola y a asumir compromisos, en lugar de insistir en la maximización del mismo y en las acciones individuales. El marco y los procedimientos de evaluación aplicados en el presente estudio también se podrían utilizar para sustentar las decisiones políticas, y por lo tanto proporcionar incentivos positivos o control reglamentario necesario para lograr tanto de los objetivos de corto y largo plazo de los agricultores como de la sociedad.

Bibliografía

Bilenca, D., Codesido, C., González Fischer, C., Pérez Carusi, L., Zufiaurre, E., Abba, A. (2012). "Impactos de la transformación agropecuaria sobre la biodiversidad en la provincia de Buenos Aires". *Rev. Mus. Argentino Cienc. Nat.*, n.s. 14(2):189-198.

FAOSTAT. (2011). Disponible en <http://faostat.fao.org/> . Última visita en Febrero 2014.

Forjan, H., Manso, L. (2012). *Rotaciones y secuencias de cultivos en la región mixta cerealera del centro sur bonaerense. 30 años de experiencias*. Ediciones INTA, 102 pp.

Manuel-Navarret, D., Gallopín, G., Blanco, M., Díaz-Zorita, D., Ferraro, H., Laterra, P., Morello, J., Murmis, M.R., Pengue, W., Piñeiro, M., Podestá, G., Satorre, E., Torrent, M., Torres, F., Viglizzo, E., Caputo, M., Celis, A. (2005). *Análisis sistémico de la agriculturización en la pampa húmeda argentina y sus consecuencias en regiones*

extrapampeanas: sostenibilidad, brechas de conocimiento e integración de políticas. ONU-CEPAL. División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos. Serie Medio Ambiente y Desarrollo N° 118, 65 pp.

Naylor, R. (2008). Managing food production systems for resilience. In: Chapin G., Kofinas, G., Folke, C. (Eds), *Principles of natural resource stewardship: Resilience-based management in a changing world.* New York, Springer, 399 pp.

Pretty, J. (2002). *Agri-culture. Reconnecting people, land and nature.* Earthscan, 264 pp.

Ringler, C., Cenacchi, N., Koo, J., Robertson, R., Fisher, M., Cox, C., Perez, N., Garret, K., Rosegrant, M. (2014). Sustainable agriculture intensification. The promise of innovative farming practices. In: Marble, A., Fritschel (Eds), *Global food policy report*, IFPRI-International Food Policy Research Institute, 154 pp.

Ulgiati, S., Raugei, M., Bargigli, S. (2006). “Overcoming the inadequacy of single-criterion approaches to life cycle assessment”. *Ecological Modelling* 190:432-442.

Viglizzo, E.F., Frank, F., Bernardos, J., Buschiazzo, D.E., Cabo, S. (2006). “A rapid method for assessing the environmental performance of commercial farms in the Pampas of Argentina”. *Environmental Monitoring and Assessment* 117, 109–134.