

Beneficios y costos ecológicos de sistemas de laboreo en el largo plazo. Estudio de caso en el SO bonaerense, Argentina*

Regina Durán^a, Liliana Scoponi^a, Gabriela Pesce^{a,b} y Marianela De Batista^{a,b}

RESUMEN: El objetivo del trabajo es cuantificar económicamente impactos ambientales sobre la calidad del suelo, derivados de la implementación de sistemas de laboreo alternativos: siembra directa versus laboreo convencional. El análisis se desarrolla en una finca del sudoeste bonaerense, Argentina, para el período 1986-2008. Se cuantifica económicamente el balance de nutrientes por el método del costo de reposición; y se valoran los servicios ambientales de ambas técnicas mediante la función de producción ajustada, atendiendo sus rendimientos físicos. Se concluye que la siembra directa presenta un mejor desempeño desde las perspectivas estudiadas, especialmente ante escenarios de precipitaciones y niveles de nitrógeno bajos.

PALABRAS CLAVES: Costos y beneficios ambientales, laboreo convencional, propiedades edáficas, siembra directa, sustentabilidad.

Clasificación JEL: Q51, Q24, Q15.

DOI: 10.7201/earn.2012.02.03.

Ecological benefits and costs of tillage systems in the long run. Case Study in OS Buenos Aires, Argentina

ABSTRACT: The aim of this paper is to quantify economically environmental impacts on soil quality resulting from the implementation of alternative tillage systems: conventional tillage versus no-tillage system. The analysis is developed in a farm located in southwestern Buenos Aires, Argentina, for the period 1986-2008. We quantify in economic terms the balance of nutrients by the replacement cost method; and there are assessed the environmental services of both practices using an adjusted production function that consider their physical production. We conclude that no-tillage system has a better performance from the studied perspectives, especially at low rainfall and levels of nitrogen scenarios.

KEYWORDS: Environmental costs and benefits, conventional tillage, soil properties, no-tillage, sustainability.

JEL classification: Q51, Q24, Q15.

DOI: 10.7201/earn.2012.02.03.

* El artículo se desprende de un Proyecto de Grupo de Investigación (PGI 24/C021) financiado por la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina. Los integrantes del proyecto son: R. Durán (Directora), L. Scoponi (Co-directora), J. Galantini, P. Chimeno, M. Sánchez, M. Cordisco, G. Pesce, G. Oliveras, L. Merino, M. De Batista, M. Gzain (alumno avanzado).

^a Departamento de Ciencias de la Administración, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.

^b Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

Agradecimientos: Los autores agradecen de manera especial al Ing. Agr. Cristian Kleine a cargo de la finca "Hogar Funke", por su disponibilidad para acceder a la información.

Dirigir correspondencia a: Regina Durán. E-mail: rduran@criba.edu.ar.

Recibido en diciembre de 2011. Aceptado en mayo de 2012.

1. Introducción

Actualmente, existe en la sociedad una preocupación creciente por lograr un equilibrio entre crecimiento económico y medio ambiente. La presión de la actividad antrópica sobre los recursos naturales, en virtud de su aprovechamiento irracional, ha generado externalidades negativas que amenazan la posibilidad de alcanzar un desarrollo sustentable.

De acuerdo con la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo, el Desarrollo Sustentable es aquel que permite satisfacer las necesidades de las generaciones presentes, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para resolver también las propias (WCED, 1987). De esta manera, pone énfasis en la equidad intra e intergeneracional. Se trata de un concepto complejo por su multidimensionalidad, ya que se apoya en tres pilares: ecológico, económico y socio-político-cultural.

Desde el punto de vista agropecuario, la sustentabilidad está relacionada con la capacidad productiva (agronómica y económica) del sistema, así como con la preservación de los recursos naturales involucrados (suelo, agua, biodiversidad, etc.). En este sentido, el suelo es el recurso más sensible en los sistemas de producción y su calidad es definida en términos de sus propiedades químicas, físicas y biológicas, siendo considerada la materia orgánica como el indicador más importante (Doran y Parkin, 1994).

La frecuencia e intensidad de los laboreos altera las propiedades del suelo, la distribución de la materia orgánica y de los nutrientes de la profundidad laboreada (Balesdent *et al.*, 2000; Franzluebbers, 2002). Estos cambios, en el largo plazo, pueden reflejarse en la disponibilidad de nutrientes, en la productividad de cultivos y en definitiva en la sustentabilidad del sistema. El cambio de un sistema con laboreo (LC) a siembra directa (SD) produce una serie de modificaciones en el suelo que pueden ser caracterizadas por distintas etapas, llegando a estabilizarse luego de 20 años (Moraes Sa, 2003).

De acuerdo con el “Conservation Technology Information Center” de EE.UU., la SD es “el sistema de preparación del suelo y de vegetación para la siembra en el que el ‘disturbio’ realizado en el suelo para la colocación de las semillas es mínimo, ubicando éstas en una angosta cama de siembra o surco que depende del uso de herbicidas para el control de las malezas. El suelo se deja intacto desde la cosecha hasta una nueva siembra, excepto para inyectar fertilizantes.”

La SD en sí misma, considerada como “no laboreo”, no alcanza para hablar de agricultura productiva y sustentable. Para adquirir esa condición, requiere un marco de rotación de cultivos (incluyendo cultivos de cobertura, si fuera necesario), un manejo integrado de malezas, insectos y enfermedades, una nutrición balanceada con reposición de nutrientes y un uso racional y profesional de insumos externos (comprendiendo el manejo apropiado de agroquímicos y el tratamiento de los envases). Es decir, constituye más que una mera técnica de laboreo, en virtud de que funciona como sistema.

Si bien existe información acerca del efecto de la materia orgánica sobre algunas propiedades químicas, físicas y biológicas, la expansión acelerada de la SD, que en pocos años ha llegado a superar el 50% de la superficie agrícola-ganadera del país, hace que no se conozcan detalladamente los efectos sobre el suelo y el ambiente. Esta carencia de información es más evidente, en relación a los cambios que se producen en el largo plazo, al impacto del mayor uso de agroquímicos y, en especial, a su sustentabilidad en la amplia variedad de condiciones edafoclimáticas de las regiones subhúmedas y semiáridas.

Aún cuando la SD se inició en Argentina en la década de 1970, existen pocos estudios comparativos que tengan antigüedad suficiente para evaluar sus efectos de largo plazo, como los efectuados en la finca “Hogar Funke” –Tornquist, Buenos Aires– desde el año 1986, elegido como unidad de análisis para el presente trabajo. Sobre la base de los resultados de dichas investigaciones agronómicas (Kleine y Puricelli, 2001; Galantini *et al.*, 2006 y 2007), se ha considerado relevante complementar el análisis de los cambios ocurridos en la calidad del suelo, durante el período 1986-2008, que incluye la siguiente secuencia cronológica de cultivos: maíz, trigo, girasol, trigo, girasol, trigo, sorgo, cebada, maíz, cebada, maíz, trigo, maíz, trigo, cebada, girasol, trigo, trigo, girasol, cebada, girasol, trigo.

En este sentido, las ciencias están avanzando, a través de diferentes metodologías, en la evaluación de impactos ambientales. Se busca evitar una sobreestimación de la rentabilidad de diferentes alternativas productivas, que incentive la degradación del capital natural, y excluyan del modelo productivo otras más preservadoras del medio ambiente, pero en apariencia menos rentables (Flores y Sarandón, 2002).

El presente trabajo intenta ser un aporte en esta dirección, tendiente a mejorar la calidad de las decisiones gerenciales orientadas al desempeño sustentable de la finca, con una visión sistémica e interdisciplinaria. Como avance de la investigación, se plantean los siguientes objetivos:

- Cuantificar el impacto económico de los cambios producidos en las propiedades químicas del suelo (balance de nutrientes), y en los rendimientos físicos obtenidos durante las campañas 86/87 a 05/06, bajo SD y LC, mediante aquellos métodos de medición que permitan internalizar los costos o beneficios ambientales producto de dichos cambios.
- Comparar las contribuciones marginales (CM) de los cultivos de la rotación en ambas técnicas de laboreo (SD y LC), antes y después de computar los costos o beneficios ambientales.
- Estimar costos ambientales por efecto de la erosión de la LC respecto al sistema de SD.
- Analizar interdisciplinariamente el alcance de los métodos adoptados para su medición, atendiendo los resultados de las investigaciones agronómicas efectuadas en el “Hogar Funke”.

2. Materiales y métodos

Se tomó como caso de estudio la finca “Hogar Funke” (Tornquist, Buenos Aires, Argentina), que ha mantenido parte de un lote con dos manejos diferentes: SD y LC, desde el año 1986. Detalles de sitio, manejo, y otras explicaciones metodológicas se detallan en Kleine y Puricelli (2001) y Galantini *et al.* (2006). En ambos casos, se planteó un esquema de rotación de cultivos siguiendo una misma secuencia, desde la campaña 86/87 hasta 07/08 (cronológicamente: maíz, trigo, girasol, trigo, girasol, trigo, sorgo, cebada, maíz, cebada, maíz, trigo, maíz, trigo, cebada, girasol, trigo, trigo, girasol, cebada, girasol, trigo).

2.1. Estimación del balance de nutrientes

Se calculó la extracción total por el cultivo de nitrógeno, fósforo y potasio, en cada año del período de estudio, para SD y LC, utilizando –en función de los rendimientos obtenidos– valores citados por distintos autores nacionales y extranjeros recopilados por INPOFOS Cono Sur (Ciampitti y García, 2007). Asimismo, se consideraron las entradas de fertilizantes para cada cultivo y para cada año del período de estudio. A fin de ajustar las unidades de entrada y salida, se utilizaron las densidades aparentes determinadas en el momento inicial y final del período de estudio, mientras que los valores intermedios fueron estimados ponderando los valores medidos. De esta manera, se calculó el balance expresado en $\text{kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$, para los macro nutrientes, nutrientes intermedios y micro nutrientes.

A los fines de una lectura más rápida, los nutrientes se presentarán con sus siglas: Nitrógeno (N), Potasio (K), Fósforo (P), Magnesio (Mg), Azufre (S), Calcio (Ca), Zinc (Zn), Manganeseo (Mn), Boro (B), Cloro (Cl), Cobre (Cu), Molibdeno (Mo).

2.2. Determinación de rendimientos físicos

La evaluación del rendimiento se realizó por cosecha mecánica y el peso se obtuvo en balanzas convencionales.

Si bien el esquema de rotación ha comprendido, en general, cultivos de cosecha (granos), en la campaña 98/99 el maíz no tuvo tal destino, ya que se aplicó a la alimentación de ganado bovino. Por esta razón, en este caso, a los fines del presente trabajo, no se han computado los rendimientos obtenidos, por no contar con datos de su medición.

2.3. Valoración económica de los impactos identificados sobre el capital natural y la productividad del sistema

A diferencia del análisis económico tradicional, este trabajo incluirá el cálculo de los costos o beneficios ambientales por los impactos identificados, como una forma de hacer operativo el concepto de sustentabilidad. Dado que se pretende captar especialmente el valor de uso directo e indirecto de los servicios ambientales del suelo afectados por los sistemas de laboreo (SD y LC), los métodos aplicados pertenecen a la familia de métodos de valoración ambiental basados en la función de producción (Azqueta, 1994; Seroa da Motta, 1998). Por tal motivo, se han desestimado aquellos métodos basados en la función de demanda. Para la determinación de los costos o beneficios ambientales, teniendo en cuenta los resultados de los ensayos relevados, se consideró la aplicación de los siguientes en particular:

- Método del costo de reposición. Consiste en determinar los costos (inversiones, gastos) de abatir el daño ambiental causado por la contaminación, reemplazar los atributos ambientales dañados por otros equivalentes, o restaurar un medio dañado a su estado original. Es decir, implica todos aquellos costos para contrarrestar el daño ya causado, dependiendo del tipo de activo ambiental que se pretende restituir (Abad, 1996). Se calculó, computando el costo de los fertilizantes necesarios para la reposición a partir del balance de nutrientes, incluyendo el costo de la labor.
- Método de la función de producción. Dicho método estima el valor de un beneficio o daño ambiental, basado en los valores de variación de la productividad de un ecosistema o de un sistema productivo (Azqueta, 1994).

Dado que dichos métodos captan efectos complementarios, se decide aplicarlos en conjunto para reconocer la capacidad de cuantificación de costos y beneficios ambientales derivados de los sistemas de laboreo e identificar sus limitaciones a la luz del comportamiento complejo del suelo como sistema natural.

2.4. Cálculo de la contribución marginal por sistema de laboreo y por cultivo antes y después del cómputo de costos o beneficios ambientales

A los fines de evaluar comparativamente las técnicas de laboreo (SD y LC), se plantea el cálculo de las contribuciones marginales para cada uno de los cultivos de la rotación de las campañas 86/87 a 05/06, aplicando Análisis Marginal. Según esta metodología, la contribución marginal se determina por diferencia entre ingresos por ventas y costos variables (de producción, comercialización y financieros), necesariamente incurridos para generarlos. Representa la contribución para cubrir los costos fijos del período, que podrá arrojar o no una utilidad neta, en caso de exceso o defecto, respectivamente.

Asimismo cabe aclarar que sólo se consideraron los costos diferenciales de ambos sistemas de laboreo, es decir, aquellos sacrificios económicos que son relevantes para la decisión, y que varían con la alternativa elegida. No se han computado entonces, los costos de análisis de suelo, análisis de calidad del grano, y los costos fijos indirectos de la finca, por su carácter de costos no incrementales.

En el cálculo económico, se adoptaron valores corrientes de mercado, para un período base. Como tal, se eligió el mes de marzo de 2008, anterior al inicio del conflicto agropecuario suscitado en Argentina durante ese año¹. Se trabajó con el supuesto de labores tercerizadas (“empresa maquinaria”), calculadas según el valor UTA (Unidad de Trabajo Agrícola) vigente para el período base.

Para la determinación de los costos ambientales a incorporar en la ecuación económica, en este primer avance de la investigación, se optó por la aplicación del método del costo de reposición, dadas las limitaciones encontradas para el empleo del método de la función de producción. Resulta preciso aclarar que, en aquellas campañas en las que el balance de nutrientes arrojó excedentes de fósforo, éstos se computaron como un beneficio ambiental. Este criterio no fue seguido para el caso del nitrógeno, en virtud de que su efecto residual en el suelo puede perderse con el tiempo, por ser más dinámico y variable.

Por otra parte, es pertinente destacar que, al comparar lotes de igual superficie en LC y SD con la misma rotación, su incidencia puede aislarse, ya que actúa como parámetro en el cálculo de costos ambientales.

3. Resultados y discusión

El rendimiento promedio para el período de estudio en SD fue de 2,55 t ha⁻¹ respecto a 2,15 t ha⁻¹ en LC, evidenciándose una mayor estabilidad en el primero –Coeficiente de Variación (CV): 41%– respecto al segundo –CV: 56%–. Del análisis, se observa que inciden, principalmente en años con bajas precipitaciones, las ocurridas durante el período de barbecho, donde las diferencias en rendimiento fueron más evidentes a favor de SD.

3.1. Estimación de costos ambientales

De modo de poder cuantificar el impacto económico (costos o beneficios ambientales) de los cambios producidos en las propiedades químicas del suelo a través del balance de nutrientes, así como en los rendimientos físicos obtenidos durante las 20 campañas, se emplean los métodos de medición del costo de reposición y de la función de producción.

¹ El mismo se trató de un extenso conflicto nacido por la decisión del gobierno de incrementar las retenciones a las exportaciones de soja y girasol y establecer un sistema móvil para éstas (Resolución 125/08), política contra la que protestaron las cuatro organizaciones que reúnen al sector empresario de la producción agro-ganadera en la Argentina.

3.1.1. Método del costo de reposición

Dicho método se asienta en el balance físico de los macro nutrientes, nutrientes intermedios y micro nutrientes, cuyo análisis se comenta a continuación.

El balance de N arroja resultados muy erráticos debido a su gran dependencia respecto a las condiciones climáticas y a los rendimientos en cada ciclo. En general, del análisis se observa que tiende a ser negativo en ambos sistemas entre un rango de -19 y -15 kg de N ha⁻¹ año⁻¹ para SD y LC, respectivamente. En ninguno de los dos casos se alcanzó a reponer este N, por lo que esa diferencia se explica por el agotamiento de la reserva de dicho nutriente en el suelo.

En relación al balance de P, como ya se mencionó, al ser el rendimiento mayor en SD respecto a LC, genera un mayor contenido del nutriente en el grano y por lo tanto una mayor exportación, arrojando un balance más negativo que requerirá, comparativamente, mayores dosis de fertilizantes. Para el caso en estudio, la aplicación de P repuso holgadamente la extracción, quedando un remanente en el suelo del orden de los 2,5 y 3,6 kg de P ha⁻¹ año⁻¹ para los sistemas SD y LC, respectivamente, que se consideró como un beneficio ambiental.

Durante los años de análisis, no hubo incorporación de K, por lo que el balance resultó netamente negativo. Algunos estudios realizados en la región pampeana encontraron que los niveles originales en los suelos no son limitantes para la producción de los cultivos. Evidentemente, con las sucesivas extracciones en el tiempo, esta situación puede cambiar. En este caso, las salidas fueron entre 9 y 10 kg de K ha⁻¹ año⁻¹ para LC y SD, respectivamente.

En resumen, considerando macro nutrientes, en el total de los años de estudio, se extrajeron del suelo: 874 kg de N ha⁻¹, 203 kg de K ha⁻¹ y 167 kg de P ha⁻¹ en SD; y 730 kg de N ha⁻¹, 171 kg de K ha⁻¹ y 138 kg de P ha⁻¹ en LC.

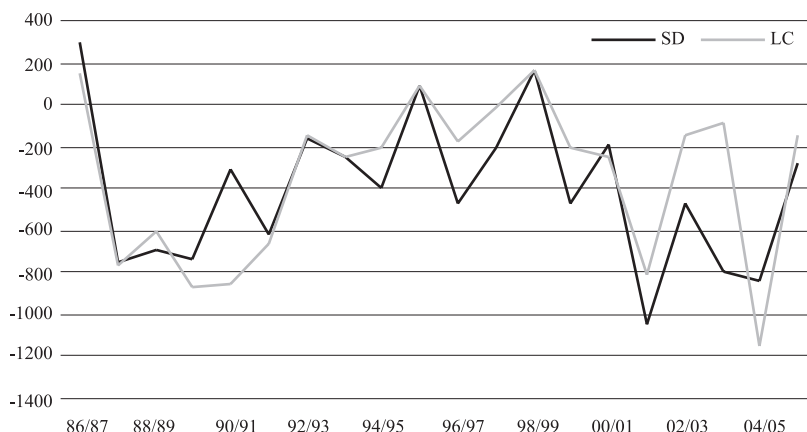
En el caso de los nutrientes intermedios, se hallaron valores del orden de 72 kg ha⁻¹ tanto para el Mg como para el S (no se muestran los valores de Ca, debido a faltantes de datos para algunos cultivos) en SD. En tanto en LC, estos valores se aproximaron a 60 kg ha⁻¹.

Finalmente, considerando los micro nutrientes para SD y LC se han agrupado el Zn y Mn con valores cercanos a 1 kg ha⁻¹ mientras que el B, Cl, Cu, representan una cuarta parte de aquellos, y por último el Mo con 0,038 kg ha⁻¹. Si bien en todos los casos representan valores muy bajos, al no haber reposición, a futuro podrían empezar a manifestarse limitantes.

Lo hasta aquí expuesto del balance físico, se observa en términos de costos y beneficios ambientales. En los primeros años, se advierte que la LC presenta mayores costos ambientales dados los mayores rendimientos, mientras que la SD, en virtud del aumento del rendimiento, termina generando costos superiores en todo el período (Gráfico 1).

GRÁFICO 1

Costo ambiental por el método del costo de reposición para SD y LC (en \$/ha)



Fuente: Elaboración propia.

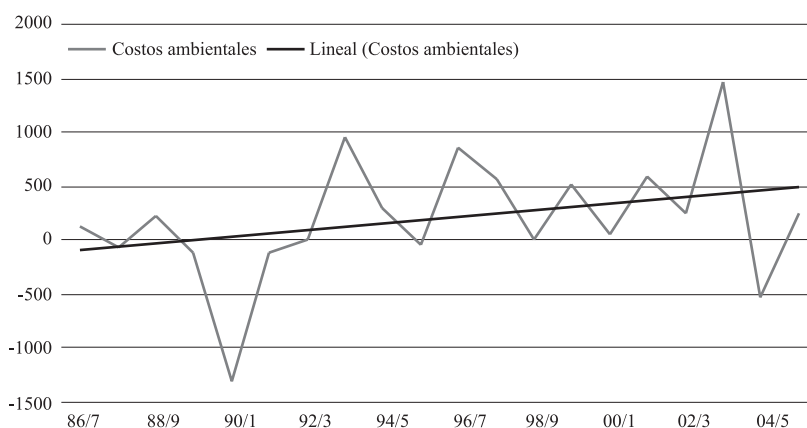
Los resultados arribados al aplicar este método estarían indicando que la SD tiene un desempeño menos favorable, debido a la exportación de nutrientes como consecuencia de los mayores rendimientos, que hace que, en promedio, los costos ambientales sean mayores en 25% respecto a LC. Ambas alternativas de laboreo presentan alta variabilidad, siendo levemente superior para LC. Al evaluar cada cultivo en particular, resulta interesante destacar la similitud en los costos ambientales promedio y la baja variabilidad que presenta el girasol en ambas prácticas de laboreo, asumiendo el mayor valor absoluto. Por otro lado, el trigo es el cultivo que incrementa de manera más significativa la inestabilidad de los costos ambientales bajo LC.

A pesar de estas apreciaciones, se considera necesario contemplar otros indicadores que permitan analizar la sustentabilidad del sistema, como la erosión del suelo, sus propiedades biológicas y físicas.

3.1.2. Método de la función de producción

El método permite hallar un valor para los costos ambientales a través de la diferencia incremental de los ingresos y costos que varían con el rendimiento obtenido bajo un sistema con SD frente a uno con LC (Gráfico 2).

GRÁFICO 2

Evolución comparada de costos ambientales según el método de valoración basado en la función de producción (en \$/ha)

Fuente: Elaboración propia.

En términos generales, se observa una disposición creciente de los costos ambientales de LC respecto a SD, interpretados en este método, por la menor productividad del primero respecto al segundo. No obstante, la serie de costos ambientales estimados presenta una alta variabilidad. En los primeros años de observación, no se presenta una tendencia clara. El fenómeno de mejora en la sustentabilidad del sistema se hace más evidente en la última década bajo análisis. En ella, de un total de 10 años, 9 presentan costos ambientales para LC, lo que implica que la SD tiene mejor desempeño, desde el punto de vista de la función de producción.

Respecto a los cultivos en los que hay una diferencia de rendimiento trascendente, no se puede afirmar nada decisivo. Aunque durante la última década, el costo ambiental de la LC se acentúa más en el cultivo de trigo.

Existe una importante variabilidad en los rendimientos que no está explicada sólo por la presencia de costos ambientales. Influyen también: el momento de la siembra, los cultivos antecesores, las pérdidas por erosión, los insumos empleados –que difieren en SD y LC–, las lluvias, siendo los rendimientos de LC más sensibles ante dicha variable, dado que la SD preserva más la humedad en el suelo. Por lo tanto, la relación entre precipitaciones y costos ambientales determinados por este método, es inversa.

3.2. Comparación de las contribuciones marginales de los cultivos en SD y LC

La comparación de las contribuciones marginales de los cultivos de la rotación en ambas alternativas de laboreo, se efectúa antes y después de contabilizar costos o beneficios ambientales. Para su cálculo, se han excluido del análisis las campañas 90/91 (girasol), 93/94 (cebada), 96/97 (maíz) y 98/99 (maíz). Las tres primeras debido a causas de manejo que no hacen comparables ambos sistemas. Y la última, correspondiente a maíz, en virtud de haberse pastoreado el cultivo, sin registrarse datos de las raciones consumidas.

En promedio, surge que el sistema de SD aporta una mayor contribución marginal por hectárea para cubrir los costos fijos de la finca bajo estudio, tanto cuando se contabilizan los costos ambientales, como cuando no (Cuadro 1). En correspondencia, el rendimiento promedio en SD es mayor que bajo LC (2,55 t ha⁻¹ versus 2,15 t ha⁻¹) para las campañas consideradas en este análisis.

CUADRO 1

Promedios históricos de CM por ha por sistema de laboreo

Promedios históricos generales	SD	LC
CM sin costos ambientales	\$ 731,31 ha ⁻¹	\$ 479,67 ha ⁻¹
Costos ambientales	\$ 452,29 ha ⁻¹	\$ 362,97 ha ⁻¹
CM con costos ambientales	\$ 279,03 ha ⁻¹	\$ 116,70 ha ⁻¹
% Participación costos ambientales	62%	76%

Fuente: Elaboración propia.

Como es esperable, los promedios de las contribuciones marginales que consideran los costos ambientales son inferiores a aquéllos que no los incluyen. No obstante, cabe destacar, que la participación de los costos ambientales sobre la contribución marginal promedio es mayor bajo LC que en SD.

Esto se refleja mejor al determinar la relación de reemplazo de LC por el sistema de SD:

$$RR_{SD} = \frac{CM_{SD} \text{ ha}^{-1}}{CM_{LC} \text{ ha}^{-1}} \quad [1]$$

Donde:

RR_{SD}: relación de reemplazo de LC por SD

CM_{SD}: contribución marginal por ha en SD

CM_{LC}: contribución marginal por ha bajo LC

Se advierte que, antes de costos ambientales, dicha relación representa 1,52. Es decir que para obtener la misma CM de 1 ha de SD, se requieren 1,52 ha de LC. Mientras que después del cómputo de costos ambientales, dicha relación asciende a 2,39, volviéndose más favorable para SD.

Por otra parte, se considera relevante complementar la evaluación de las alternativas de laboreo durante el período bajo estudio, mediante la aplicación de Análisis Marginal para empresas con producción múltiple sin condicionamiento técnico, ante limitaciones en la masa financiera. Según la Teoría de las Restricciones (Goldratt, 1995), el sistema de laboreo más conveniente será el que proporcione el mayor cociente en la relación contribución marginal sobre costos variables por hectárea. Se observa que antes y después de computar los costos ambientales, la SD en promedio presenta una mayor contribución por cada unidad monetaria invertida en costos variables (Cuadro 2). Esto se debe a que el ahorro en costos de labores resultó más significativo que el incremento en costos de agroquímicos (comprendiendo en este concepto fertilizantes, herbicidas, insecticidas y fungicidas) en relación a la LC. En términos cuantitativos, el ahorro en costos de labores (excluida la cosecha) para SD equivale en promedio a 57 l. de gasoil² ha⁻¹ año⁻¹, mientras que el costo adicional en concepto de agroquímicos representa 36 l. ha⁻¹ año⁻¹, arrojando un ahorro neto medio en unidades físicas de 21 l. de gasoil ha⁻¹ año⁻¹.

CUADRO 2

Promedios de CM por unidad monetaria invertida en costo variable (r) para SD y LC

Promedios históricos de r (CM/CV)	SD	LC
Sin costos ambientales	\$ 0,99	\$ 0,59
Con costos ambientales	\$ 0,36	\$ 0,12

Fuente: Elaboración propia.

Una comparación que resulta interesante efectuar se relaciona con la variabilidad de las contribuciones marginales por hectárea antes y después de computar los costos ambientales para ambos sistemas de laboreo. Cuando se comparan los coeficientes de variación de ambas prácticas de laboreo, se observa que el sistema de SD presenta una mayor estabilidad de la contribución marginal por hectárea, tanto sin costos ambientales como después de incluirlos (Cuadro 3). Asimismo, cabe recordar que se evidencia para el período de estudio una menor variabilidad de los rendimientos en SD (CV: 41%) que en LC (CV: 56%).

Sin embargo, cuando se consideran los costos ambientales, el coeficiente de variación aumenta más significativamente bajo LC que en SD, respecto al valor que asumía antes de incluirlos en el cálculo de la contribución marginal.

² Precio de gasoil YPF: \$ 2,25/l. Fuente: Revista CREA, marzo 2008.

CUADRO 3
Desvíos estándares y coeficiente de variación de las CM
por ha por sistema de laboreo

CM sin costos ambientales	SD	LC
Desvío estándar	\$ 626,89 ha ⁻¹	\$ 733,78 ha ⁻¹
CV %	86	153
CM con costos ambientales	SD	LC
Desvío estándar	\$ 438,30 ha ⁻¹	\$ 417,96 ha ⁻¹
CV %	157	358

Fuente: Elaboración propia.

Otro efecto que puede advertirse, analizando los desvíos estándares, es que la volatilidad de las contribuciones marginales para ambos sistemas de laboreo se reduce cuando se consideran los costos ambientales. Esto es un resultado esperable, si se contemplan las especificaciones del método de reposición para estimarlos, en cuanto a que, las extracciones de nutrientes aumentan con el incremento de los rendimientos, lo que provoca que los costos ambientales se comporten en este mismo sentido, cuando el balance de nutrientes es negativo.

Cabe efectuar la salvedad de que esto sucede en virtud del método elegido para reflejar los costos ambientales (costo de reposición). Sin embargo, dicho efecto no siempre se presentaría en caso de cuantificar, también otros fenómenos, como la erosión, que no tienen un patrón de comportamiento relacionado con el rendimiento, sino con la técnica de laboreo particular y otros factores.

Por otra parte, al cotejar las contribuciones de ambas prácticas de laboreo por unidad monetaria invertida en costos variables, surge también que su dispersión respecto a la media, es menor para SD tanto cuando se consideran costos ambientales como cuando no (Cuadro 4).

CUADRO 4
CV para las CM incorporando la restricción de la masa financiera (r) de SD y LC

CV % de r	SD	LC
Sin costos ambientales	83	158
Con costos ambientales	145	464

Fuente: Elaboración propia.

Lo hasta aquí expuesto se refleja en el número de campañas con contribuciones negativas después de incluir los costos ambientales: el sistema de SD presenta 4, mientras que bajo la práctica de LC, las campañas en las cuales los ingresos incrementales no alcanzan a cubrir la totalidad de los costos incrementales, ascienden a 9.

Finalmente, es conveniente aclarar que los costos ambientales determinados son parciales, ya que existen otros servicios ambientales que no se han considerado en este primer avance de la investigación. El método del costo de reposición capta el valor de los nutrientes extraídos pero no contempla las interacciones de las propiedades químicas evaluadas con las propiedades biológicas y físicas del suelo, dadas las dificultades agronómicas de su determinación.

3.3. Estimación de costos ambientales por efecto de la erosión

Un aspecto importante a abordar es el de las pérdidas de suelo por erosión. Para el caso bajo estudio, sobre la base de muestreos, teniendo en cuenta la profundidad del suelo y la densidad aparente, se calculó la masa de suelo ($t\ ha^{-1}$) del horizonte A en cada sistema de laboreo. Como la masa de suelo del horizonte originalmente debió ser idéntica, la diferencia entre los valores indicaría pérdidas de suelo, a consecuencia de los procesos erosivos. Se determinó que la LC produjo una pérdida adicional de suelo equivalente a $11,7\ t\ ha^{-1}\ año^{-1}$, que en términos de N y P, representó $33\ kg\ ha^{-1}\ año^{-1}$ y $9,38\ kg\ ha^{-1}\ año^{-1}$, respectivamente (Galantini *et al.*, 2007). Sólo cuantificando estos efectos por el método del costo de reposición, surge un mayor costo ambiental para LC de $\$ 391\ ha^{-1}\ año^{-1}$. En virtud de ser un análisis parcial, que no provee necesariamente un indicador del valor económico del suelo como recurso (Seroa da Motta, 1998), se plantea complementar el estudio con otras alternativas metodológicas de valoración en una siguiente etapa.

3.4. Ajuste al método de la función de producción

Dada la incidencia que tienen las precipitaciones en la productividad del sistema y su alta variabilidad en el sudoeste bonaerense, se propone realizar un análisis económico en el que se expliquen los rendimientos para cada sistema de laboreo en función de un índice de lluvias; los niveles de nitrógeno en el suelo; las heladas y el tipo de cultivo. El objetivo es valorar los costos ambientales para cada sistema de laboreo bajo el método de la función de producción “adaptado”, de modo de determinar un diferencial de rendimientos causado exclusivamente por el sistema de laboreo bajo distintos escenarios. El modelo propuesto para estimar el rendimiento (ecuación 2) y la descripción de las variables se presentan a continuación:

$$R_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Llc_t + \alpha_2 N_{it} + \alpha_3 H_t + \alpha_4 C(T_1)_{it} + \alpha_5 C(T_2)_{it} \quad [2]$$

R_{it} Rendimiento en qq ha⁻¹ en un momento de tiempo (t) para un lote (i) bajo un sistema de laboreo determinado.

LL_c Índice de lluvias para un momento de tiempo (t) que pondera las precipitaciones reales y requeridas por mes para cada tipo de cultivo. En él, se compara mensualmente, a través de un cociente, la necesidad de agua para cada tipo de cultivo, respecto a las precipitaciones reales. Luego se suman los cocientes de cada mes del cultivo ponderados por un factor de importancia (ecuación 3).

$$LL_c = \sum_{m=1}^n \frac{P_{m_real}}{P_{m_req}} \times I_m \quad [3]$$

Donde: P_{m_real} son los milímetros de precipitaciones reales para un período de tiempo mensual (m) en la zona bajo estudio. P_{m_req} son los milímetros de precipitaciones requeridos para cada tipo de cultivo en el mes (m). Para estimar este valor, se trabaja con el cálculo de la evapotranspiración de cada cultivo (ET_c) mediante el uso de coeficientes (K_c). Luego, con los datos de la finca bajo estudio respecto a la evapotranspiración potencial (ET_p), se calculan valores de ET_c para cada cultivo. I_m es el factor de ponderación para el mes (m) calculado como la necesidad teórica de agua de ese mes sobre la necesidad total de agua.

N_{it} Nivel de nitrógeno en kg ha⁻¹ en un momento de tiempo (t) para un lote (i) bajo un sistema de laboreo. El mismo es la sumatoria del nivel de nitrógeno medio del suelo para cada sistema de laboreo más el aporte de nitrógeno vía fertilizantes para cada lote y año en particular.

H_t *Heladas*, variable que representa temperaturas bajo cero durante el período crítico, considerado el mes de noviembre. Se prueban dos versiones de la variable H_t . Una cuantitativa medida como número de heladas en el mes de noviembre; y otra cualitativa dicotómica que toma valor 1 si se presentan heladas en dicho mes.

$C(T_1)_t$ Variable dicotómica que representa al cultivo tipo 1 para cada campaña (t). Toma valor igual a 1 si el cultivo es MAÍZ, ó 0 si el cultivo es cualquier otro.

$C(T_2)_t$ Variable dicotómica que representa a los cultivos tipo 2 para cada campaña (t). Toma valor igual a 1 si el cultivo es GIRASOL o SOJA, ó 0 si el cultivo es cualquier otro. De este modo, la situación base cuyo coeficiente es α_0 es para los cultivos de TRIGO o CEBADA.

Se utiliza una muestra de 442 observaciones de diferentes lotes y cultivos de la finca bajo estudio, correspondientes al período 1986-2008, además de las parcelas bajo LC y SD seleccionadas para el ensayo. La misma presenta datos de panel tipo desbalanceado. Metodológicamente, se realiza una regresión fusionada con mínimos cuadrados ordinarios para la sub-muestra correspondiente a datos de lotes con LC (83 observaciones, Cuadro 5) y otra para los de SD (359 observaciones, Cuadro 6). Es importante destacar que se emplean datos específicos del caso analizado y no se han extrapolado de otras regiones agroecológicas similares.

CUADRO 5

Estimaciones de la regresión con datos de LC

Variable	Coficiente	Error estándar	Significatividad individual y su nivel de confianza
Ll_c	16,7023	3,1647	Sí, al 99%
N	0,3024	0,0605	Sí, al 99%
H	-0,2020	2,5256	No
$C(T_1)$	13,3786	2,7927	Sí, al 99%
$C(T_2)$	9,2941	2,9245	Sí, al 99%
Constante	-11,4826	5,3353	Sí, al 95%

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 6

Estimación de la regresión con datos de SD

Variable	Coficiente	Error estándar	Significatividad individual y su nivel de confianza
Ll_c	15,7425	1,4541	Sí, al 99%
N	0,0634	0,0267	Sí, al 95%
H	-0,0638	0,9444	No
$C(T_1)$	16,9236	1,6195	Sí, al 99%
$C(T_2)$	-1,9729	1,2917	No
Constante	5,0335	2,2817	Sí, al 95%

Fuente: Elaboración propia.

La capacidad predictiva de ambos modelos se sitúa alrededor de 45-48% y se puede afirmar que las variables presentan significatividad conjunta en ambos casos, basándose en el resultado del Test de la F. Todas las variables presentan el signo esperado y resultan significativas individualmente a los niveles habituales de confianza, exceptuando las heladas en ambos casos y C(T2) en SD. Comparando las estimaciones de ambas regresiones puede deducirse que los rendimientos bajo la técnica de laboreo convencional son más sensibles a la variable de las precipitaciones ($\alpha_1 LC > \alpha_1 SD$) y al nivel de nitrógeno ($\alpha_2 LC > \alpha_2 SD$).

A partir de los resultados presentados pueden estimarse los diferenciales de rendimiento debidos al sistema de laboreo bajo distintos escenarios en los que se establecen distintos valores para el índice de lluvias y el nivel de nitrógeno para cada cultivo. Es decir, en los escenarios se establecen combinaciones entre el nivel máximo, medio y mínimo para el índice de lluvias (LL_c^+ , LL_c^{prom} y LL_c^- respectivamente) y el nivel máximo, medio y mínimo de nitrógeno (N^+ , N^{prom} y N^- respectivamente) para cada conjunto de cultivos. Estos diferenciales se cuantifican monetariamente en flujos anuales y valores a perpetuidad, en este último caso empleando una tasa de 5% anual según valores estimados para tasa de descuentos sociales para países de Latinoamérica (López, 2008). Los resultados se exponen en el Cuadro 7.

CUADRO 7
Rendimientos y valores diferenciales del sistema SD respecto a LC

Cultivos	Escenarios	Δ Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Δ Ingresos/Costos (\$ ha ⁻¹)	FFL (\$ ha ⁻¹)	Valor perpetuidad (\$ ha ⁻¹)
Trigo/ Cebada	$LL_c^+; N^+$	-1.354,47	-678,22	-440,85	-8.816,92
	$LL_c^-; N^+$	-1.216,60	-608,48	-395,51	-7.910,24
	$LL_c^{prom}; N^{prom}$	414,51	216,64	140,82	2.816,34
	$LL_c^+; N^-$	916,45	470,55	305,86	6.117,21
	$LL_c^-; N^-$	1.054,32	540,30	351,19	7.023,89
Maíz	$LL_c^+; N^+$	-874,91	-263,52	-171,29	-3.425,79
	$LL_c^-; N^+$	-810,56	-236,35	-153,63	-3.072,58
	$LL_c^{prom}; N^{prom}$	328,35	244,53	158,94	3.178,86
	$LL_c^+; N^-$	1.000,13	528,17	343,31	6.866,23
	$LL_c^-; N^-$	1.064,48	555,34	360,97	7.219,44
Girasol/ Soja	$LL_c^+; N^+$	-749,96	-794,41	-516,37	-10.327,34
	$LL_c^-; N^+$	-663,60	-693,75	-450,94	-9.018,72
	$LL_c^{prom}; N^{prom}$	862,44	1.085,17	705,36	14.107,15
	$LL_c^+; N^-$	990,26	1.234,17	802,21	16.044,16
	$LL_c^-; N^-$	1.076,61	1.334,83	867,64	17.352,78

Fuente: Elaboración propia.

Puede observarse que el sistema de SD se desempeña mejor que LC ante valores bajos de lluvias y nivel de nitrógeno. En promedio, también es el sistema de laboreo que presenta un mejor desempeño.

Este método permite capturar de manera indirecta los efectos que produce el sistema de laboreo sobre las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, complementando el resultado obtenido mediante el método del costo de reposición.

4. Conclusiones e implicancias

El presente trabajo, enmarcado dentro de un proyecto de investigación que se encuentra aún en desarrollo, ha tenido por propósito avanzar en el camino de medir y evaluar los impactos que la elección de las técnicas de laboreo (SD y LC) genera en el largo plazo sobre el capital natural, con un enfoque económico. Se pretende brindar un aporte que complemente los estudios agronómicos en el tema, particularmente los efectuados en el sudoeste bonaerense. En esta zona, dadas sus características agroecológicas, las limitantes para la sustentabilidad del recurso suelo deben ser necesariamente contempladas en el gerenciamiento socialmente responsable de la empresa rural. Por lo tanto, internalizar costos o beneficios ambientales en la ecuación económica puede ser útil para minimizar el riesgo de adoptar planteos técnicos que resulten menos apropiados en términos de sustentabilidad ambiental. De acuerdo al método del costo de reposición, se observó que bajo SD, el sistema logra mayor rendimiento, por lo que produce una mayor extracción. Esto hace que tenga un desempeño menos favorable que LC en relación a los costos necesarios para la reposición de nutrientes. No obstante, presenta una mayor estabilidad, que también se observa en los rendimientos obtenidos en SD, a diferencia de LC.

Respecto a los promedios históricos de las contribuciones marginales por hectárea y su variabilidad bajo distintas prácticas de laboreo, sobre los datos del Hogar Funke para las veinte campañas analizadas, puede concluirse lo siguiente:

- El sistema de SD presenta una mayor media de las contribuciones marginales, tanto sin como con costos ambientales, para todos los cultivos. La participación de dichos costos sobre la contribución promedio resulta más significativa bajo LC que en dicho sistema, aún cuando los costos ambientales son siempre mayores en SD.
- Respecto a la variabilidad relativa (considerando el coeficiente de variación), el sistema de SD arroja una mayor estabilidad de las contribuciones marginales antes y después de contabilizar los costos ambientales.
- El mismo comportamiento en promedios y variabilidades se observa cuando se tienen en cuenta las limitaciones en la masa financiera para afrontar el ciclo de gestión agrícola, al estimar las contribuciones por unidad monetaria invertida en costos variables.

- La SD evidencia en principio, una mayor capacidad económica para afrontar los costos ambientales por reposición de nutrientes que la LC, con menos variabilidad.
- Adicionalmente, si se computa en términos económicos por el método del costo de reposición, el impacto de la mayor erosión que arrojó experimentalmente LC respecto a SD, la contribución marginal promedio para el período bajo estudio resulta negativa, siendo positiva para SD.

Es necesario aclarar que estas observaciones se limitan a describir resultados promedios basados en datos del pasado y no a realizar predicciones respecto al futuro, para lo cual es necesaria una mayor cantidad de observaciones y la consideración de otras variables significativas.

Por otra parte, del análisis realizado siguiendo el método basado en los efectos sobre la función de producción, resultó una disposición creciente de los costos ambientales de LC respecto a SD. Sin embargo, la serie de costos ambientales estimados presenta una alta variabilidad. Se considera entonces que, aún cuando dicho método mide de un modo indirecto los costos ambientales y proporciona una prueba de su existencia, la magnitud económica no es reflejada fielmente, dado que influyen muchas otras variables en el rendimiento que logre el sistema. Frente a dicha limitación se avanzó en un ajuste del método, mediante un análisis econométrico que persigue aislar la incidencia de las precipitaciones y de otras variables que condicionan los rendimientos, para así determinar costos ambientales que comprendan otros efectos en las propiedades edáficas. De los resultados obtenidos surge un mejor desempeño del sistema de SD respecto a LC, especialmente en escenarios pesimistas de bajo nivel de nitrógeno y bajas precipitaciones, lo cual resulta significativo para la región del sudoeste bonaerense por su condición de marginal, donde predomina la variabilidad y la incertidumbre climática. No obstante, se propone en una segunda etapa de la investigación mejorar el análisis econométrico, incorporando variables como la materia orgánica, el cultivo antecesor y la capacidad de almacenamiento de agua según la profundidad del suelo.

Por lo tanto, los efectos de largo plazo de la SD y de la LC en la sustentabilidad ambiental constituyen una problemática compleja, que requiere un tratamiento interdisciplinario, el cual, a su vez, no se agota en la aplicación de un solo método de valoración de servicios ambientales.

Se observa que el método del costo de reposición y de la función de producción reflejan, en cierta medida, los efectos de largo plazo de los sistemas de laboreo sobre el capital natural. Sin embargo, no resultan suficientes para ponderar las ventajas de la SD sobre la LC, por lo que deben contemplarse otros indicadores que permitan analizar la sustentabilidad del sistema, tales como el riesgo de contaminación por agroquímicos, dada su intensidad de empleo en SD respecto a LC, sobre lo cual se continuará avanzando.

La presente investigación persigue brindar una contribución para hacer operativo el concepto de sustentabilidad en la administración socialmente responsable de la empresa rural, al perfeccionar su sistema de información como soporte del proceso decisorio. Se considera que también apoyaría la formulación de políticas públicas para el desarrollo sustentable del sector agropecuario, dado su relevante rol en la economía nacional, que contemplen particularmente las diferencias propias de regiones marginales subhúmedas y semiáridas.

Referencias

- Abad, C. (1996). *Métodos e instrumentos de valoración económica de bienes y servicios ambientales. El caso de España en sustentabilidad ambiental del modelo de crecimiento económico chileno, Programa de Desarrollo Sustentable*. Universidad de Chile, Santiago.
- Azqueta, D. (1994). *Valoración económica de la calidad ambiental*. McGraw-Hill, Madrid.
- Balesdent, J., Chenu, C. y Balabane, M. (2000). "Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage". *Soil and Tillage Research*, 53(3-4): 215-230. <http://doi.org/fgxm4w>
- Ciampitti, I. y García, F. (2007). "Requerimientos nutricionales. Absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios. I. Cereales, oleaginosos e industriales". *Revista Informaciones Agronómicas*, 37(16): 16-20.
- Doran, J.W. y Parkin, T.B. (1994). "Defining and assessing soil quality". En Doran, J.W. et al. (Eds.): *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*, Special Publication, 35. Soil Science Society of America, Wisconsin: 1-28.
- Flores, C.C. y Sarandón, S.J. (2002). "¿Racionalidad económica versus sustentabilidad ecológica? El ejemplo del costo oculto de la pérdida de fertilidad del suelo durante el proceso de Agriculturización en la Región Pampeana Argentina". *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*, 105(1): 52-67.
- Franzluebbers, A.J. (2002). "Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality". *Soil and Tillage Research*, 66(2): 95-106. <http://doi.org/fjcf7q>
- Galantini, J.A., Iglesias, J.O., Maneiro, C., Santiago, L. y Kleine, C. (2006). "Sistemas de labranza en el sudoeste bonaerense. Efectos de largo plazo sobre las fracciones orgánicas y el espacio poroso del suelo". *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 35(1): 15-30.
- Galantini, J.A., Iglesias, J.O., Maneiro, C. y Kleine, C. (2007). "Efectos de largo plazo sobre la materia orgánica del suelo". *Revista Técnica Especial en Siembra Directa*, octubre: 11-15.
- Goldratt, E. (1995). *La Meta*. Díaz de Santos, Madrid.

- Kleine, C. y Puricelli, A. (2001). "Comparación de los rendimientos y algunos parámetros químicos luego de varios años bajo LC y SD en el sudoeste de Buenos Aires". *Informaciones Agronómicas INPOFOS*, 12: 15-19.
- López, H. (2008). *The Social Discount Rate. Estimates for Nine Latin American Countries*. Policy Research Working Paper 4369. World Bank, Washington D.C.
- Moraes Sa, J.C. (2003). "Rastrojos: Alimento del suelo". Comunicación presentada al *X Congreso Nacional de AAPRESID*, Rosario: 135-138.
- Seroa da Motta, R. (1998). *Manual para a valoração econômica de recursos ambientais*. Coordenação de Estudos do Meio Ambiente do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (CEMA/IPEA) e da Coordenação Geral de Diversidade Biológica do Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal (COBIO/MMA), Brasília.
- WCED, World Commission on Environment and Development. (1987). *Our Common Future*. Oxford University Press, Oxford.