



Fotos: Donald Chalkling

VALIDACIÓN DE INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD DE SISTEMAS AGRÍCOLA-GANADEROS

Ing. Agr. Dr. Sebastián R. Mazzilli¹, Ing. Agr. MBA Donald Chalkling², Ing. Agr. Dr. Oswaldo Ernst³, Ing. Agr. Nicolás Cortazzo⁴, BQ Dr. Leonidas Carrasco-Letelier⁵

¹Departamento de Producción Vegetal, Facultad de Agronomía - Udelar / Técnico del proyecto por FUCREA

²Sociedad Rural de Río Negro, responsable del proyecto

³Departamento de Producción Vegetal, Facultad de Agronomía - Udelar

⁴Técnico contratado por el proyecto

⁵Programa de Investigación en Producción y Sustentabilidad Ambiental - INIA

El presente artículo sintetiza resultados del trabajo interinstitucional en la generación de una propuesta de indicadores para evaluar la dimensión ambiental de sistemas de producción agrícola – ganaderos. Los indicadores utilizados abarcan diferentes aspectos de la sostenibilidad de la gestión agronómica: el balance de nutrientes, el balance del carbono, el uso del agua y el uso de plaguicidas.

INTRODUCCIÓN

Las dimensiones alcanzadas por la actual población mundial, así como sus consecuencias en el cambio climático, permiten proyectar un incremento de la demanda mundial de alimentos, fibras, biocombustibles y, a la vez, el desafío de producir más en un área finita de suelo cultivable, bajo nuevas condiciones climáticas. Por lo cual, se necesitará intensificar la producción agropecuaria, no solo buscando producir más por unidad de área y con un impacto ambiental similar o inferior a lo tolerable para cada ecosistema. Aunque para las generaciones actuales lo antes descrito

parezca un escenario negativo, para otros no es así. En particular Uruguay, posee una vocación y aptitud agropecuaria desde sus orígenes. Durante el siglo XX el país desarrolló dos expansiones agrícolas, asociadas a los aumentos en la demanda mundial de alimentos. Previo a la primera expansión de la agricultura nacional con un foco productivista en 1930, los trabajos de Alberto Boerger y Antonio Götz señalaron la necesidad de rotar cultivos para prevenir la erosión de suelos. En la década de 1950, durante la segunda expansión del área agrícola (Figura 1), se desarrollaron los procesos erosivos más relevantes, cuyos impactos aún se pueden observar.

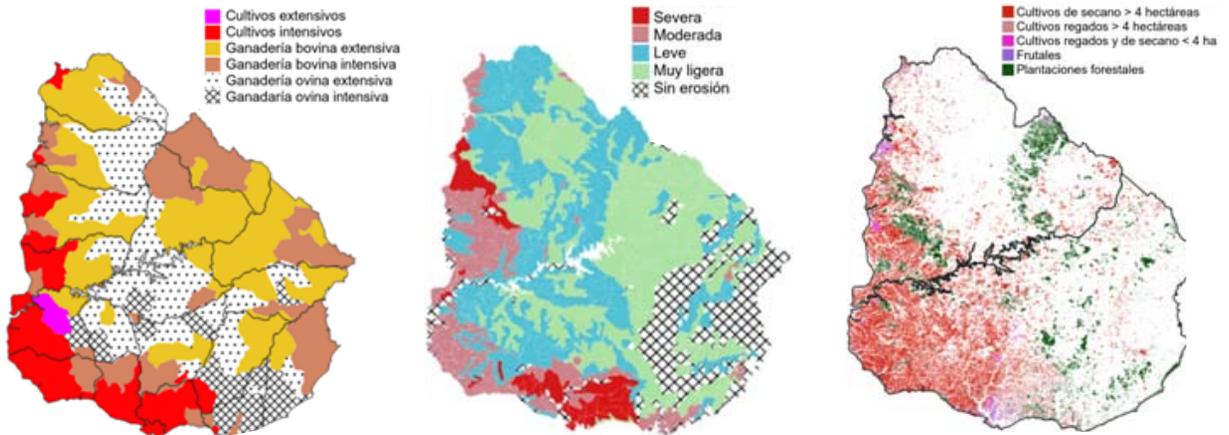


Figura 1 - (a) Regiones agrícolas en 1951; (b) calificación de la erosión laminar del suelo en 1976; (c) suelos bajo plantaciones en 2011.

En lo que va del siglo XXI, ocurrió el tercer proceso de expansión e intensificación de la agricultura (a partir del año 2001), impulsada por los precios de los granos (especialmente la soja) lo que determinó que se llegara a un máximo en la zafra 2014/15, de 1.334.000 ha agrícolas. Si bien esta expansión permitió mejorar los ingresos económicos, parte de este crecimiento se realizó de forma poco controlada. No obstante, en este período, el país logró aplicar una ley de suelos (Ley 15.239 de 1981) e implementar planes de uso y manejo de suelos (a partir del año 2013) para prevenir procesos erosivos. Estos planes de uso están basados en un modelo calibrado y validado para Uruguay (Clérico y García-Préchac, 2001).

Aun así, se carece de una herramienta consensuada para evaluar la sostenibilidad, que considere el impacto ambiental de todas las prácticas agronómicas y las interacciones con la ganadería. En este sentido, la ausencia de una herramienta se constata por diferentes trabajos locales que destacan: la pérdida de fertilidad de los suelos en los últimos años (Ernst *et al.*, 2016; Beretta-Blanco *et al.*, 2019); la determinación de fitosanitarios en productos agrícolas (Harriet *et al.*, 2017) y el aumento de las concentraciones de nutrientes en los cursos de agua (Carrasco-Letelier, *et al.*, 2014). Para responder a la ausencia de una propuesta de indicadores que permitiese evaluar de forma sencilla y rápida las dimensiones ambientales de un sistema de producción agronómico, FUCREA propuso el desarrollo de un conjunto de indicadores de sustentabilidad.

ANTECEDENTES DE LA METODOLOGÍA

La propuesta de FUCREA se llevó adelante mediante dos proyectos (FOMIN-BID - ATN/ME-13562-UR e INIA-FPTA 327) mediante los que desarrolló un sistema de indicadores cuyos resultados están resumidos en la Serie FPTA N° 65.

Los indicadores propuestos se aplicaron en predios pilotos para evaluar sus trayectorias ambientales. Estos indicadores abarcan diferentes aspectos de la sostenibilidad de la gestión agronómica: (1) el balance de nutrientes, (2) el balance del carbono, (3) el uso del agua y (4) el uso de plaguicidas (Cuadro 1). Varios de los indicadores fueron calibrados para suelos con un contenido de arcilla del horizonte A entre 7,5 y 51%, lo que implica una gran área del país (Figura 2).

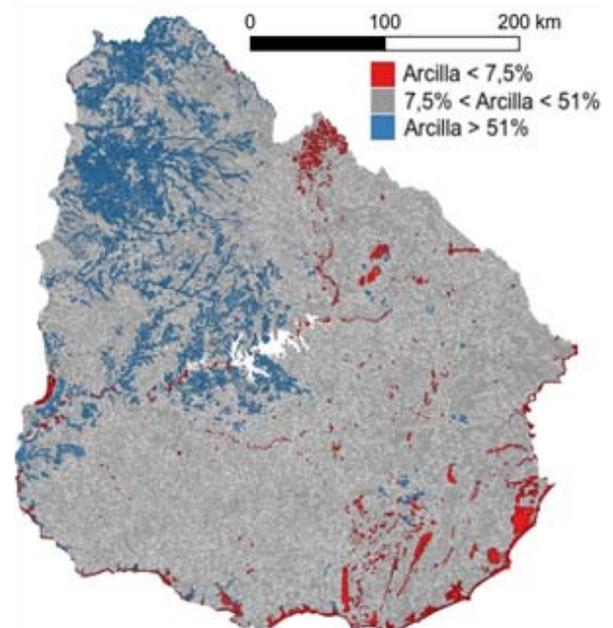


Figura 2 - Contenido de arcilla en el Horizonte A de los suelos de Uruguay.

Cuadro 1 - Grupo de indicadores para la evaluación multidimensional de la sostenibilidad agropecuaria.

Indicador	Descripción	Información necesaria
1. Productividad	Biomasa total producida y corregida por el contenido energético de la secuencia de cultivos.	Secuencia de cultivos, rendimiento en grano de cada cultivo, índice de cosecha, contenido energético de la biomasa.
2. Masa de residuos	Biomasa aérea y subterránea que deja cada cultivo de la secuencia.	Rendimiento en grano e índice de cosecha de cada cultivo granífero.
3. Uso de agua	Evapotranspiración por cultivo. Usa una referencia en relación a la precipitación anual.	Productividad primaria del cultivo y promedio de eficiencia de uso de agua (g biomasa / kg agua transpirada).
4. Carbono orgánico del suelo	Carbono orgánico en el suelo en los 10 cm del horizonte A en relación a la referencia (80% de saturación).	Carbono orgánico del suelo medido a nivel de campo. Indicador usa el concepto de saturación de carbono de Hassink y Withmore (1997) y una interpretación de datos de Uruguay.
5. Entradas de carbono al suelo	Entradas de carbono orgánico basado en la entrada de residuos.	Indicador basado en literatura y juicio experto; definimos umbrales de ganancia, mantenimiento y pérdida de carbono orgánico.
6. Densidad aparente	La relación entre un valor de referencia que depende de la clase textural y la densidad aparente del lote bajo consideración.	Textura del suelo. Este indicador usa la función de transferencia de Saxton y Rawls (2006) para calcular la densidad aparente de referencia.
7. Balance de nitrógeno	Razón entre el nitrógeno cosechado y sus entradas vía fertilizante y fijación biológica.	Tasa de fertilización y fijación de nitrógeno, nitrógeno en productos cosechados y removidos del lote.
8. Balance de fósforo	Relación entre el fósforo cosechado y las entradas de fósforo del fertilizante.	Tasa de fertilización y remoción del nutriente en la cosecha.
9. Balance de potasio	Relación entre el potasio cosechado y las entradas de potasio del fertilizante.	
10. Balance de azufre	Relación entre el azufre cosechado y las entradas de azufre del fertilizante.	
11. Unidades toxicológicas para mamíferos	Estimación de la carga anual de plaguicidas, expresados en unidades de toxicidad para mamíferos.	Plaguicidas usados, información toxicológica para mamíferos y tasa de aplicación.
12. Unidades toxicológicas para polinizadores	Estimación de la carga anual de plaguicidas, expresados en unidades de toxicidad para mamíferos.	Plaguicidas usados, información toxicológica para abejas y tasa de aplicación.

Sin embargo, los indicadores propuestos, basados en el mejor conocimiento disponible, requerían una validación para determinar el grado de proximidad entre los cambios estimados por los indicadores y el cambio de las variables correspondientes en el campo. Para lograr este objetivo se desarrolló un tercer proyecto financiado por el fondo ANII Alianzas para la Innovación, titulado “Calibración y validación de un conjunto de indicadores de sustentabilidad en sistemas agrícola-ganaderos en el litoral oeste del Uruguay” iniciativa propuesta por CREA, Facultad de Agronomía (Udelar), Sociedad Rural de Río Negro e INIA.

Para evaluar las trayectorias ambientales se aplicó un conjunto de indicadores de sustentabilidad en predios piloto.

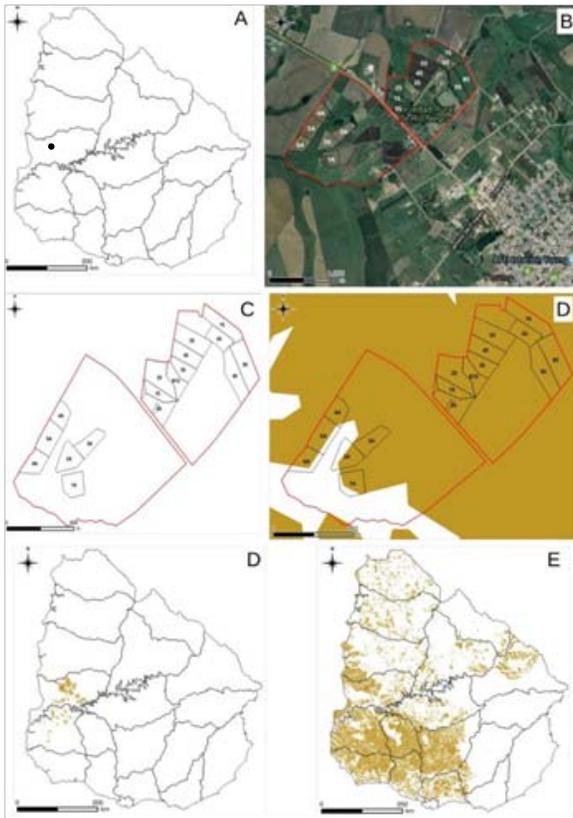


Figura 3 - (a) Ubicación del predio; (b) relación del predio con la ciudad de Young; (c) predio y parcelas experimentales; (d) relación de las parcelas con el suelo dominante (Brunosol éútrico típico LAC, suelo modal USDA16); (e) distribución del Brunosol éútrico típico Lac en Uruguay y (f) Brunosoles éútricos de Uruguay.

El proyecto sistematizó una base de datos de 20 años de registros de las actividades y rendimientos de los predios de la Unidad Experimental de Young (UEDY) obtenidas en base al convenio INIA-SRRN (Sociedad Rural de Río Negro) (Figura 3).

De esta manera el proyecto Alianzas permitió comparar la trayectoria ambiental que mostraban los indicadores en relación con medidas realizadas a campo y valorar las diferencias entre los comportamientos estimados por los modelos y evaluaciones recientes de los suelos.

RESULTADOS PRINCIPALES

Durante los 20 años evaluados (1998-2018), las unidades de manejo mostraron distintas intensidades de uso del suelo (entre un 37 y un 81% del tiempo bajo agricultura), lo que determinó diferentes impactos potenciales en cada uso del suelo. Al comparar las fases agrícolas con las fases de pasturas, estas últimas presentaron un menor número de aplicaciones de fitosanitarios y fertilizantes. Lo que provocó que, al incrementarse el tiempo de los suelos bajo pasturas, se generaran cambios positivos en los indicadores evaluados.

Por otra parte, la productividad del sistema agrícola fue menor (Figura 4) que los valores medios de sistemas de la región. Esto afectó el desempeño de los indicadores vinculados a la productividad del

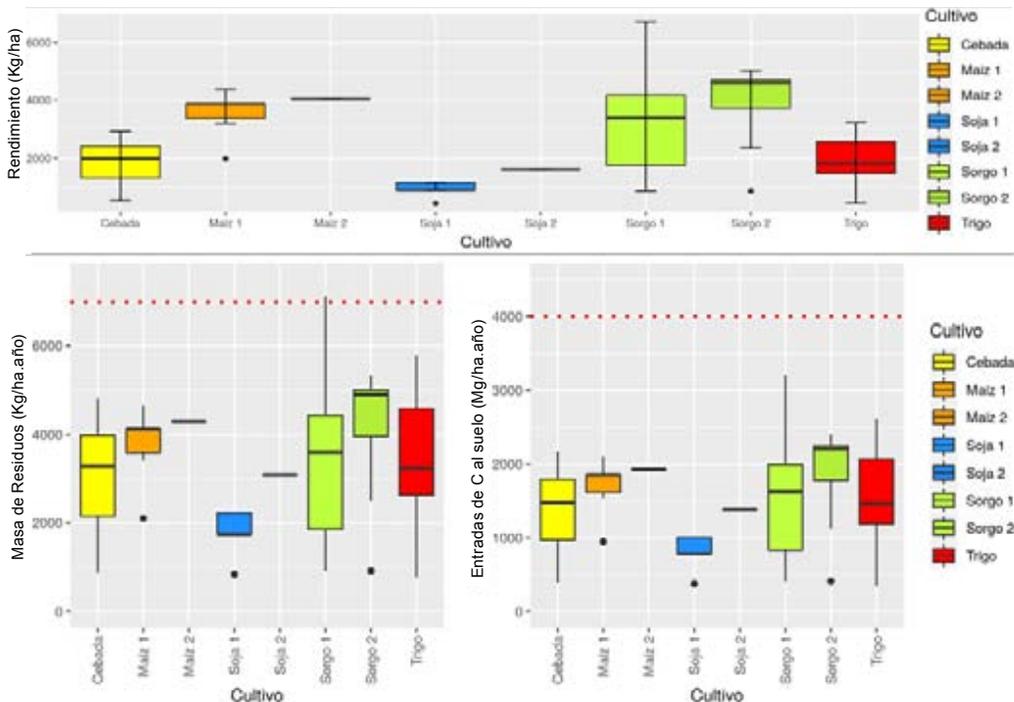


Figura 4 - (a) Rendimiento (0% humedad) de los cultivos agrícolas presentes (arriba); (b) indicador “Masa de residuos” por cultivo y su valor de referencia; (c) indicador “Entrada de carbono” por cultivo y su valor de referencia.

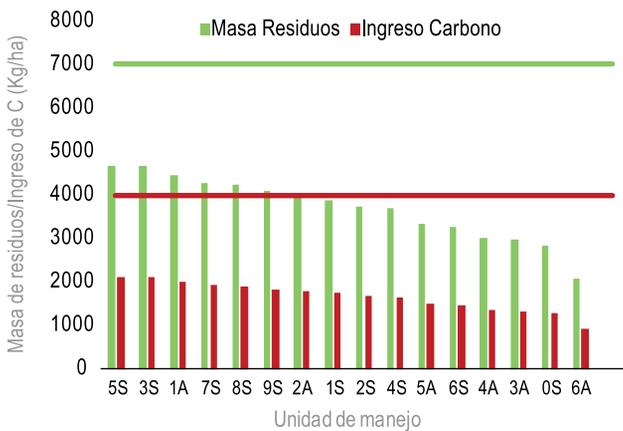


Figura 5 - Masa de residuos en Ingreso de Carbono medio según unidad de manejo para el período agrícola de cada unidad de manejo y sus respectivos valores de referencia.

sistema, presentando valores inferiores a los valores de referencia (Indicadores 1 al 6) (Figura 5).

Todos los indicadores asociados a la productividad del sistema, que fue posible evaluar a campo (Indicadores 4, 5 y 6), mostraron una tendencia similar a los datos analizados. Es decir, lograron reflejar lo ocurrido en el campo sin mayores inconvenientes (ej: Figura 6a). Para el sistema evaluado, el efecto años de pasturas fue relevante, dada la importancia de estas en el sistema, a diferencia de los sistemas evaluados en el proyecto donde se generaron (ej: Figura 6b).

La misma tendencia entre los valores de campo y los indicadores fue encontrada para los indicadores de unidades toxicológicas (Figura 7). Los resultados de la figura 7 muestran la evolución en el impacto potencial ecotoxicológico incremental asociado a los cultivos de verano, tanto para las unidades toxicológicas acumuladas (UT) calculadas para abejas como para mamíferos. Sin embargo, al evaluar esta exposición de los predios a los fitosanitarios mediante un bioensayo de los suelos, usando el sistema Microtox, solo se encontró una relación positiva con los valores de UT para mamíferos (Figura 7d).

Al incrementar el tiempo de los suelos bajo pasturas se generaron cambios positivos en los indicadores ambientales evaluados.

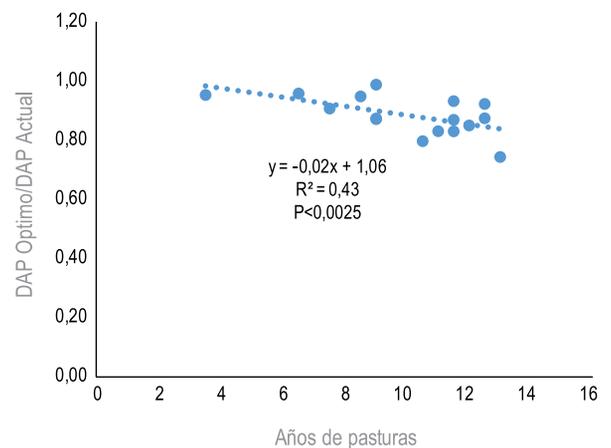
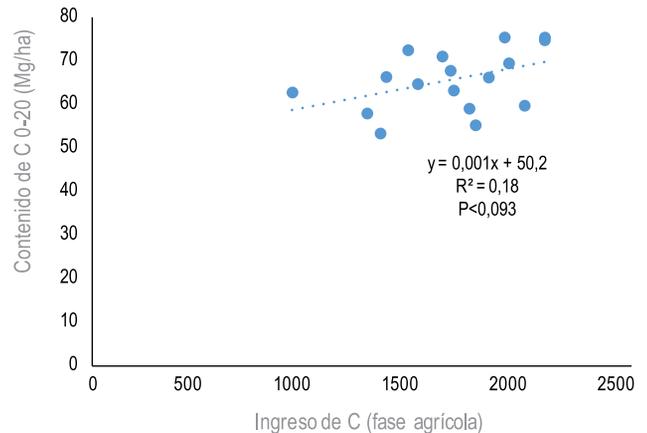


Figura 6 - (a) Relación entre el indicador ingreso de C en la fase agrícola y el contenido de C en suelo; (b) Relación entre años de pasturas y la relación entre la densidad aparente óptima y la medida a campo.

Esta relación entre el impacto esperado y las posibilidades de medida –mediante bioensayos– es un aspecto por mejorar, tanto por las limitaciones analíticas, dada la inexistencia de laboratorios que realicen bioensayos de toxicidad con muestras de suelo y la carencia de bioensayos desarrollados con organismos representativos de la fauna edáfica nacional. Estos aspectos limitaron el avance en la validación de este indicador.

Los indicadores que no lograron asociaciones fuertes entre las predicciones de los indicadores y las evaluaciones a campo, fueron los asociados a la dinámica de nutrientes en suelo (datos no mostrados), lo cual está siendo analizado, pero entre las posibles hipótesis de trabajo por este comportamiento está el tamaño de las unidades y el potencial traslado de nutrientes durante la fase pastoril por efecto del pastoreo.

Como resumen en el Cuadro 2 se muestra cualitativamente el ajuste que existió para cada uno de los indicadores entre la trayectoria esperada y su evaluación a campo.

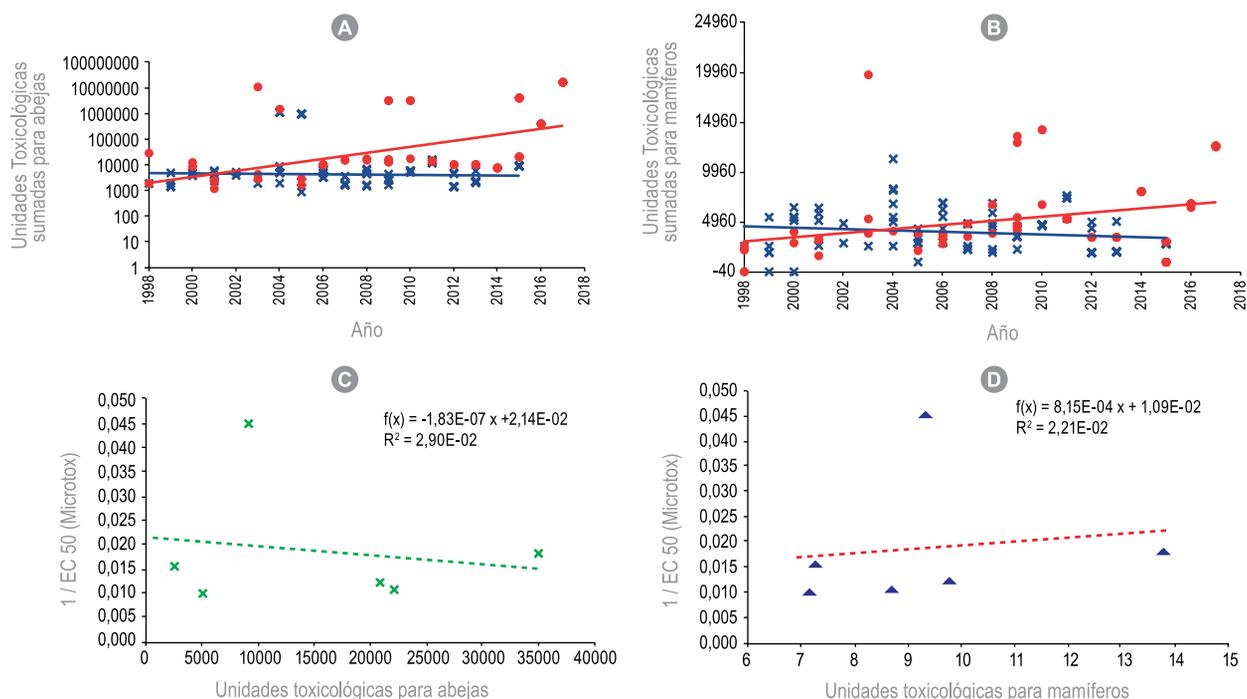


Figura 7 - Impacto potencial de los fitosanitarios expresados en Unidades Toxicológicas acumuladas (UT): a) evolución de las UT para abejas en el período 1998-2018 vinculado a cultivos de invierno (azul) y de verano (rojo); b) a) evolución de las UT para mamíferos en el período 1998-2018 vinculado a cultivos de invierno (azul) y de verano (rojo); c) relación entre las UT de abejas y la toxicidad (EC50) evaluada en suelo con Microtox y d) relación entre las UT de mamíferos y la toxicidad (EC50) evaluada en suelo con Microtox.

Cuadro 2 - Ajuste realizado para cada uno de los indicadores entre la trayectoria esperada y su evaluación a campo.

Indicador	Resumen
1. Productividad	No se evalúa a campo. Se usa para comparar sistemas de producción.
2. Masa de residuos	No se evaluaron directamente a campo.
3. Uso de agua	
4. Carbono orgánico del suelo	
5. Entradas de carbono al suelo	Relación estadísticamente significativa entre el indicador ingresos medio de C durante la fase agrícola y los niveles de C en el campo. Mayor valor del indicador Ingreso de C y/o una fase de pastura más larga determinaron valores de C más cercanos a la saturación.
6. Densidad aparente	Mayor valor del indicador Ingreso de C y/o una fase de pastura más larga determinaron valores densidad aparente más cercanos al óptimo según textura.
5. Balance de nitrógeno	No fue posible encontrar asociaciones entre la trayectoria del indicador y los valores encontrados a campo.
6. Balance de fósforo	
7. Balance de potasio	
8. Balance de azufre	No se evaluó directamente a campo.
9. Unidades toxicológicas para mamíferos	Tendencias de predicción razonables, pero deben ser mejoradas.
10. Unidades toxicológicas para polinizadores	Tendencias de predicción razonables, pero deben ser mejoradas.

La medición del impacto de los fitosanitarios en los suelos se vio limitada por la falta de laboratorios especializados y por la carencia de antecedentes que utilicen organismos representativos de la fauna edáfica nacional.

CONSIDERACIONES FINALES

- Los indicadores utilizados fueron diseñados y evaluados originalmente en sistemas de producción agrícolas que no incorporaban una fase pastoril, no obstante, fueron útiles para separar distintas unidades de manejo con historias agrícolas contrastantes.
- La agricultura, en el sistema evaluado, presentó rendimientos medios a bajos y, por tanto, maximizó el efecto de la pastura en todo lo referido a dinámica y acumulación de C en el suelo.
- Muchas unidades tuvieron períodos de pasturas superiores a lo esperado en sistemas comerciales. Por este motivo, el efecto de los años de pasturas separó los valores en los indicadores.

- El único grupo de indicadores en los que no fue posible encontrar una asociación entre el valor del indicador y las evaluaciones de campo fue para los asociados a la dinámica de nutrientes.

- Los indicadores para evaluar el uso de fitosanitarios muestran una leve asociación con los resultados del bioensayo, por lo que puede servir como indicador pre-dial y/o de unidades de manejo.

REFERENCIAS

Beretta-Blanco, A., Pérez, O., Carrasco-Letelier, L., 2019. Soil quality decrease over 13 years of agricultural production. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 114, 45–55.

Carrasco-Letelier, L., Beretta Blanco, A., Eguren, G., 2014. Primer mapa nacional de la calidad del agua de Uruguay. *Revista INIA* 39, 67–70.

Clérici, C., & García-Préchac, F. 2001. Aplicaciones del modelo USLE/RUSLE para estimar pérdidas de suelo por erosión en Uruguay y la región sur de la cuenca del Río de la Plata. *Agrociencia*, 5 (1), 92–103.

Ernst, O. R., Kemanian, A. R., Mazzilli, S. R., Cadenazzi, M., & Dogliotti, S. 2016. Depressed attainable wheat yields under continuous annual no-till agriculture suggest declining soil productivity. *Field Crops Research*, 186, 107-116.

Hassink, J., & Whitmore, A. P. (1997). A model of the physical protection of organic matter in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), 131–139.

Harriet, J., Campá, J.P., Grajales, M., Lhéritier, C., Gómez Pajuelo, A., Mendoza-Spina, Y., Carrasco-Letelier, L., 2017. Agricultural pesticides and veterinary substances in Uruguayan beeswax. *Chemosphere* 177, 77–83.



Foto: Donald Chalkling

Figura 8 - Medidor de pasturas en el predio de la Sociedad.