



Foto: Federico Gallego

EL DESEMPEÑO AMBIENTAL RURAL DE URUGUAY: una evaluación a partir de indicadores sinópticos

Ing. Agr. PhD. José Paruelo^{1,2,3}, Lic. Dr. Pablo Baldassini^{1,2}, Lic. MSc. Gonzalo Camba Sans², Lic. MSc. Federico Gallego³, Lic. Luciana Staiano², Lic. Hernán Diéguez², Lic. Dr. Santiago Baeza⁴

¹Área Recursos Naturales, Producción y Ambiente - INIA

²IFEVA - Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires y CONICET, Argentina

³IECA - Facultad de Ciencias, Udelar

⁴Departamento de Sistemas Ambientales - Facultad de Agronomía, Udelar

En el marco de una iniciativa impulsada en el año 2021 por el Ministerio de Ambiente (MA) y el de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP) se trabajó entre el sector político y académico en la definición de una serie de indicadores de la “Huella Ambiental” de la ganadería. Entre ellos, se definieron cinco indicadores sinópticos de sostenibilidad ambiental basados en datos provistos por sensores remotos. En este trabajo se muestra la variación de su desempeño a nivel de sección policial.

LA IMPORTANCIA DE MEDIR LA SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL

Una cantidad de factores (normativos, legales, éticos, económicos, culturales) han determinado que el desempeño ambiental de la producción agropecuaria pase a ser un aspecto central de la planificación y gestión de los predios agropecuarios. Las demandas por mejorar y documentar el desempeño ambiental provienen tanto de los productores como de los

consumidores, así como también desde el Estado nacional, los gobiernos departamentales y, también, de los compromisos internacionales asumidos por Uruguay o las señales de los mercados internos y externos. El desempeño ambiental se vincula directamente con la sostenibilidad de las actividades rurales. La sostenibilidad se refiere a una meta, que es variable según el contexto y los valores de las partes interesadas. Considerar en términos absolutos si una práctica o sistema es o no sostenible no es factible.

Es prácticamente imposible definir *a priori* si el sistema a gestionar podrá satisfacer las necesidades (desconocidas, por otra parte) de las generaciones futuras. Una forma de hacer operativa la idea de sostenibilidad es discutirla en términos comparativos o relativos, es decir, qué sistema es más sostenible según una serie de aspectos predefinidos.

Estos aspectos incluyen, por ejemplo, promover la diversidad específica aérea y subterránea; reducir las aplicaciones de productos sintéticos; mantener o restaurar áreas naturales o semi-naturales; proteger y usar eficientemente los recursos naturales y mantener y/o aumentar la oferta de servicios ecosistémicos (SE); promover procesos y sistemas naturales; reciclar y reutilizar; promover la diversidad de hábitats; integrar prácticas a nivel del paisaje; asumir la perspectiva de una sola salud (ambiental, humana, vegetal, animal, del suelo, etc.); cuidar la inocuidad de los alimentos y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

Para evaluar en qué medida un conjunto de prácticas modifican estos aspectos se recurre a indicadores. Genéricamente, un indicador es un signo, medible u observable, que refleja una

característica cuantitativa o cualitativa del sistema estudiado. Provee información clave para conocer algo y, frecuentemente, tomar una decisión. El indicador es un elemento de diagnóstico y no un fin en sí mismo. En el caso del desempeño ambiental, la característica a reflejar es un proceso o aspecto estructural del agroecosistema relacionado con su capacidad de proveer uno o más servicios.

INDICADORES PARA CARACTERIZAR LA “HUELLA AMBIENTAL” DE LA GANADERÍA

En el marco de una iniciativa impulsada en el año 2021 por el Ministerio de Ambiente (MA) y el de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP), con la participación de INIA, INALE e INAC, se trabajó entre el sector político y académico en la definición de una serie de indicadores de la “Huella Ambiental” de la ganadería (<https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/politicas-y-gestion/huella-ambiental>). En ese marco se incorporaron, entre otros, cinco indicadores sinópticos desarrollados por investigadores e investigadores de las Facultades de Agronomía y Ciencias de la Udelar, de la Facultad de Agronomía de la UBA y de INIA. Estos indicadores derivan de datos provistos por sensores remotos y del uso de modelos biofísicos

e incluyen: a) la Proporción de Hábitats Naturales (HabNat), b) la diversidad de tipos funcionales de Ecosistemas (dTFE), c) el Índice de Oferta de Servicios Ecosistémicos (IOSE), y d) su tendencia en el tiempo (tIOSE), y e) el complemento de la Apropiación Humana de la Productividad Primaria Neta (1-AHPPN) (Figura 1).

El Cuadro 1 resume los indicadores usados, las referencias bibliográficas en las que se describe su desarrollo, la información que aportan y cómo se calculan. El carácter sinóptico de estos indicadores deriva de que proveen una mirada completa del territorio que sintetiza aspectos complementarios de la sostenibilidad de distintos tipos de sistemas.

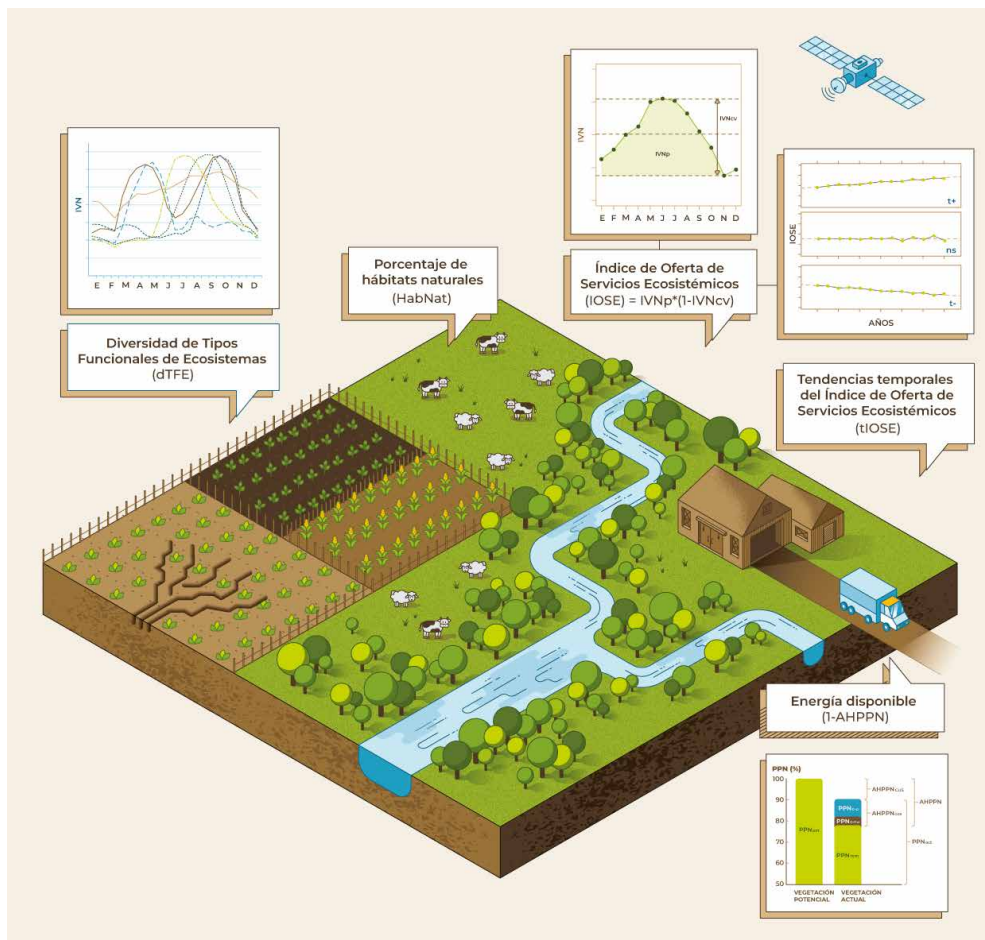


Figura 1 - Esquema de los distintos aspectos evaluados por los indicadores.

Cuadro 1 - Indicadores sinópticos calculados en base a datos provistos por sensores remotos. Se indica la información que brinda, cómo se calcula y referencias bibliográficas que describen su desarrollo.

Indicador	¿Qué información brinda?	¿Cómo se calcula?	Referencias
Porcentaje de hábitats naturales (HabNat)	Considera la superficie cubierta por pastizales naturales, humedales y bosques nativos.	Se calculó a partir de la proporción de la superficie ocupada por pastizales naturales, humedales y bosque nativo en cada sección policial. La superficie de cada cobertura del suelo se obtuvo de la cartografía de usos y coberturas del suelo desarrollada por Mapbiomas Pampa para el año 2020.	Vallejos <i>et al.</i> (2020) Baeza <i>et al.</i> (2022)
Energía disponible (1-AHPPN)	Este indicador informa la intensidad del uso del suelo. El complemento de la AHPPN cuantifica la energía disponible para los otros niveles tróficos del ecosistema que, a su vez, son responsables de regular el suministro de Servicios Ecosistémicos.	La energía disponible en el sistema se calculó como el complemento de la apropiación humana de la producción primaria neta (1-AHPPN), la cual resulta de la diferencia entre la producción primaria neta (PPN) en ausencia de influencia humana (PPN de la vegetación potencial: PPN_0) y la PPN de la vegetación que queda después de la cosecha (PPN_{REM}). La PPN_{REM} es la diferencia entre la PPN de la vegetación PPN_0 y la PPN cosechada (PPN_{COS}). PPN_{COS} es apropiado directamente por los humanos como productos agrícolas (grano, madera, carne, etc.) o destruido durante la cosecha. Se obtuvo la AHPPN total mediante la combinación de la AHPPN ganadera, AHPPN forestal y AHPPN agrícola considerando la proporción de estos usos del suelo identificados mediante la combinación de diferentes productos cartográficos de uso y cobertura del suelo.	Haberl <i>et al.</i> (2007) Baeza y Paruelo (2018) Baeza y Paruelo (2020) Baeza <i>et al.</i> (2022)
Índice de Oferta de Servicios Ecosistémicos (IOSE)	Este índice se asocia de forma positiva con la diversidad específica y, a su vez, informa sobre la oferta de servicios ecosistémicos de regulación y soporte asociados con la dinámica del carbono y el agua.	El IOSE combina dos atributos del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI, por sus siglas en inglés), su media anual (NDVI _p) y su coeficiente de variación estacional (NDVI _{cv}). El promedio anual del NDVI es un estimador de las ganancias de carbono totales, mientras que el coeficiente de variación del NDVI indica la estabilidad temporal o estacionalidad de esas ganancias. El IOSE se calculó a partir de información del NDVI derivado de imágenes MODIS, que poseen una resolución espacial de 250 metros y una resolución temporal de 16 días. El índice se calculó de la siguiente manera: $IOSE = NDVI_p * (1 - NDVI_{cv})$. Valores altos de IOSE están asociados a coberturas con productividad alta y estable en el tiempo, mientras valores bajos corresponden a coberturas con menor productividad y/o más variable en el tiempo.	Paruelo <i>et al.</i> (2016) Staiano <i>et al.</i> (2021) Baldassini <i>et al.</i> (2023)
Tendencias temporales del Índice de Oferta de Servicios Ecosistémicos (tIOSE)	Indica la tendencia temporal de la oferta de servicios ecosistémicos a nivel de píxel MODIS en el período 2000-2021, identificando tendencias estadísticamente significativas positivas y negativas, y tendencias no significativas o neutras.	Se calculó la proporción de píxeles con tendencias positivas estadísticamente significativas y neutras (sin tendencia) a nivel de sección policial.	Paruelo <i>et al.</i> (2016) Staiano <i>et al.</i> (2021)
Diversidad de Tipos Funcionales de Ecosistemas (dTFE)	Es una medida de la multifuncionalidad del componente antrópico de los paisajes agropecuarios. Indica la heterogeneidad funcional de los usos que no corresponden a hábitats naturales en términos de la dinámica estacional de las ganancias de carbono. Una mayor heterogeneidad se asocia con una mayor oferta de hábitats y recursos, por lo que un componente antrópico más diverso presentaría mayor resiliencia.	Los TFE resultan de la combinación de tres atributos de la dinámica anual de un índice espectral de vegetación: la media anual, el coeficiente de variación intra-anual y el momento del año donde se observa el valor máximo. Se utilizó el Índice de Vegetación Mejorado (EVI, por sus siglas en inglés) derivado de imágenes MODIS del producto MOD13Q1, el cual presenta una resolución espacial de 250 m y una resolución temporal de 16 días. Se generaron cuatro niveles para cada uno de los tres atributos calculados, que luego se combinaron para generar un mapa de TFE. La diversidad de TFE se calculó a través del índice de Shannon (H'), que considera simultáneamente la riqueza de TFE y la proporción relativa (π_i) de cada uno de ellos, indicando los valores más altos una mayor diversidad. Se calculó como: $H' = -\sum \pi_i * \log_2 \pi_i$	Paruelo <i>et al.</i> (2001) Alcaraz-Segura <i>et al.</i> (2013)

Estos indicadores aportan información sobre procesos o aspectos estructurales de los agroecosistemas, relacionados con su capacidad de proveer uno o más servicios que inciden sobre el ambiente.

La información de cada uno de estos indicadores es generada a nivel de píxel. Dependiendo de la fuente de datos satelitales la resolución de base variará entre 10 x 10 m (Sentinel), 30 x 30 m (Landsat) o 250 x 250 m (Modis). La información puede agregarse en distintas unidades administrativas (departamentos, secciones policiales, padrones) o biofísicas (cuencas de distinto orden, unidades geomorfológicas o de suelos). En este trabajo, la información fue agregada a nivel de sección policial, tal como se hizo en el primer informe de la Huella Ambiental de la Ganadería.

PATRONES ESPACIALES DE LOS INDICADORES

Los mapas presentados en la Figura 2 muestran los patrones regionales de los indicadores sinópticos representados a nivel de secciones policiales. Los valores de cada indicador fueron re-escalados entre 0 y 1 para maximizar las diferencias espaciales. De esta manera los valores mínimos observados corresponden a 0 y los máximos a 1. Los patrones espaciales muestran algunas similitudes, pero también importantes diferencias.

Por ejemplo, las secciones policiales del oeste de los departamentos de Artigas, Salto y Paysandú, correspondientes a la Cuesta Basáltica, presentaron valores intermedios a altos para cuatro de los cinco indicadores (IOSE, HabNat, tIOSE y 1-AHPPN). Por otro lado, las secciones policiales del Departamento de Artigas muestran valores altos de Energía Disponible para la trama trófica (1-AHPPN), pero una marcada variabilidad en la oferta de Servicios Ecosistémicos (IOSE) o de la diversidad de Tipos Funcionales de Ecosistemas (dTFE).

Obsérvese, a su vez, que los valores de los mínimos (color menos intenso) de los distintos indicadores se ubican en distintas secciones policiales.

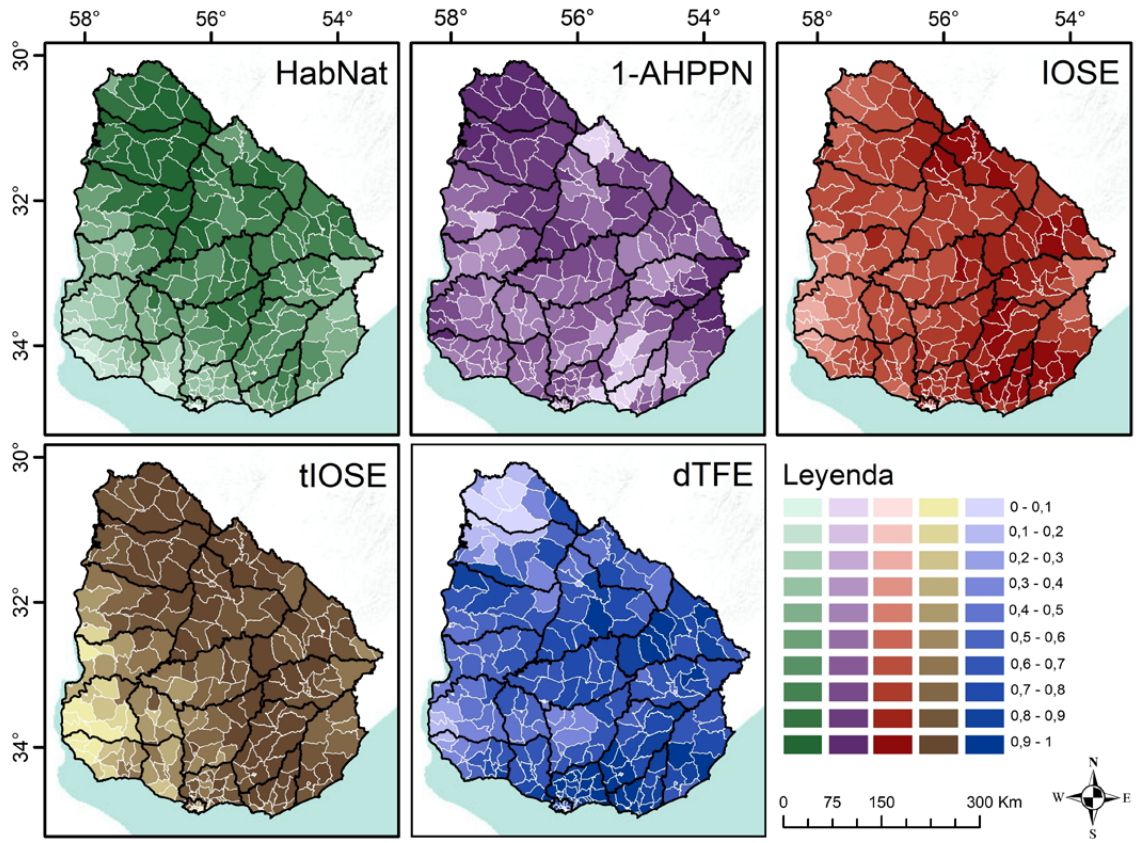


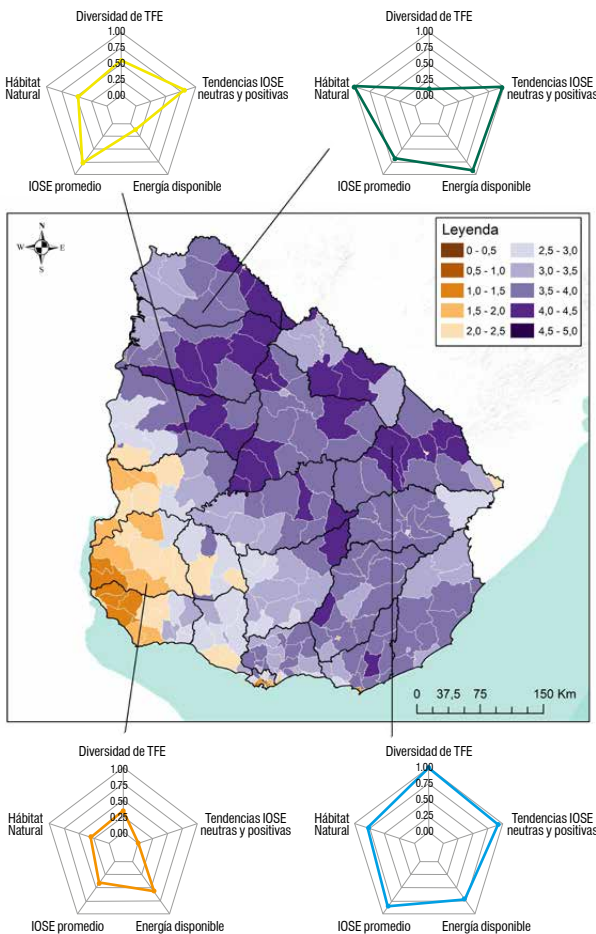
Figura 2 - Patrones regionales de los indicadores sinópticos a nivel de secciones policiales. Las líneas negras indican los departamentos mientras que las líneas blancas indican las subdivisiones entre secciones policiales.

Cuadro 2 - Índice de correlación de Pearson que muestra la correlación conjunta entre pares de indicadores. Se resaltan las correlaciones estadísticamente significativas.

	dTFE	HabNat	IOSE	tIOSE	1-AHPPN
dTFE	1				
HabNat	0,26	1			
IOSE	0,66	0,68	1		
tIOSE	0,33	0,62	0,62	1	
1-AHPPN	-0,26	0,27	-0,08	0,00025	1

Estas diferencias entre los patrones espaciales de los indicadores sugieren una baja redundancia en la información aportada por cada uno de ellos. Esto se pone de manifiesto cuando se analiza la correlación entre los valores de indicadores para las secciones policiales consideradas (Cuadro 2). Las correlaciones más altas corresponden a las del IOSE con HabNat (0,68) y con dTFE (0,66). Si bien hay una cierta variación conjunta, menos del 50 % de la variabilidad de uno de los indicadores está asociada a los otros.

La manera en que los valores se escalan es, sin duda, una decisión importante y con consecuencias para la interpretación de los patrones. Claramente, la extensión espacial (el área total considerada) o temporal (el período para el cual se integran datos de cada uno de los indicadores) afectará los valores relativos. Un atractivo particular de escalar los indicadores es poder comparar patrones espaciales e integrar los indicadores en índices. Un primer índice posible es la suma de los valores de los cinco indicadores (Figura 3). El valor de un índice integrador puede complementarse con la “firma ambiental” que representa el polígono que queda definido en los gráficos de araña. En la Figura 3 se acompaña el mapa del índice de desempeño ambiental con cuatro firmas ambientales correspondientes a cuatro secciones policiales distribuidas en distintas regiones del país y con características productivas diferentes.



HACIA UN SISTEMA DE MONITOREO

El seguimiento temporal de los indicadores sinópticos permitiría avanzar hacia un sistema de monitoreo que evalúe su cambio en el tiempo. Así, sería posible conocer no solo los cambios en la cobertura o la pérdida de hábitats naturales, sino también analizar cambios en el desempeño ambiental de distintos tipos de sistemas productivos (i.e. agrícolas, ganaderos, mixtos) sujetos a diferentes manejos (i.e. cultivos de servicios, rotaciones, laboreos del suelo, etc.). Asimismo, los indicadores sinópticos podrían integrarse a distintos niveles administrativos o escalas espaciales (i.e., departamental, sección policial, predial). En tal sentido es clave la descripción a nivel predial de los indicadores sinópticos.

Se prevé avanzar hacia un sistema de monitoreo que permita conocer la evolución de los indicadores en el tiempo y así analizar cambios en el desempeño ambiental de distintos tipos de sistemas productivos sujetos a diferentes manejos.

Figura 3 - Suma de los valores de los cinco indicadores calculados. Los gráficos de estrella muestran el desempeño en las cinco dimensiones para cuatro secciones policiales con desempeño ambiental contrastante.

El monitoreo de los indicadores también permitiría avanzar en certificaciones, tipificaciones, incentivos y regulaciones, sobre la base de un sistema generalizable y sencillo en cuanto a su implementación.

Esto permitiría no solo caracterizar cada establecimiento, sino también avanzar en certificaciones, tipificaciones, incentivos y regulaciones a partir de un sistema generalizable en el espacio, auditable y sencillo en cuanto a su implementación.

El desempeño ambiental de una unidad del territorio (sección policial, predio, potrero), evaluado en sus múltiples dimensiones, puede vincularse con la producción generada en esa unidad (Figura 4).

La combinación de la descripción del desempeño ambiental con los sistemas de trazabilidad operativos en Uruguay permite tipificar los productos desde el punto de vista de su sostenibilidad ambiental. La tipificación del producto permite una conexión efectiva y explícita con el consumo y, por lo tanto, con la posibilidad de modificar pautas mediante la diferenciación de productos en base a su desempeño ambiental y social.

ADVERTENCIAS EN TORNO AL DIAGNÓSTICO Y EL USO DE LOS INDICADORES

Como se señalaba, los valores de los indicadores han sido escalados de manera de maximizar el contraste entre situaciones y expresar los indicadores en un rango común de valores. Esto entraña riesgos. Por ejemplo, asociar un valor bajo a una situación intrínsecamente mala o, de manera equivalente, un valor alto a una situación óptima o “sostenible”. Es crítico comprender que los indicadores brindan una mirada relativa en el espacio del desempeño ambiental. No tenemos elementos para fijar límites o umbrales con carácter normativo.

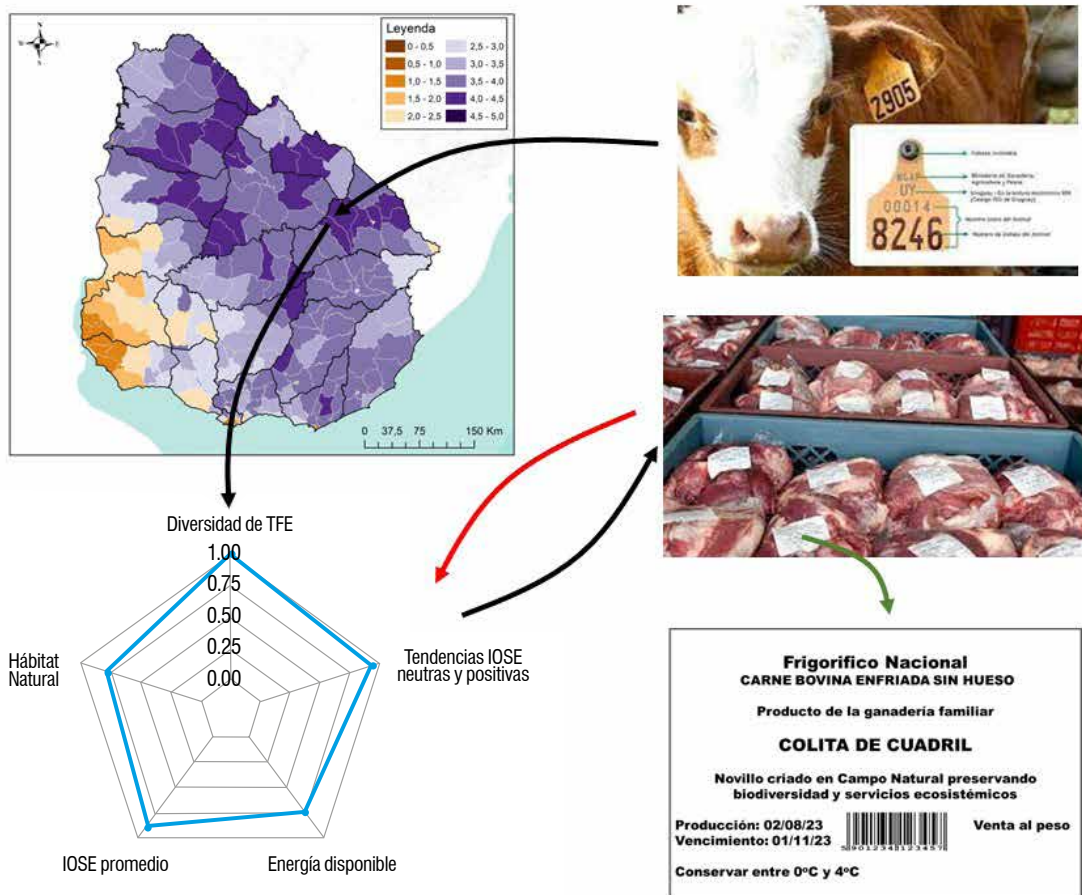


Figura 4 - Esquema del vínculo entre la trazabilidad del ganado y los indicadores de desempeño ambiental en la tipificación de productos, en este caso la carne.

Definir esa norma o umbral es una tarea que tiene una dimensión técnica pero también una política. Requiere la construcción de acuerdos que deben incorporar aspectos técnicos, compromisos internacionales, la perspectiva intergeneracional, la visión de actores sociales con intereses diversos, etc. Uruguay ha construido este tipo de acuerdos en torno a temas ambientales. Los límites de pérdida máxima de suelo en el planteo de un Plan de Manejo agrícola es un ejemplo de una “norma” acordada.

El índice construido y desplegado en la figura suma los indicadores asignándoles igual peso o importancia. Nuevamente, en torno al peso a asignarle a cada uno hay una discusión técnico-política: ¿es igualmente importante la proporción de hábitats naturales que la diversidad de tipos funcionales de ecosistemas? Los patrones resultantes de modificar esos pesos, por ejemplo, darle el doble de importancia a la presencia de hábitats naturales que a la energía disponible para la trama trófica, debería resultar del acuerdo de actores no gubernamentales y del Estado. Este acuerdo debería considerar los intereses y valores de los actores, pero también de manera central la evidencia científica en torno a las consecuencias del nivel o cambio de cada indicador. En el marco de la Mesa de Ganadería sobre Campo Natural se realizó un ejercicio de definición de valores de ponderación de indicadores basado en técnicas de análisis multicriterio (ver Staiano *et al.* 2023). Estas técnicas permiten incorporar la visión de distintos actores o grupos a partir de la comparación de pares de indicadores.

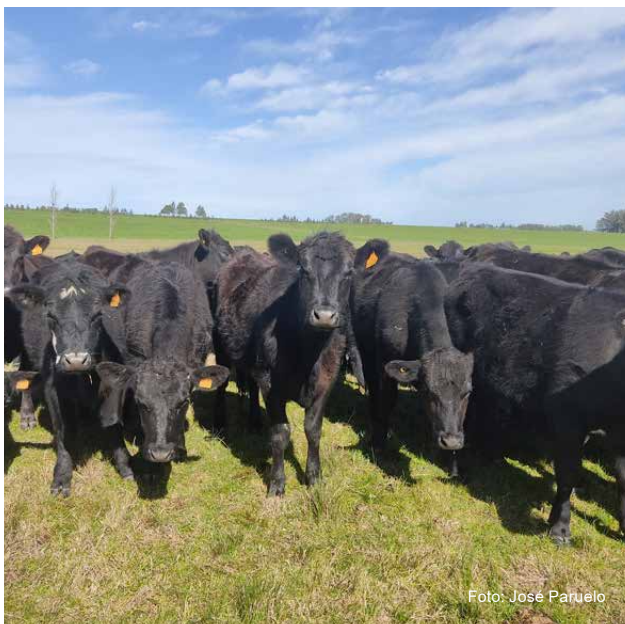


Foto: José Paruelo

Figura 5 - La combinación de la trazabilidad del ganado con la caracterización del desempeño ambiental permite la tipificación y la valorización de la producción ganadera.

La evaluación de la firma ambiental de una unidad territorial es una pieza clave para el diagnóstico y el planteo de estrategias de mejora. Los indicadores constituyen un elemento clave para el monitoreo de trayectorias temporales asociadas a políticas específicas o a planes de manejo prediales. El uso de indicadores basados en datos provistos por sensores remotos habilita la realización de estudios retrospectivos y, consecuentemente, la evaluación ex-post de acciones en el territorio, de cambios globales o de la variabilidad temporal del desempeño ambiental.

BIBLIOGRAFÍA

Alcaraz-Segura, D., Paruelo, J. M., Epstein, H. E., & Cabello, J. (2013). Environmental and human controls of ecosystem functional diversity in temperate South America. *Remote Sensing*, 5(1), 127-154.

Baeza, S., & Paruelo, J. M. (2018). Spatial and temporal variation of human appropriation of net primary production in the Rio de la Plata grasslands. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 145, 238-249.

Baeza, S., & Paruelo, J. M. (2020). Land use/land cover change (2000–2014) in the Rio de la Plata grasslands: an analysis based on MODIS NDVI time series. *Remote sensing*, 12(3), 381.

Baeza, S., Vélez-Martin, E., De Abelleyra, D., Bancharo, S., Gallego, F., Schirmbeck, J., ... & Hasenack, H. (2022). Two decades of land cover mapping in the Rio de la Plata grassland region: The MapBiomass Pampa initiative. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 28, 100834.

Baldassini, P., Baethgen, W., Camba Sans, G., Quincke, A., Pravia, V., Terra, J., Macedo, I., Piñeiro, G. and Paruelo, J.M. (2023). Carbon stocks and potential sequestration of Uruguayan soils. A road map to a comprehensive characterization of temporal and spatial changes to assess Carbon footprint. *Front. Sustain. Food Syst. Sec. Climate-Smart Food Systems. Volume 7 - doi: 10.3389/fsufs.2023.1045734.*

Haberl, H., Erb, K. H., Krausmann, F., Gaube, V., Bondeau, A., Plutzer, C., ... & Fischer-Kowalski, M. (2007). Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(31), 12942-12947.

Paruelo, J. M., Jobbágy, E. G., & Sala, O. E. (2001). Current distribution of ecosystem functional types in temperate South America. *Ecosystems*, 4, 683-698.

Paruelo, J. M., Texeira, M., Staiano, L., Mastrángelo, M., Amdan, L., & Gallego, F. (2016). An integrative index of Ecosystem Services provision based on remotely sensed data. *Ecological indicators*, 71, 145-154.

Staiano, L., Sans, G. H. C., Baldassini, P., Gallego, F., Texeira, M. A., & Paruelo, J. M. (2021). Putting the Ecosystem Services idea at work: Applications on impact assessment and territorial planning. *Environmental Development*, 38, 100570.

Staiano, L., Gallego, F., Altesor, A. & Paruelo, J.M. (2022). Where and why to conserve grasslands socio-ecosystems? A spatially explicit participative approach. *Front. Environ. Sci.*, 07 September 2022. *Sec. Conservation and Restoration Ecology.* <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.820449>.

Vallejos, M., Gallego, F., Barbieri, A., Bruzzone, L., Ramos, S., & Baeza, S. (2021). MapBiomass Pampa Sudamericano: una iniciativa trinacional para conocer los cambios en el uso y cobertura del suelo. *Revista INIA*, 65, 85-89.