

# Manual de indicadores de calidad del suelo para las ecorregiones de Argentina

Marcelo Germán Wilson



**INTA** Ediciones

Colección  
**RECURSOS**

# **Manual de indicadores de calidad del suelo para las ecorregiones de Argentina**

Editor: Marcelo Germán Wilson

Manual de indicadores de calidad del suelo para las ecorregiones de Argentina  
Marcelo G. Wilson ... [et al.]. - 1a ed.  
Entre Ríos: Ediciones INTA, 2017.  
Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

**ISBN 978-987-521-826-0**

1. Suelos. 2. Calidad de suelo.  
3. Monitoreo. 4. Ecorregiones. I. Wilson,  
Marcelo G.  
CDD 631.4

Foto de tapa: Emmanuel A. Gabioud.

## **Prefacio I. Presentación de la obra**

En el presente Manual quedan plasmados los avances logrados a través de las últimas dos carteras de proyectos de INTA, enmarcados en el anterior Programa Nacional Ecorregiones y el actual Programa Nacional Suelo. El aporte de los grupos de investigación activos de INTA de diferentes puntos del territorio, en articulación con investigadores de reconocida trayectoria de otras instituciones, valoriza el alcance de la obra.

El uso del suelo produce alteraciones estructurales y funcionales que condicionan su productividad, siendo prioritario su conocimiento y cuantificación, a través de la identificación de indicadores que representen los diferentes estados, trayectorias y tendencias. La calidad del suelo debe mantenerse, a largo plazo, dentro de ciertos límites que garanticen la capacidad productiva del recurso de forma económicamente viable. Los indicadores de calidad de suelo constituyen herramientas que permiten visualizar el origen de los procesos de degradación y, a partir de esto, delinear pautas de manejo que tiendan a mitigarlos o revertirlos. En tal sentido, esta obra aporta elementos técnico-científicos para la generación de alertas tempranas de procesos de degradación del suelo y la instrumentación de políticas adecuadas de planificación del uso de la tierra.

El Manual está estructurado en dos grandes capítulos. El primero, referido a aspectos generales, comprende quince subcapítulos en los que se plantea y discute el enfoque de la temática, se recopila una década de investigación en la Argentina y se aportan herramientas matemáticas y estadísticas para la obtención de indicadores de calidad del suelo, la definición de sus valores umbrales y el desarrollo de protocolos de monitoreo. Los indicadores, como así también sus valores umbrales, deben ser desarrollados localmente para cada binomio suelo-sistema productivo. Es así que en el segundo capítulo se presentan veinticuatro casos donde se definen los conjuntos mínimos de indicadores de calidad del suelo para los sistemas productivos más relevantes de las seis ecorregiones del país. En cada subcapítulo se caracteriza el agroecosistema, se identifican sus puntos críticos, se presentan los indicadores seleccionados y sus valores umbrales, y se proponen prácticas tecnológicas, de manejo o de organización para lograr la seguridad de los suelos, la sustentabilidad de los sistemas productivos y el fortalecimiento de las economías regionales.

## **Prefacio II. Programa Nacional Ecorregiones**

*Ing. Agr. Daniel Ligier. Ex Coordinador Programa Nacional Ecorregiones*

A pesar del papel de la tecnología para apoyar el mayor número de personas que pueden ser soportadas por la biosfera terrestre, hay un límite finito a los recursos disponibles de la tierra.

Los suelos sufren una creciente presión por la intensificación y la competencia de su uso. Según FAO, la demanda de alimentos, piensos y fibras de una población creciente aumentará un 60 por ciento para 2050. Por lo tanto debemos conceptualizar al suelo como un recurso finito, ya que su pérdida no se revierte en el curso de una vida humana. Por ello una mirada hacia la sustentabilidad coloca al suelo como un recurso irremplazable para la seguridad alimentaria y la nutrición del planeta.

En la Argentina los mejores suelos agrícolas (cerca de 47 millones de hectáreas), presentan altos niveles de intervención antrópica, por lo que en la actualidad los desarrollos tecnológicos y las políticas públicas, deben profundizar estrategias para la intensificación sustentable, la recuperación de tierras degradadas y no focalizarse en la expansión productiva sobre nuevas tierras.

Frente a esta situación, el Manual de Indicadores de calidad del suelo, es una obra de gran relevancia, no solo por su riqueza científica técnica, también como un excelente elemento para generar toma de conciencia en la sociedad.

Esta obra transita gradualmente desde aspectos generales de los indicadores de calidad de suelo y sus componentes; explicita métodos, selección de indicadores y su construcción, para luego centrarse en aquellos que permiten monitorear sistemas productivos relevantes en cada una de las seis ecorregiones definidas para Argentina.

Como hecho institucional sumamente auspicioso es la integración de Programas Nacionales como el PN Suelo y PN Recursos Naturales, Gestión Ambiental y Ecorregiones, generando espacios colaborativos para alcanzar el objetivo propuesto.

Mis felicitaciones a todos los autores y al editor de esta obra, que con seguridad será ampliamente consultada por diversos usuarios.

### **Prefacio III. Programa Nacional Suelos**

*Ing. Agr. Dr. Adrián Enrique Andriulo Coordinador Programa Nacional Suelo*

El Programa Nacional Suelo, de reciente creación, retomó el tratamiento de los principales problemas de degradación, de las tecnologías de conservación y de la fertilidad de los suelos. Busca establecer parámetros y umbrales críticos de suelos para las distintas ecorregiones, delimitar zonas de monitoreo (en observatorios territoriales), acordar criterios y metodologías para cada una de ellas y determinar zonas vulnerables, sentando las bases para la posible aplicación de una futura Ley de Suelos. El Manual de Indicadores de Suelos para las Ecorregiones de Argentina constituye una herramienta esencial en la evaluación de la componente agroambiental de los agroecosistemas, dado que ayuda a identificar sus trayectorias presente y futura. Un diagnóstico surgido de la valoración de indicadores puede servir para adoptar medidas de gestión temprana, cuando la degradación de las tierras todavía no alcanzó

un estado irreversible. Y, en definitiva, construir soluciones operativas para mantener o mejorar el funcionamiento de las tierras dentro de ciertos umbrales, definidos en forma flexible.

Esta contribución, dividida en dos capítulos, primero aborda de manera exhaustiva los aspectos generales para su construcción y protocolización. Posteriormente, caracteriza e identifica los puntos críticos de los sistemas productivos relevantes de cada ecorregión alertándonos sobre los procesos de degradación y las propuestas de manejo para su control.

Un logro fundamental de esta obra es su redacción amena, sin dejar de ser profunda y concreta; y constituye el fiel reflejo de la labor mancomunada y entusiasta de numerosos colegas de la Ciencia del Suelo.

## INDICE

### Capítulo I. Aspectos Generales

1	Los ICS como un componente de la calidad agroambiental .....	15
2	¿Qué son los indicadores? .....	19
3	Aplicación de ICS para monitoreo agroambiental .....	23
4	Indicadores de calidad de suelo según referentes calificados .....	29
5	Indicadores de calidad de suelos en argentina. Recopilación de una década de investigaciones .....	35
6	La profundidad de muestreo para análisis de fertilidad y calidad de suelo .....	61
7	La materia orgánica como indicador de calidad de suelo .....	65
8	El estado estructural como indicador de calidad de suelo bajo siembra directa .....	73
9	Indicadores biológicos de calidad de suelo. ....	83
10	Indicadores de calidad de suelo en etapa de ajuste .....	89
11	Selección de indicadores de calidad de suelo. Obtención del conjunto mínimo de indicadores (CMI). Criterios para la definición de valores umbrales y obtención de índices .....	93
12	Metodologías de construcción de índices de calidad de suelos.....	107
13	Una propuesta metodológica para la selección de indicadores y la obtención de índices de calidad de suelo .....	119
14	Evaluación de índices de uso de la tierra para predecir cambios en las propiedades del suelo .....	131
15	Protocolos de Monitoreo de la Calidad del Suelo .....	137

**Capítulo II. Indicadores de calidad de suelo para los sistemas productivos relevantes por ecorregión.**

**ICS por Sistemas productivos. Suelos.**

*Ecorregión Patagónica*

1	Patagónia extrandina. SISTEMA PRODUCTIVO: Ganadería extensiva sobre pastizales naturales	149
---	---	-----

2	Valles Irrigados Norpatagónicos SISTEMA PRODUCTIVO: Frutícola	159
---	--	-----

*Ecorregión Cuyo*

3	Sureste de San Luis SISTEMA PRODUCTIVO: Mixto (Agrícola - Ganadero) del SE de San Luis	169
---	---	-----

*Ecorregión Norandina*

4	Valles Templados de Salta y Jujuy SISTEMA PRODUCTIVO: Intensivo Tabacalero, bajo riego	175
---	---	-----

*Ecorregión Chaqueña*

5	Valle Central de Catamarca SISTEMA PRODUCTIVO: Frutales intensivo bajo riego (OLIVÍCOLA)	181
---	---	-----

6	Umbral al Chaco de Salta y Jujuy SISTEMA PRODUCTIVO: Igrícola extensivo de granos a secano	187
---	---	-----

7	SISTEMA PRODUCTIVO: Agricultura de secano en siembra directa sobre suelos forestales sujetos a cambios en el uso del suelo	193
---	--	-----

*Ecorregión Mesopotámica*

8	Centro y noroeste de Misiones SISTEMA PRODUCTIVO: Forestal (Plantaciones de Pinus taeda)	209
---	---	-----

9	Centro y noroeste de Misiones SISTEMA PRODUCTIVO: Específico yerbatero	213
---	---	-----

10	Centro-Sur de Corrientes SISTEMA PRODUCTIVO: Agrícola puro	223
----	---	-----

11	Centro-Sur de Corrientes SISTEMA PRODUCTIVO: Agrícola específico arrozero bajo riego agua superficial	227
----	--	-----

12	Corrientes SISTEMA PRODUCTIVO: Mixto (Forestal- Ganadero)	233
----	--	-----

13	Centro-Norte de Entre Ríos SISTEMA PRODUCTIVO: Ganadero agrícola del área de bosques nativos	237
----	---	-----

*Ecorregión Pampeana*

14	Centro-Este de Entre Ríos SISTEMA PRODUCTIVO: Agrícola específico arrozero regado con agua de origen subterráneo	241
----	---	-----

15	Centro-Sur de Buenos Aires SISTEMA PRODUCTIVO: Agrícola mixto y agrícola puro	245
----	--	-----

16	Norte de Buenos Aires SISTEMA PRODUCTIVO: Agrícola continuo bajo siembra directa	249
----	---	-----

17	Área de la Cuenca de Mar Chiquita SISTEMA PRODUCTIVO: Agrícola- ganadero	253
----	---	-----

18	Centro-Sur de Santa Fe SISTEMA PRODUCTIVO: Agrícola continuo	259
----	---	-----

19	Sudeste de Córdoba SISTEMA PRODUCTIVO: Agrícola	267
----	--	-----

20	Sudoeste de Buenos Aires SISTEMA PRODUCTIVO: Mixto (Agrícola-Ganadero y Ganadero-Agrícola)	273
----	---	-----

21	Sudeste de Buenos Aires SISTEMA PRODUCTIVO: Agrícola - Ganadero .....	281
22	Este de La Pampa SISTEMA PRODUCTIVO: Mixto (Agrícola-Ganadero) .....	291

# Capítulo 1

ASPECTOS GENERALES



## Los indicadores de calidad de suelo como un componente de la sustentabilidad de los agroecosistemas

Donaldo E. Bran<sup>1</sup>, Juan José Gaitán<sup>1</sup> y Marcelo Germán Wilson<sup>2</sup>

La Argentina es el octavo país más grande del planeta en superficie (2.780.400 km<sup>2</sup>), y si bien presenta una densidad poblacional relativamente baja (14,6 hab/km<sup>2</sup> en 2010), más del 80% de su territorio es utilizado para actividades agrícolas, ganaderas y forestales. La producción agropecuaria fue el principal motor del crecimiento y desarrollo del país, hasta bien entrado el siglo XX. Argentina sigue teniendo un rol destacado como proveedor de alimentos a escala global, exportando en 2014 alrededor de 75 millones de toneladas de granos y productos derivados de su industrialización, que representa una participación relativa del 11,4% del comercio mundial medido en volúmenes físicos (Calzada, 2014).

Las actividades agropecuarias en Argentina se

desarrollan en una gran variedad de ambientes, de los cuales en superficie y en términos generales, un tercio corresponde a ecosistemas húmedos y dos tercios a ecosistemas áridos y semiáridos. Por su propio carácter esta producción ocupa grandes superficies, reemplazando o modificando el hábitat natural y los servicios ecosistémicos que presta, tales como el mantenimiento de la biodiversidad, la provisión de agua potable, la regulación hídrica de cuencas, la captura de gases de efecto invernadero, entre otras. Por lo tanto es frecuente que se generen controversias entre producción y conservación, lo que remite a la idea de sustentabilidad.

El término sustentabilidad guarda múltiples interpretaciones y es utilizado como sinónimo de sos-

1. INTA, Estación Experimental Bariloche. Bariloche 8400, Río Negro, Argentina.

2. INTA, Estación Experimental Paraná. Oro Verde 3101, Entre Ríos, Argentina.

tenibilidad, referido a la cualidad de sostenible, ésto es un proceso que puede mantenerse por sí mismo en el tiempo, sin ayuda exterior ni merma de los recursos existentes. Sin embargo esta definición es contradictoria, ya que los sistemas socio-ambientales son dinámicos, y no habría un equilibrio ideal, deseado o buscado (Reynolds et al., 2007). El mundo está en constante evolución, sociedad y ambiente deben co-adaptarse frente a los cambios de cualquiera de ambas partes. Sin embargo no siempre esa co-adaptación se logra y muchas veces se producen desarreglos ambientales, que arrastran negativamente a las sociedades o viceversa. Estos desarreglos son conocidos como Síndromes de Sustentabilidad (WBGU, 1997) y pueden ser producidos tanto por la sobreutilización de los recursos naturales, como por la excesiva generación y deposición de residuos; dicho de otra manera, cuando se compromete la capacidad de la tierra de actuar como fuente de producción de bienes y servicios, o cuando se supera su capacidad de actuar como sumidero (Foladori y Pierri, 2005).

La idea de sustentabilidad se fue complejizando, y se fueron agregando distintas dimensiones para su análisis, que se podrían resumir en tres: la dimensión natural o ambiental, la dimensión social y la dimensión económica - productiva. Cuando los ecosistemas naturales se transforman en agroecosistemas, se producen ganancias y pérdidas en cada una de estas dimensiones. Para poner un ejemplo se puede analizar la colonización de la Patagonia a fines del Siglo XIX y la implementación de sistemas ganaderos ovinos. En la dimensión económica-productiva, la actividad ovina para producción de lana generó hasta mediados del Siglo XX grandes riquezas y fue el principal promotor del modelo de desarrollo regional. Sin embargo, en la dimensión natural generó una importante degradación de los pastizales y la consiguiente erosión de los

suelos, afectando al territorio patagónico con diversos grados de desertificación (Del Valle et al., 1997), y desde el punto de vista social significó el exterminio o marginación de los pueblos que preexistían en esos territorios (Malvestitti, 2002). Estos procesos de ganancias y pérdidas también se dan cada vez que se generan cambios en el uso de las tierras, inclusive dentro de un mismo uso cuando se generan cambios en los sistemas de producción. En la actualidad, estos cambios tienden a hacerse más rápidos e intensos, motorizados por el proceso global conocido como la "Gran Aceleración", generado a partir de la segunda mitad del Siglo XX (Lewis y Maslin, 2015). Este proceso, caracterizado justamente por la aceleración en el crecimiento de la población humana, en los avances tecnológicos y en los procesos de concentración económica, sumado al cambio climático, implica nuevos desafíos a la sustentabilidad. Considerando entonces que el mundo es dinámico y en constante evolución, se puede reformular el concepto de sustentabilidad, no ya en la idea de un sistema que se mantiene por sí mismo en el tiempo, sino en los procesos de co-adaptación, donde el aumento de ganancias en una o más dimensiones de la sustentabilidad no debería hacerse a expensas de pérdidas abruptas en alguna de las otras dimensiones.

La complejidad implícita en la sustentabilidad, ya que cada dimensión a su vez presenta innumerables variables, ha llevado a trabajar en el desarrollo de nuevos abordajes, nuevos dispositivos y nuevas herramientas. Entre ellas está la propuesta de generar Observatorios, como los Observatorios de Sustentabilidad Rural (Bran et al., 2015) o el Observatorio Nacional de Desertificación y Degradación de Tierras ([www.desertificacion.gob.ar](http://www.desertificacion.gob.ar)). Los observatorios son concebidos como herramientas dedicadas a la recolección, seguimiento y difusión de datos. Pero esos datos, diversos y complejos, deben ser transformados en

indicadores. Un indicador es algo que sirve para indicar una dirección o una acción. En el caso de los observatorios propuestos, los indicadores deberían servir para: promover y sensibilizar sobre los problemas observados; suprimir barreras y desigualdades de información entre los diferentes actores sociales; detectar situaciones de riesgo; detectar y difundir buenas prácticas e iniciativas; evaluar el impacto real de la implementación de políticas, y fundamentalmente, ayudar a encontrar respuestas que ayuden a revertir o mitigar los posibles Síndromes. Para lograrlo, los observatorios deben constituirse al mismo tiempo en espacios articuladores que permitan una representación colectiva de estas realidades complejas, a través de miradas interdisciplinarias y la representación de múltiples actores, en la validación y análisis de los indicadores.

Entre los indicadores propuestos para la dimensión ambiental, se destacan a los Indicadores de calidad de suelo (ICS). En un mundo que debe enfrentar un incremento de población, en el contexto de cambio climático, el mantenimiento de la calidad de los suelos va a ser cada vez más importante (Montanarella, 2015). Según este autor, sin gobernanza para asegurar la gestión racional y el acceso equitativo al suelo, nos dirigimos hacia el aumento de la pobreza, el hambre, los conflictos, la apropiación de tierras y la migración masiva de las poblaciones desplazadas. Para reforzar la idea de gobernanza cita la frase escrita por F. Roosevelt: "La historia de cada nación está eventualmente escrita en la forma en que cuida sus suelos", y señala que en la comunidad científica se empieza a hablar del concepto de la seguridad de los suelos (soil security), ya que el suelo tiene un rol integral en los desafíos de la seguridad alimentaria, la seguridad del agua, la seguridad energética, la estabilidad del clima y la protección de la biodiversidad y de los servicios ecosistémicos (McBratney et al. 2014).

## Bibliografía

- BRAN D., S. ALDERETE SALA, C. CALCATERRA, J. ZURITA, N. MURILLO, J. GAITAN y N. MACEIRA, 2015. *Marco conceptual y propuesta metodológica para el desarrollo de Observatorios de Sustentabilidad Rural*. Disponible en [http://inta.gob.ar/sites/default/files/inta\\_observatorios\\_de\\_sustentabilidad\\_rural\\_conceptos-y-metodologia\\_agosto-2015.pdf](http://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_observatorios_de_sustentabilidad_rural_conceptos-y-metodologia_agosto-2015.pdf)
- CALZADA J., 2014. *Argentina y su posicionamiento en el mercado mundial de granos, aceites y sub-productos*. Informativo Semanal Bolsa de Comercio de Rosario. Año XXXII - N° 1687. [http://www.bcr.com.ar/Publicaciones/Informativo%20semanal/bcr2014\\_12\\_05.pdf](http://www.bcr.com.ar/Publicaciones/Informativo%20semanal/bcr2014_12_05.pdf)
- DEL VALLE, H.; N. Elissalde; D. Gagliardini y J. Milovich, 1997. *Distribución y cartografía de la desertificación en la región de Patagonia*. RIA 28: 1-24.
- FOLADORI G. y N. PIERRI, 2005. *¿Sustentabilidad? Desacuerdos sobre el desarrollo sustentable*. Colección América Latina y el Nuevo Orden Mundial. México.
- LEWIS S. y M. MASLIN, 2015. *Defining the Anthropocene*. Nature 519: 171-180
- MALVESTITTI, 2002. *El poblamiento mapuche de la Línea Sur después del aukán*. En Anclajes VI, Parte I - diciembre: 79-102.
- MC BRATNEY y A., D. FIELD y A. KOCH, 2014. *The dimensions of soil security*. Geoderma 213:203-213
- MONTANARELLA L., 2015. *Govern our soils*. Nature 528: 32-33.
- REYNOLDS, J., D. STAFFORD SMITH, E. LAMBIN, B. TURNER, M. MORTIMORE, S. BATTERBURY, T. DOWNING, H. DOWLATABADI, R. FERNANDEZ, J. HERRICK, E. HUBER-SANNWALD, H. JIANG, R. LEEMANS, T. LYNAM, F. MAESTRE, M. AYARZA y B. WALKER. 2007. *Global desertification: Building a science for dryland development*. Science 316: 847-851.
- WBGU (German Advisory Council on Global Change), 1997. *World in Transition: The Research Challenge. Annual Report 1996*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.

## ¿Qué son los indicadores?

Analia Becker<sup>1</sup>

### Indicadores

Un indicador es un parámetro o un valor derivado de parámetros que provee información, describe el estado de un fenómeno/ ambiente/ área, con un significado extendido más allá que el directamente asociado con el valor del parámetro (OECD, 1995). Gallopin (1997) considera que un indicador es una variable y que ésta es una representación operacional de un atributo (calidad, característica, propiedad) de un sistema. Así, un indicador es un atributo en términos de una medición específica o procedimiento de medición donde la variable está asociada a una particular serie de entidades a través de las cuales se manifiesta. Estas entidades son referidas como estados o valores de esta variable.

Un indicador es una variable que resume o simplifica información relevante, haciendo que un fenómeno o condición de interés se haga perceptible, mediante la cuantificación y comunicación en forma comprensible. Los indicadores deben ser preferiblemente variables cuantitativas, cualitativas o nominales o de rango u ordinales, especialmente cuando no hay disponibilidad de información cuantitativa, o el atributo no es cuantificable o los costos para cuantificar son demasiado elevados. Las principales funciones de los indicadores son: evaluar condiciones o tendencias, comparar transversalmente sitios o situaciones, para evaluar metas y objetivos, proveer información preventiva temprana y anticipar condiciones y tendencias futuras.

---

1. *Universidad Nacional de Río Cuarto, Facultad de Ciencias Exactas, Físico-químicas y Naturales.  
Río Cuarto, 5800, Córdoba, Argentina*

Respecto a las características que deben reunir los indicadores, éstos deben ser: limitados en número y manejables por diversos tipos de usuarios; sencillos, fáciles de medir, de bajo costo y tener un alto grado de agregación, es decir, deben ser propiedades que resuman otras cualidades o propiedades; interdisciplinarios; en lo posible deberán incluir todo tipo de propiedades de los recursos naturales (químicas, físicas, biológicas, etc.), tener una variación en el tiempo tal que sea posible realizar un seguimiento de las mismas, asimismo, no deberán poseer una sensibilidad alta a los cambios climáticos y/o ambientales pero la suficiente como para detectar los cambios producidos por el uso y manejo de los recursos (Gallopín 1997; Doran & Parkin 1996; Cantú et al, 2008).

### Selección de indicadores

La selección de indicadores a utilizar constituye una problemática que ha sido ampliamente discutida (Cendrero et al. 2002; SCOPE, 1995, entre otros) y vinculada al grado de subjetividad que se incorpora en la misma. A esto se suma una mayor subjetividad al asignar peso a cada indicador para la elaboración de indicadores compuestos o índices y en el establecimiento de rangos (líneas de base y umbrales críticos).

El Proyecto REDESAR, integrado por investigadores de distintas regiones del país para la evaluación de la sustentabilidad ambiental en sistemas agropecuarios, ha desarrollado una metodología para la selección de indicadores e índices (Cantú et al. 2008). En el mismo se utilizó la combinación de una matriz de doble entrada compuesta por la combinación del modelo Presión, Estado y Respuesta (PSR) con las funciones de los recursos naturales. En esta última se consideran dos selecciones de atributos, a nivel de Sistema (funciones de Naturalidad, de Fuente de Recursos y de Sumidero de efluentes y residuos); y a nivel de detalle

o de Unidades (funciones de Fuente de Recursos y de Sumidero) para cada recurso. El Modelo de PSR (OECD, 1995) es un modelo causa-efecto donde la Presión representa el efecto de las actividades humanas sobre el ambiente, cambiando la calidad y cantidad de los recursos naturales. El Estado representa los cambios observables y medibles en el ambiente y los recursos naturales. La Respuesta son las intenciones o acciones que la sociedad realiza para modificar la presión sobre los recursos naturales o el ambiente, con el fin de mejorar o proteger los recursos naturales.

El modelo ha sido criticado por sus relaciones causales ya que podrían llevar a posturas simplistas como suponer que los sistemas naturales son receptores pasivos que no presentan mecanismos de autorregulación que permiten equilibrar o compensar los cambios. Hay una concepción lineal de las relaciones entre el subsistema natural y el subsistema social y en realidad, cada subsistema tiene relaciones más complejas internamente y entre ellos (Gallopín 1997).

Cantú et al. (2008) al aplicar el modelo PSR, partieron del concepto de que permite evaluar cuáles son las relaciones entre el subsistema social y el natural y a través de ello, establecer una aproximación de cuán sustentable, desde la perspectiva ambiental, es el uso actual de los recursos naturales para la producción agropecuaria. Ello permite evaluar cuál es la presión de uso al que es sometido cualquier recurso natural y, por otra parte, si a través de los cambios de estado o calidad del recurso es posible evaluar el efecto de esa presión, y poder establecer la necesidad de regulaciones o cambio de las mismas, si éstas ya existieran. Los indicadores de Respuesta son los que permiten identificar si en una región dada existen marcos regulatorios que permitan manejar o controlar los impactos sobre los recursos naturales.

Los sistemas naturales, por ser sistemas abiertos en equilibrio dinámico, tienen mecanismos de autorregulación que le permiten reaccionar frente a una presión o impacto conservando su condición, y por otra parte, pequeños cambios generan una secuencia de estados de equilibrios que pueden indicar una tendencia de cambio. Es por ello que la combinación de estas tres clases de indicadores permite tener una imagen del grado de sustentabilidad que presenta un área dada. Un área que no tenga marcos regulatorios, aunque la calidad (o estado) de los recursos naturales no esté fuertemente afectada, es menos sustentable que si los tuviera. Esto permite establecer la demanda de marcos regulatorios.

Otro de los aspectos de la matriz de doble entrada considerada (Cantú et al. 2008) es el que evalúa las funciones de los recursos naturales. Estas pueden ser:

- **Función de Naturalidad:** *representa el grado de conservación de la naturaleza prístina.*
- **Función Fuente de Recursos:** *indicadores que se utilizan para referirse a los recursos naturales como fuente para la generación de recursos para la sociedad. Por ejemplo: el suelo y el agua como fuente de recursos para la agricultura, la ganadería, la silvicultura, etc.*
- **Función Sumidero:** *indicadores que permiten evaluar a los recursos naturales desde una perspectiva de sumidero de efluentes y residuos, o sea la capacidad de retención, capacidad filtrante, dilución, entre otros. Por ejemplo, el agua como sumidero de contaminantes, el suelo como sumidero de contaminantes y residuos.*

Para cada tipo de indicador se establecen las técnicas de obtención del valor teniendo como criterio básico los principios establecidos para la selección de un indicador. Se adoptaron téc-

nicas de rutina disponibles en la mayoría de los laboratorios de suelos y aguas. Para aquellos indicadores de presión y de respuesta no cuantificables se utilizan datos estadísticos preexistentes o resultados de encuestas propias. Es de destacar que los distintos grupos participantes del proyecto (REDESAR-PICT 439/03) realizaron un estudio de sensibilidad de los indicadores teniendo en cuenta la información previa existente en cada área, preferentemente la obtenida por el mismo grupo y repitiendo las mediciones anualmente.

### ¿Cómo se obtienen los índices?

Existen diferentes metodologías para la obtención de índices. En el proyecto desarrollado por Cantú et al. (2008) se efectúa la combinación de indicadores para obtener índices integrados que puedan reflejar más claramente la calidad ambiental, de los suelos y el agua y el grado de sustentabilidad de los agroecosistemas con respecto a las principales funciones de los recursos. En este proyecto, los valores de Indicadores e Índices son normalizados mediante una escala que oscila entre 0-1, donde los valores 0 y 1 representan, respectivamente, la peor y la mejor condición desde el punto de vista de la calidad ambiental, de suelos y agua o de la sustentabilidad, considerando los valores absolutos utilizados para cada indicador. Cuando se transforma el indicador medido ( $I_m$ ) a su valor normalizado ( $V_n$ ) entre 0 y 1 pueden ocurrir dos situaciones:

**a)** El valor máximo del indicador del intervalo ( $I_{max}$ ) corresponde a la mejor condición ambiental ( $V_n = 1$ ), por ejemplo cobertura vegetal 100%, mientras que valor mínimo del indicador es la peor condición (cobertura vegetal 0%).

$$V_n = \frac{I_m - I_{min}}{I_{max} - I_{min}}$$

**b)** El valor máximo corresponde a la peor situación ambiental ( $V_n = 0$ ), por ejemplo porcentaje

de cursos contaminados.

$$Vn = 1 - \frac{Im - Imin}{Imax - Imin}$$

Los índices de Presión, Estado y Respuesta son obtenidos para cada una de las diferentes funciones de los recursos:

$$IRp = \sum (Vi * Wi / n).$$

Donde:

*IRp* = índice de presión de fuente de recursos

*Vi* = valor normalizado de un indicador individual

*Wi* = peso del indicador

*n* = N° de indicadores.

$$\sum Wi = 1$$

El mismo procedimiento es utilizado para calcular los índices de estado y respuesta. Los índices de Presión (p), Estado (e) y Respuesta (r) para cada una de las diferentes funciones son integradas como índices de la función:

$$IR = (IRp.Wi + IRe.Wi + IRr.Wi) / 3$$

Integrando los distintos índices se obtienen los índices de calidad ambiental, calidad de suelos y agua, sustentabilidad de los agroecosistemas, considerando que estos índices son una función de la calidad individual de los componentes y la calidad de éstos son una función de las series de parámetros con los que se describe el estado.

### Bibliografía

- CANTÚ MC, BECKER AR, BEDANO JC. 2008. *Evaluación de la sustentabilidad ambiental en sistemas agropecuarios: desarrollo de la aplicación de la metodología del proyecto REDESAR (PIC-TR439/03)*. Fundación UNRC. 184 páginas.
- CENDRERO A, FANCÉS E, LATRUBESSE EM, PRA-DO R, FABBRI A, PANIZZA M, CANTÚ MP, HUR-TADO M, GIMÉNEZ JE, MARTINEZ O, CABRAL M, TECCHI RA, HAMITY V, FERMAN JL, QUINTANA C, CECCIONI A, RECATALA L, BAYER M e AQUINO S. 2002. Projeto RELESA-ELANEM: *Uma nova proposta metodológica de índices e indicadores para avaliação da qualidade ambiental*. Revista Brasileira de Geomorfologia, Ano 3, N°1:33-47.
- DORAN JW & PARKIN TB. 1996. *Quantitative indicators of soil Quality: a minimum data set*. In: *Methods for assessing Soil Quality*, SSSA Special Publication N° 49, pp 25-37. Wisconsin, USA.
- GALLOPIN G. 1997. *Indicators and their use information for decision making. Part 1 Introduction*. En: *Sustainability indicators*, eds. B. MOLDAN and S. BILLHARZ. Wiley, Chichester-N. York.
- OECD. 1995. *Using the Pressure, State and Response to develop*. OECD: Paris, France.
- SCOPE. 1997. *Environmental indicators; a systematic approach to measuring and reporting on the environment in the context of sustainable development*. In: *Indicators of sustainable development for decision-making*, Eds: GOUZEE N, MA-ZIJN B and BILLHARZ S. Federal Planning Office, Brussels: 25 pp.

## Aplicación de indicadores de calidad de suelo para el monitoreo agroambiental

Marcelo Germán Wilson<sup>1</sup> y María Carolina Sasal

### Introducción

El cambio en el uso de la tierra que se ha registrado en los últimos años en la mayor parte de las áreas húmeda y subhúmeda del país, se dio a través de la conversión de ecosistemas naturales a cultivados, especialmente a partir del desmonte y la simplificación de los esquemas de rotaciones en tierras agrícolas, con tendencias al monocultivo de soja. Esto se debe a la ventajosa relación insumo/producto de la soja respecto a otros cultivos o al uso de pasturas o pastizales naturales. En consecuencia, se han identificado procesos de degradación de los recursos naturales comprometiendo la sustentabilidad de los sistemas productivos.

El deterioro de las propiedades físicas, químicas

y biológicas de los suelos como resultado del uso agrícola ha sido observado prácticamente en la totalidad de las Tierras cultivadas en la Argentina. Estos problemas han sido alertados en diferentes foros de discusión por diversos sectores sociales y de la producción, requiriendo una respuesta inmediata.

### Calidad del suelo

Para interpretar la condición de un suelo en términos de su calidad, el criterio sugerido por Larson y Pierce (1994) referido a la aptitud para el uso "fitness for use" se considera el más adecuado. En el contexto de maximizar la producción agrícola, la calidad del suelo se define en términos de productividad, específicamente en relación a

1. INTA, Estación Experimental Paraná. Oro Verde 3101, Entre Ríos, Argentina.

la capacidad de sostener el crecimiento de los vegetales. De este modo, la calidad del suelo se define como su capacidad o aptitud para soportar el crecimiento de los vegetales sin que éste resulte en la degradación del suelo o en un daño ambiental (Gregorich y Acton, 1995). La calidad del suelo se establece como resultado de asociar la condición del suelo a características necesarias para un uso particular (aptitud). Implícita en esta definición está la capacidad del suelo para mantener su aptitud en el futuro. Así, Carter et al. (1997), consideran que la definición de calidad de suelo involucra dos conceptos: la calidad inherente del suelo para el crecimiento de los cultivos y la calidad dinámica influenciada por el uso o manejo. En este sentido, Koolen (1987) y Carter (1990) distinguieron las propiedades estáticas de las de comportamiento del suelo, que corresponden respectivamente a las características naturales o inherentes, y a aquellas asociadas a la dinámica del suelo.

### Calidad inherente del suelo

Los primeros esfuerzos científicos relacionados a esta temática, reconocieron la importancia de categorizar clases de suelos y sus propiedades para diferentes usos, especialmente el agrícola. Se encontraron fuertes relaciones entre las clases identificadas y sus propiedades. Un suelo es el resultado de la interacción entre los factores de formación: clima, topografía, vegetación, material parental y el tiempo (Jenny, 1980). Por lo tanto, cada suelo tiene una capacidad innata de funcionar. Así, algunos suelos serán inherentemente más productivos o serán capaces de proveer agua al cultivo mucho más eficientemente que otros (Seybold et al., 1998). Este punto de vista de la definición es útil para comparar capacidades de un suelo respecto a otro, siendo frecuente evaluar el valor o aptitud de los suelos para usos específicos.

A partir del análisis de costos de producción

y la utilización en forma combinada de las clasificaciones de aptitud de Tierras y la adecuación de regiones para usos específicos, se empezó a generalizar el uso del término calidad, tanto para las evaluaciones de Tierras como de suelos (Carter et al., 1997). Efectos adversos producidos por el uso y el manejo, y/o efectos climáticos (por ejemplo la erosión y la desertificación) pueden resultar en el deterioro de un suelo que originalmente poseía buena calidad inherente. De esta manera y con la finalidad de conocer la productividad de los suelos, la calidad inherente puede ser estimada utilizando los inventarios de los recursos naturales para cada región o país.

### Calidad dinámica del suelo y su evaluación

La caracterización de los cambios positivos o negativos en la calidad del suelo, provee un método efectivo para evaluar directa o indirectamente los impactos de las decisiones de manejo por parte del hombre. Respecto a la producción de cultivos, las funciones del suelo están orientadas a alimentar y mantener el crecimiento de las plantas (Carter et al., 1997). Estas funciones están relacionadas a la eficiencia con que el suelo provee nutrientes esenciales y el ambiente necesario para lograr la conversión de CO<sub>2</sub> usando la energía de la luz solar (vía fotosíntesis). Larson y Pierce (1994) definieron a la calidad del suelo como la habilidad o capacidad del mismo para cumplir varias funciones intrínsecas y extrínsecas: proveer un medio para el crecimiento de las plantas y la actividad biológica, regular y particionar el flujo y el almacenamiento del agua en el ambiente y servir como buffer en la formación y destrucción de compuestos ambientalmente riesgosos.

La calidad del suelo no puede ser medida directamente, pero puede ser inferida a partir de cambios en sus atributos o atributos del

ecosistema, llamados indicadores. Estos deben ser de fácil observación o registro, sencillos de comprender (Viglizzo, 1996) y sus mediciones deben ser reproducibles (Gregorich et al., 1994). Para la medición de la calidad dinámica del suelo se utilizan indicadores que son representados por aquellas variables sensibles al deterioro o la recuperación del suelo. Estos indicadores permiten expresar la condición actual o "estado del recurso" y su tendencia, aportando un carácter dinámico y holístico al considerar sus interrelaciones. Son necesarios para identificar áreas con problemas porque permiten monitorear cambios en la calidad ambiental, relacionados al uso y manejo. La clave es identificar variables físicas, químicas y biológicas que sean sensibles a los cambios en las funciones del suelo. Al grupo de indicadores seleccionados se lo denomina set mínimo de datos, conjunto mínimo de indicadores (CMI) o conjunto mínimo de datos (CMD), (Larson y Pierce, 1994; Doran y Safley, 1997). Este CMI provee una estimación práctica de uno o varios procesos que afectan una función específica del suelo. Como se comentó anteriormente, estas propiedades deben ser medibles, reproducibles y estar sujetas a algún grado de estandarización. Es de destacar que estos CMI deben ser desarrollados localmente ya que pueden variar para distintas regiones, dependiendo de los factores formadores, del tipo de suelo, sus funciones y el uso que se le dé (Carter et al., 1997), como así también sus valores umbrales. Esto hace que sean muy diversas y abundantes las propuestas de CMI citadas en la bibliografía

### Monitoreo de la calidad del suelo

El uso del suelo produce alteraciones estructurales y funcionales que condicionan su productividad, siendo necesario conocerlas y cuantificarlas, a través de la identificación de los indicadores que

representen los diferentes estados, trayectorias y tendencias, dado que a largo plazo es necesario que la calidad del suelo se mantenga dentro de ciertos límites que garanticen la capacidad productiva del recurso de forma económicamente viable. Seybold et al. (1998), plantearon dos metodologías para medir y evaluar los cambios en la calidad del suelo: el monitoreo de tendencias y la determinación de valores de referencia. Monitorear las tendencias requiere tomar valores de base para los indicadores y medir el cambio en ellos a lo largo del tiempo (Larson y Pierce, 1994). Los indicadores individuales pueden ser evaluados por líneas de dirección (líneas de tendencia). Si el cambio en el indicador es positivo, se puede considerar que el suelo está mejorando o incrementando su calidad, respecto a su valor base. Inversamente, si la línea de tendencia es negativa para ese indicador, entonces la calidad se está degradando (disminuye).

Una situación en la que los valores del indicador se mantengan dentro de un rango deseable, garantizando la funcionalidad del recurso, indicaría un sistema con manejo sustentable del suelo. Los valores de referencia asignados a cada indicador representan a un suelo funcionando a su potencial, es decir a su máxima capacidad en función de la clase de suelo, uso, clima e insumos del sistema (Lal, 1997; Karlen et al., 1994). Estos valores de referencia se desarrollan específicamente para cada indicador y consisten en un valor máximo y un valor base, y otros entre los que están los valores objetivo para lo que se consideraría una adecuada calidad del suelo. El valor máximo representa el máximo potencial que puede ser obtenido por un indicador para un suelo dado y el valor de base representa el potencial mínimo aceptable para éste (Karlen et al., 1994).

Para suelos en su condición original, los valores de referencia representan la calidad inherente

de un suelo, definido por los factores y procesos formadores. Los suelos que son intensamente manejados, con importante incorporación de insumos externos, pueden estar funcionando a su capacidad máxima. Por otra parte, las actividades humanas de rehabilitación de suelos pueden aumentar la capacidad de éstos, más allá de las limitaciones intrínsecas propias. Por lo tanto, los valores de referencia iniciales deben ser ajustados para reflejar los impactos y requerimientos de producción. Es por ésto que se propone establecer los valores umbrales y de referencia de los indicadores que conforman el CMI, para cada suelo y uso particular.

### Observatorios Ambientales

El INTA, desde el Programa Nacional Ecorregiones y articulado con diferentes instituciones del país, elaboró un sistema de Observatorios ambientales a través de dos proyectos referidos a "Indicadores de calidad agroambiental" para el monitoreo de los sistemas productivos más relevantes de cada Ecorregión, promoviendo una mirada más amplia e integral abarcando la totalidad de los recursos naturales, que continua en la Cartera 2013-2019 de proyectos INTA desde el Programa Nacional Suelos y en los "Observatorios de Sustentabilidad Rural" del Programa Nacional Recursos Naturales, Gestión Ambiental y Ecorregiones (PNNAT).

En la Ecorregión Pampeana, se están analizando los efectos de la simplificación de las rotaciones en tierras agrícolas, en detrimento de las pasturas, con tendencias al monocultivo de soja y además, la incorporación a la agricultura de nuevas tierras ubicadas en ambientes marginales. En la Ecorregión Mesopotámica se trabaja con sistemas arroceros a partir del riego con agua de diferentes orígenes, forestales de pino y eucalipto, yerba mate y la incorporación de tierras a la agricultura a partir del desmonte. En la Ecorregión Chaqueña, los sistemas evaluados son los agrícolas y ganaderos,

poniendo énfasis en la conversión de sistemas naturales a cultivados. En la Ecorregión Norandina los sistemas intensivos tabacaleros y frutales. En Cuyo, los análisis están centrados en los efectos del reemplazo de pastizales naturales por cultivos agrícolas, especialmente monocultivos de soja con un gran impacto ambiental. Finalmente en la Ecorregión Patagónica, los sistemas frutales de pepita de los Valles irrigados y los sistemas de ganadería extensiva sobre pastizales naturales de la Patagonia extraandina.

La identificación y valoración de indicadores que representen la dinámica que adquieren los suelos con distintos usos y manejos, es una de las formas de contribuir al conocimiento de cómo son afectadas las funciones de los suelos en producción. Así se podrá visualizar el origen de los procesos de degradación y a partir de ésto, delinear pautas de manejo que tiendan a revertirlos. De esta forma, se podrá contar con elementos técnico-científicos para la generación de alertas tempranas de procesos de degradación de los recursos naturales, a partir de las cuales se instrumenten políticas adecuadas de planificación del uso de la tierra.

### Bibliografía

- CARTER, M.R. 1990. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies. *Can. J. Soil Sci.* 70: 425-433.
- CARTER, M.R.; GREGORICH, E.G.; ANDERSON, D.W.; DORAN, J.W.; JANZEN, H.H. y PIERCE, F.J. 1997. Concepts of soil quality and their significance. Chapter 1. En (Gregorich, E. G.; Carter, M. R., eds.) *Soil Quality For Crop Production and Ecosystem Health*. Elsevier. 1997. 1-19.
- DORAN, J.W. y SAFLEY, M. 1997. Defining and assessing soil health and sustainable productivity. In *Biological indicators of soil health*. C. Pankhurst, B.M. Doube and V.V.S.R. Gupta (Eds.). CAB International. pp. 1-28.
- GREGORICH, E.G.; CARTER, D.; ANGERS, C. y ELLERT, B. 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Can. J. Soil Sci.* 74: 367-385.
- GREGORICH, L. J. y ACTON, D.F. 1995. Understanding soil health. In *The health of our soils-towards sustainable agriculture in Canada*. (D.F. Acton and L. J. Gregorich, eds.). Centre for Land and Biological Resources Research, Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa, Ont., Canada. 5-10.
- JENNY, H. 1980. *The soil resource*. Ecological Studies, Vol. 37. Springer-Verlag. New York, USA. 377 pp.
- KARLEN, D.L.; VARVEL, G.E.; BULLOCK D.G. y CRUSE, R.M. 1994. Crop rotations for the 21st Century. *Advances in Agronomy* 53: 1-39.
- KOOLEN, A.J. 1987. Deformation and compaction of elemental soil volumes and effects on mechanical soil properties. *Soil Till. Res.* 10: 5-19.
- LAL, R. 1997. Degradation and resilience of soils. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 352: 997-1010.
- LARSON, W. y PIERCE, F. 1994. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. *Soil Science Society of America* 67: 37-51. SAGyP y CFI. 1995. *El deterioro de las Tierras en la República Argentina*. Alerta Amarillo. 287 pp.
- SEYBOLD, C.A.; MAUSBACH, M.J.; KARLEN, D.L. y ROGERS, H.H. 1998. Quantification of soil quality. In *Soil processes and the carbon cycle*. R. Lal, J. Kimble, R. Follett and B. Stewart (Eds.). CRC Press, Boca Ratón, Fl. pp. 387-404.
- VIGLIZZO, E.F. 1996. La sustentabilidad en agricultura. ¿Cómo evaluar y medir? *RIA* 26 (1): 1-15. INTA, Argentina.





# Los indicadores de calidad de suelo según referentes calificados

Ana María Lupi<sup>1</sup> y Natalia Andrea Mórtola<sup>1</sup>

La identificación de indicadores de calidad de suelo a distintas escalas resulta de particular interés en diferentes ámbitos de trabajo, dado que:

- proporcionan información básica a generadores o ejecutores de políticas agrícolas y al público en general, señalando los cambios (intensidad y dirección) de las condiciones del agroecosistema y del ambiente en general;
- facilitan la comprensión de las relaciones entre las causas y los efectos de la aplicación de distintas prácticas de manejo sobre la producción y el ambiente;
- contribuyen a la evaluación y al seguimiento de la eficacia de las prácticas de manejo y de las políticas aplicadas.

En el año 2008, en el marco del Programa Na-

cional Ecorregiones y del Proyecto Nacional Indicadores de Calidad de Suelos, se realizó una encuesta a referentes calificados para conocer el estado de desarrollo del tema indicadores de calidad de suelo a nivel nacional. La encuesta fue efectuada a más de 250 referentes que se desempeñan en el ámbito de la investigación, la docencia, la extensión y la actividad privada. Resultó un método válido, rápido, económico y fiable para el relevamiento de la información.

La encuesta se conformó con preguntas orientadas a recabar información sobre diferentes aspectos de los indicadores de calidad de suelo, sin discriminar el uso, el manejo y el tipo de suelo.

Estas fueron:

- ¿Qué parámetros simples y/o índices compuestos por dos o más parámetros considera útiles

---

1. Instituto de Suelos INTA Castelar, De Los Reseros y N Repetto s/n (1686) Hurlingham, Bs. As., Argentina.

como Indicadores o Índices de Calidad?

- ¿Qué utilidad obtuvo con el indicador en diferentes áreas de trabajo (investigación, extensión, asesoramiento)?
- ¿Cuál es su aplicabilidad en las distintas escalas espaciales de trabajo (lote, campo y región)?
- ¿Cuál sería el intervalo de tiempo requerido entre evaluaciones sucesivas, para que éstas reflejen los cambios generados por el manejo y no por otros factores?
- ¿Qué grado de correlación existe entre los indicadores o índices con la producción, degradación y contaminación?
- Calificar aspectos relacionados a las metodologías de relevamiento a campo y análisis para trabajar con los indicadores e índices
- ¿Qué nivel de conocimiento se dispone en nuestro país sobre los indicadores e índices y en consecuencia aprueba su uso?
- ¿Cuál es el nivel de consenso con respecto a criterios de interpretación para formular diagnósticos?

A partir de 102 encuestas provenientes de profesionales pertenecientes al INTA, Universidades Nacionales, Centros de Investigación y profesionales independientes, surgió una nómina de 209 indicadores correspondientes a diferentes áreas del conocimiento. Dado el elevado número de indicadores se realizó una preselección a efectos de alcanzar un número mínimo representativo. Para ésto se tomaron aquellos indicadores propuestos por el 10% o más de los encuestados. Esta preselección arrojó un conjunto de 20 indicadores de suelos.

En este documento se presenta una síntesis de los resultados obtenidos de la encuesta. Mayor detalle sobre el modelo de la encuesta y los resultados obtenidos pueden obtenerse en el sitio <http://inta.gob.ar/documentos/indi->

*adores-de-calida-ambiental-para-el-manejo-sustentable-de-los-agrosistemas/at\_multi\_download/file?name=Doc\_Base\_Trabajo\_Taller\_ICAs.pdf*

### Los Indicadores de suelos a nivel nacional

La síntesis nacional dio como producto la siguiente nómina de indicadores: carbono orgánico total (COT), densidad aparente (DAP), estabilidad de agregados (EA), pH agua, carbono orgánico particulado (COP), conductividad hidráulica (CH), resistencia mecánica a la penetración (RMP), conductividad eléctrica (CE), fósforo disponible (Pd), nitrógeno total (Nt), respiración microbiana (Res), agua útil (AU), porosidad específica de aireación = macroporosidad = capacidad de aire (PEA-CA), índice de productividad (IP), textura (tex), bases de cambio (bases), eficiencia uso de agua (EUA), capacidad intercambio cationes (CIC), carbono biomasa microbiana (CBM) y cantidad o stock de COT (CCOT).

Estos indicadores fueron calificados como útiles a muy útiles para ser empleados en investigación, extensión y asesoramiento. A su vez, los indicadores COT, DAP, EA, pH, COP, CH y RMP fueron propuestos por más del 50% de los encuestados. En la Tabla 1 se presentan las recomendaciones ofrecidas por los encuestados en cuanto a la periodicidad de evaluación de los indicadores.

	Indicador/Índice	INTERVALO DE MUESTREO % de opinión del total de encuestados			
		≤1 Año	2-4 Años	5-7 Años	> 8 Años
1	COT	7	54	18	21
2	DAP	20	61	14	4
3	EA	10	52	37	2
4	pH agua	11	35	35	20
5	COP	11	72	15	2
6	CH -INFILTRACION BASICA	31	55	14	0
7	RMP	23	52	26	0
8	CE	24	38	0	38
9	Pd	19	53	22	6
10	N t	19	62	4	15
11	RES	86	14	0	0
12	AU-CAP. DE ALMACENAJE	43	29	14	14
13	CAPACIDAD DE AIRE - PEA	24	38	0	38
14	IP	17	17	33	33
15	tex	0	0	0	100
16	BASES	0	0	75	25
17	EUA	43	43	14	0
18	CIC	0	33	22	44
19	CBM	75	13	13	0
20	CCOT	0	67	33	0

**Tabla 1:** Intervalo de tiempo requerido entre evaluaciones sucesivas, según indicador, recomendado por los encuestados.

### Los indicadores de suelos por ecorregión

Debido a la heterogeneidad de situaciones relevadas en cuanto a ambientes edafoclimáticos y sistemas productivos, las encuestas fueron agrupadas por ecorregión tratando de dar respuesta a los siguientes aspectos:

- utilidad de los indicadores,
- metodología de relevamiento a campo y análisis de laboratorio,
- información disponible y recomendación de uso y,
- disponibilidad de criterios para la interpretación y formulación del diagnóstico.

Es importante destacar que el número de encuestados que respondió a la encuesta resultó muy variable según las ecorregiones. Para las ecorregiones con mayor número de indicadores (Pampeana y Chaqueña) algunos tienen un peso relativo importante debido al gran número de opiniones. En las ecorregiones Mesopotámica y Norandina, el número de opiniones fue intermedio y para Cuyo y Patagónica el número de opiniones obtenidas fue muy reducido (entre 1 y 3). No obstante las diferencias halladas, se destacan

8 indicadores comunes para todas las ecorregiones (CE, COT, Nt, pH agua, DAP, EA, RMP y Res) que fueron considerados buenos o muy buenos en cada una de las ecorregiones del país con respecto a su utilidad. En la Tabla 2 se muestran, para cada ecorregión, los indicadores considerados útiles a muy útiles.

**Tabla 2:** Tipo de indicadores considerados como útiles a muy útiles para cada ecorregión.

INDICADORES		Pampeana	Mesopotámica	Chaqueña	Patagónica	Cuyo	Norandina
Químicos	Bases	X (6)		X (3)			X (6)
	CE	X (19)	X (5)	X (15)	X (1)	X (2)	X (7)
	CIC	X (11)		X (5)			
	COP	X (32)	X (9)	X (26)		X (2)	X (8)
	COT	X (57)	X (7)	X (36)	X (3)	X (2)	X (7)
	Nt	X (12)	X (5)	X (12)	X (2)	X (3)	X (7)
	Pd	X (23)		X (16)		X (1)	X (7)
	pH agua	X (41)	X (6)	X (27)	X (2)	X (1)	X (6)
	Stock C	X (5)	X (5)	X (1)	X (1)		
Físicos	Textura	X (13)		X (4)			
	AU	X (10)	X (5)	X (3)			
	CH	X (37)	X (10)	X (19)	X (1)	X (1)	
	DAP	X (37)	X (10)	X (32)	X (3)	X (1)	X (8)
	EA	X (38)	X (11)	X (29)	X (1)	X (1)	X (8)
	EUA	X (12)		X (4)	X (1)	X (2)	
Biológicos	PEA CA	X (10)	X (6)	X (7)			
	RMP	X (27)	X (6)	X (22)	X (1)	X (1)	X (7)
	CBM	X (11)		X (3)			
Índices	Res	X (14)	X (7)	X (15)	X (1)	X (1)	X (6)
	IP	X (13)		X (5)		X (1)	

El valor entre paréntesis representa el número de encuestados que opinaron que la variable es útil como indicador. Carbono orgánico total (COT), densidad aparente (DAP), estabilidad de agregados (ES), pH agua, carbono orgánico particulado (COP), conductividad hidráulica (CH), resistencia mecánica a la penetración (RMP), conductividad eléctrica (CE), fósforo disponible (Pd), nitrógeno total (Nt), respiración (Res), agua útil (AU), porosidad específica de aireación = macroporosidad = capacidad de aire (PEA-CA), índice de productividad (IP), textura (tex), bases de cambio (bases), eficiencia uso de agua (EUA), capacidad intercambio cationes (CIC), carbono biomasa microbiana (CBM) y cantidad de COT (CCOT).

Según se observa en la Tabla 2, las 20 variables preseleccionadas a nivel nacional resultaron útiles como indicadores según la opinión de los encuestados para las ecorregiones Pampeana y Chaqueña. En tanto que, para las otras ecorregiones, el número de indicadores propuestos fue menor. Es de destacar que en las ecorregiones Pampeana y Mesopotámica, el 100% de los encuestados consideró como buenos o muy buenos a estos indicadores, denotando un consenso generalizado sobre la utilidad de los mismos.

buenos, dado la simplicidad del método de muestreo, el grado de laboriosidad requerido, la cantidad de muestras para ser representativo, el requerimiento de equipos especiales, la disponibilidad de laboratorios que lo determinen, el costo de muestreos de campo, costo de análisis de laboratorio, interpretación de resultado y nivel de conocimiento.

Respecto a los indicadores CE, COT, pH agua y EA, éstos fueron considerados buenos o muy

La opinión recogida por ecorregión, respecto a cuáles son los indicadores e índices que a partir del conocimiento disponible en nuestro país permiten la aprobación de su uso, se presenta a continuación:

Ecorregión Mesopotámica	Ecorregión Norandina	Ecorregión Pampeana
— Densidad aparente	— Estabilidad de agregados	— Carbono orgánico total
— Estabilidad de agregados	— Carbono orgánico total	— Densidad aparente
— Conductividad hidráulica	— Nitrógeno total	— Porosidad esp. de aireación
— Carbono orgánico particulado	— Fósforo disponible	— Conductividad eléctrica
— Respiración microbiana	— Densidad aparente	— Conductividad hidráulica
— Carbono orgánico total	— Conductividad hidráulica	— Textura
— pH agua	— Carbono orgánico particulado	— Capacidad intercambio catiónico
— Resistencia mecánica penetración	— Resistencia mecánica penetración	— Agua útil
— Agua útil		— Bases de intercambio
— Porosidad esp. de aireación		— Eficiencia de uso del agua
— Conductividad eléctrica		— Índice de productividad
— Nitrógeno total		
— Cantidad de carbono orgánico		
Ecorregión Chaqueña	Ecorregión Cuyo	Ecorregión Patagónica
— Carbono orgánico total	— Conductividad eléctrica	— Densidad aparente
— Fósforo disponible	— Fósforo disponible	— Carbono orgánico total
— pH agua	— pH	— pH
— Nitrógeno total	— Respiración microbiana	— Conductividad eléctrica
— Conductividad eléctrica		— Conductividad hidráulica
— Resistencia mecánica penetración		— Carbono orgánico particulado
— Carbono biomasa microbiana		— Nitrógeno total
— Agua útil		— Respiración microbiana
— Índice de productividad		— Resistencia mecánica penetración

Para la ecorregión Pampeana, de los 20 indicadores considerados útiles, 11 cuentan con suficiente conocimiento para aprobación de uso y sólo 2 (CE, IP) cuentan con criterios para realizar diagnósticos. En tanto que en la ecorregión Chaqueña, de los 20 indicadores seleccionados, 9 presentan suficiente conocimiento para su uso y sólo 5 (Pd, Nt, CE, AU e IP) cuentan con criterios de interpretación. En la ecorregión Mesopotámica existen 13 indicadores útiles con suficiente conocimiento, de los cuales 5 (EA, CH, COP, DAP y pH agua) cuentan con criterios de interpretación para formular diagnóstico. Por su parte, la ecorregión Cuyo propuso 13 indicadores, de los cuales 4 presentan suficiente conocimiento y solo 2 (CE y textura) disponen de criterios de interpretación. Las ecorregiones Patagónica y Norandina presentaron 11 indicadores útiles cada una. La primera cuenta con 9 indicadores con suficiente conocimiento y 1 sólo indicador (CH) con criterios de interpretación. La segunda presenta 8 indicadores con suficiente conocimiento, de los cuales 6 (EA, COT, Pd, CH, Nt y RMP) disponen de criterios de interpretación.

### Consideraciones finales

Los indicadores que cumplieron con todos los aspectos planteados (utilidad, facilidad metodológica de relevamiento a campo y análisis de laboratorio), suficiencia de información, recomendación de uso y disponibilidad de criterios para la interpretación y el diagnóstico fueron:

- CE e IP (Ecorregión Pampeana).
- EA, CH, COP, DAP y pH agua (Ecorregión Mesopotámica).
- Pd, Nt y CE (Ecorregión Chaqueña).
- CH (Ecorregión Patagónica).
- CE (Ecorregión de Cuyo)
- EA, COT, Pd, CH y RMP (Ecorregión Norandina).

Los indicadores CE, COT, DAP, EA, Nt, pH agua,

Res y RMP resultaron buenos o muy buenos con respecto a su utilidad para todas las ecorregiones. Respecto a la facilidad metodológica de relevamiento a campo y análisis de laboratorio, los indicadores CE, COT, pH agua y EA fueron considerados buenos o muy buenos para todas las ecorregiones.

Los indicadores CE y COT presentaron suficiente información y aprobación de uso en 5 ecorregiones. En tanto que, CH, DAP, Nt, pH y RMP en 4 de las 6 ecorregiones del país.

En todas las ecorregiones existe bajo consenso en cuanto a los criterios de interpretación para formular diagnósticos.

Debe considerarse el estudio de indicadores de relevancia regional en ecorregiones o subregiones específicas relacionadas a características o problemáticas intrínsecas de cada zona que no fueron seleccionados a nivel nacional en esta encuesta.

Asimismo, para la selección definitiva de indicadores que integren el CMI, debe considerarse el suelo y el sistema productivo en particular, con un sólido soporte estadístico que determine la sensibilidad de los indicadores.

## Indicadores de calidad de suelos en Argentina. Recopilación de una década de investigaciones

Natalia Mórtola<sup>1</sup>; Ana Lupi<sup>1</sup>; Romina Romaniuk<sup>1</sup>;  
Gabriela Albarracín<sup>2</sup> & Gabriela Civeira<sup>1</sup>

### Introducción

En nuestro país existe actualmente considerable información sobre indicadores de calidad de suelos generada desde hace varios años por diversos grupos de trabajo. Este hecho se ve reflejado en la importancia que fue adquiriendo la temática, no solo en el sector de la investigación y el desarrollo, sino también a partir de la demanda creciente por diferentes procesos de certificación y la aplicación de leyes referentes al manejo sustentable de los recursos.

A excepción de algunas zonas productivas, aún no hay consenso sobre cuáles son los indicadores que mejor predicen los cambios en la calidad del suelo, así como tampoco sobre aspectos tales como: metodología de relevamiento a campo y análisis de laboratorio, información y disponibili-

dad de criterios de interpretación para formular diagnósticos, valores de referencia, entre otros. Este hecho es consecuencia de la gran variabilidad edafo-ambiental y productiva de nuestro país que requiere abordar el tema teniendo en cuenta aspectos específicos relacionados a los ambientes en particular y a los sistemas productivos desarrollados en cada zona.

A efectos de contar con un diagnóstico sobre el estado de avance en el tema indicadores de suelos, el objetivo de este trabajo fue relevar la información generada durante la década 2000-2010 sobre indicadores de calidad de suelo en cada ecorregión e identificar los vacíos de información existentes.

1. Instituto de Suelos INTA Castelar, 1686, Hurlingham, Buenos Aires, Argentina.

2. Centro de Investigación de Recursos Naturales (CIRN), 1686 Hurlingham, Buenos Aires, Argentina.

## Procedimiento de búsqueda de la información

Se seleccionaron y sintetizaron las contribuciones científicas realizadas en Argentina en el ámbito de la ciencia del suelo para el periodo 2000-2010. Se relevaron trabajos publicados en los XVII, XVI-II, XIX, XX, XXI y XXII Congresos Argentinos de la Ciencia del Suelo, las revistas de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo, el IPNI y otras revistas internacionales. También se incluyó información publicada en diferentes reuniones y seminarios sobre indicadores, realizados hasta el año 2010 inclusive.

El criterio de selección de trabajos se basó en la identificación de variables que se hallan en:

- Contribuciones que evalúen el estudio de variables físicas, químicas y/o biológicas o índices de suelo en sistemas de manejo, sistemas de labranzas, diferentes usos, cultivos y rotaciones.
- Contribuciones que traten específicamente el tema indicadores de suelos.

Se excluyeron trabajos donde no se indicaba claramente la localización geográfica del experimento o del sitio de muestreo. Solamente se tomaron los trabajos donde el tipo de suelo se informaba a nivel de gran grupo.

La información fue organizada por ecorregiones (Pampeana, Chaqueña, Mesopotamia, Norandina y Cuyo), por tipo de suelo (a nivel de gran grupo) y por clase de variable (química, física o biológica). La ecorregión Patagonia no fue incluida dentro de la revisión debido a que en la misma se utiliza una metodología específica para el relevamiento de indicadores.

### Metodología de clasificación de la información

Con la información obtenida se establecieron dos tipos de análisis que permitan la identificación de las variables en cada ecorregión y en cada tipo de suelo:

**1) Según diferencias significativas:** se tomaron las variables relevadas que presentaron diferencias significativas en sus análisis estadísticos, con el objetivo de visualizar la sensibilidad de las mismas ante las distintas situaciones estudiadas.

**2) Según indicadores propuestos:** se tomaron las variables que fueron propuestas como indicadores propiamente dichos por los autores de las contribuciones respectivas.

Para ambos análisis las variables fueron agrupadas de acuerdo a su tipo (química, física o biológica) y se las ordenó por tipo de suelo.

Debido al gran número de variables con diferencias significativas y propuestas en los trabajos analizados, se decidió priorizar sólo aquellas que presentaron la mayor cantidad de casos de estudio, es decir las que resultaron más sensibles para cada tipo de suelo. Las cuales son las más adecuadas para diagnosticar y monitorear procesos de degradación de este recurso y que podrían conformar el conjunto mínimo de indicadores (CMI). Para establecer el CMI, se tomaron para los dos tipos de análisis las 5 variables químicas, las 5 físicas y las 5 biológicas que presentaron mayor número de casos de estudio en los trabajos relevados. Obteniendo de esta manera dos conjuntos de 15 variables como máximo para cada análisis. Posteriormente se volcó la información en tablas descriptas por ecorregión, donde se agruparon para cada suelo las variables químicas, físicas y biológicas de ambos tipos de análisis. De este modo, cada tabla contiene para cada tipo de suelo de cada ecorregión los tres grupos de variables (químicas, físicas y biológicas) más sensibles con sus respectivos números de casos de estudio donde presentaron, ya sea diferencias significativas o donde fueron seleccionados como indicadores propiamente dichos.

## Resultados

Los resultados hallados se presentan en tablas por ecorregión donde se muestran los conjuntos de variables químicas, físicas y biológicas más sensibles en los distintos suelos evaluados. De un primer análisis surge que los conjuntos de variables fueron diferentes para los distintos suelos estudiados en las diferentes ecorregiones del país. A continuación se presentan las observaciones realizadas para cada ecorregión:

### Ecorregión Pampeana (Tabla 1)

Las variables más sensibles fueron, dentro de las químicas: el COS, el Pasim y el Ntotal; y dentro de las físicas: la estabilidad de agregados y la DAP. En relación a las variables biológicas se observa que no todos los suelos presentan variables de este tipo, siendo el N mineralizable y la respiración microbiana las que se encuentran en mayor cantidad de suelos.

Por su parte, los suelos Calciustol, Natralbol, Natracualf, Ocracualf, Paleustol, Udipsament, Udortent y Ustipsament presentaron muy pocas variables. Este hecho se debe a que otras variables estudiadas no fueron sensibles y a que son suelos poco evaluados por ser poco productivos y difíciles de mejorar. Para suelos Peludertes aparece la variable sodio (Naint) dentro del conjunto mínimo, esto se debe a que en dichos suelos se evaluó un sistema productivo con riego, y esta variable se relaciona con la calidad del agua utilizada. En el suelo Calciustol llama la atención la variable Zinc dentro del conjunto mínimo, esto es consecuencia de que en el trabajo del cual surge el dato se evaluaron tratamientos para los cuales fue importante el estudio de esta variable.

### Ecorregión Chaqueña (Tabla 2)

En esta ecorregión las distintas variables referidas al carbono (COS, COP y Coff) muestran considerable importancia. Para la mayoría de los suelos evaluados (10 de 12 suelos) no se presentan va-

riables biológicas en el conjunto mínimo. El Ntotal se encuentra presente en el 50% de los suelos evaluados de esta ecorregión. Las variables físicas estabilidad de agregados y densidad aparente (DAP) están presentes en gran parte de estos suelos. Los suelos con menor número de variables en el conjunto mínimo y por lo tanto considerados menos estudiados son: Hapludalf, Natrudalf, Natrustol y Ustortent. Para el suelo Torriortent se observa dentro del conjunto de las variables físicas el contenido de humedad, debido a la importancia de esta variable en este tipo de suelos con régimen de humedad de suelo árido.

### Ecorregión Mesopotamia (Tabla 3)

Para esta ecorregión, entre las variables químicas las más seleccionadas independientemente del tipo de suelo, fueron el COS y el Ntotal. Dentro del grupo de las variables físicas la estabilidad de agregados, seguida de la DAP fueron variables sensibles en mayor número de suelos. El CBM y el N mineralizable fueron las variables biológicas más sensibles.

El Kandihumult es el único suelo en el que, dentro de las variables químicas, no quedó seleccionada ninguna relacionada al ciclo del carbono, siendo el P orgánico la variable química que mejor caracterizó a estos suelos.

### Ecorregión Norandina (Tabla 4)

El Ustocrepte es el único suelo donde quedaron seleccionadas variables químicas, físicas y biológicas. Para los Haplustoles no hay variables biológicas dentro del CMI. Para los Torrifluventes solo quedó seleccionada una variable física, la estabilidad de agregados.

Dentro de las variables químicas el COS en primer lugar, y el N total y P asim en orden sucesivo fueron las más seleccionadas. Para el grupo de variables físicas, la estabilidad de agregados fue la más sensible y por lo tanto la más seleccionada.

**Tabla 1.** Variables químicas, físicas y biológicas seleccionadas para la ecorregión Pampeana.

PAMPEANA															
	Argjaquol	Argjudol	Calciustol	Hapluderte	Hapludol	Haplustol	Natraqualf	Natralbol	Ocracualf	Paleudol	Paleustol	Peludert	Udipsament	Udortent	Ustipsament
Variables Químicas		COS (43)			COS (21)	COS (18)						COS (2)			
		N total (12)		COS (5)	pH (7)	COP (10)				COS (1)	COS (2)	P asim (1)			
		COP (12)	COS (1)	N total (2)	N total (6)	N total (8)		COS (1)	COS (1)	N total (1)	N total (1)	pH (1)			COS (1)
		P asim (11)	P asim (1)	P asim (1)	P asim (6)	P asim (5)	COS (1)	P asim (1)	N total (1)	COP (1)	NP (1)	N org (1)			
	Sodio (Na) (1)	pH (10)	Zinc (1)	CIC (1)	COP (3)	PP (4)			pH (1)	P asim (1)	NP/Nt (1)	Sodio intercambio (Na int) (1)			
		CIC (5)		Norg (1)	Sat Bases (2)							Stock C (1)			
		Norg (4)													
Variables Físicas	Estabilidad Agregados (1)	Estabilidad Agregados (45)		Estabilidad Agregados (5)	Estabilidad Agregados (8)	Estabilidad Agregados (14)									
	Infiltración (1)	DAP (27)		Porosidad del Suelo (3)	DAP (8)	DAP (12)				DAP (3)		Estabilidad Agregados (3)			
	Distribución Tamaño Agregados (DTA) (1)	RMP (17)		Infiltración (1)	Infiltración (5)	RMP (14)		Estabilidad Agregados (2)	Estabilidad Agregados (1)	RMP (2)	Estabilidad Agregados (2)	Infiltración (1)		DAP (1)	Estabilidad Agregados (2)
	Cont. Grav y Volum. Humedad (1)	Infiltración (12)		DAP (1)	RMP (3)	Infiltración (4)				Estabilidad Agregados (1)	DAP (1)	Distribución Tamaño Agregados (DTA) (1)			Fracción Erodable (1)
	Distribución Tamaño Agregados en Horiz. A (1)	Porosidad del Suelo (9)		Índice K de percolación (Ks) (1)	Porosidad del Suelo (3)	Profundidad Cácareo (3)				DAP max (1)		DAP (1)			
			Masa Horiz. A (1)	Rugosidad Agregados (2)											
Variables Biológicas		Actividad Fosfatasa Ácida (9)				Respiración (1)									
		Deshidrogenasa (8)		N Mineralizable (1)	Densidad de Tectocephus sp (2)	(Oribatida+Mesosigmata)/(Protosigmata + Astigmata) (1)			N Mineralizable (1)	CBM plus (3)		N Mineralizable (1)	Respiración (1)		Respiración (1)
		N Mineralizable (7)		CBM (1)	(Oribatida + Meso stigmata)/(Protosigmata + Astigmata) (1)	Microflora Total (1)			CBM (1)	N Mineralizable (1)					
		Ureasa (7)			Tectocephus sp/ Oribatida (1)	Población de Hongos (1)									
		Respiración (6)													
		CBM (3)													

Entre paréntesis se indica el número de veces en que las variables presentaron diferencias significativas o que fueron seleccionadas como indicadores.

(\*) los significados de las abreviaturas se detallan al final del artículo

CHAQUEÑA						
	Argjudol	Argjustol	Durustalf	Durustol	Hapludalf	Hapludol
Variables Químicas	COS (2)	COS (4)	COS (1)			
	P asim (1)	COP (2)	COP (1)	P asim (1)	COS (1)	COS (1)
	pH (1)	Ntotal (2)	Coff (1)	Potasio (K)(1)	COP (1)	
		Coff (2)			Ntotal (1)	
Variables Físicas						
	Estabilidad Agregados (1)	Estabilidad Agregados (3)	Estabilidad Agregados (1)	Estabilidad Agregados (1)		Estabilidad Agregados (1)
	Profundidad Horizonte A (1)	DAP (2)	DAP (1)	DAP (1)		DAP (1)
Variables Biológicas						

**Tabla 2.** Variables químicas, físicas y biológicas seleccionadas para la ecorregión Chaqueña.

Haplustol	Natrudalf	Natrustol	Torriorent	Ustifluent	Ustortent
			COS (2)	COS (3)	COS (1)
COS (7)	COS (1)		Coff (2)	COP (1)	COP (1)
COP (5)	COP (1)		Ntotal (1)	Ntotal (1)	Ntotal (1)
P asim (2)	Ntotal (1)		P asim (1)	Coff (1)	Coff (1)
			CE (1)		
Estabilidad Agregados (6)					
DAP (4)		Estabilidad Agregados (1)	Estabilidad Agregados (2)		
Infiltración (2)			DAP (1)		
Conductividad Hidráulica Sat (Kh) (1)			Humedad Actual (1)		
Macroporosidad (1)					
Constante Degradación Celulosa (K) (1)			Respiración (2)		

Entre paréntesis se indica el número de veces en que las variables presentaron diferencias significativas o que fueron seleccionadas como indicadores.

**Tabla 3.** Variables químicas, físicas y biológicas seleccionadas para la ecorregión Mesopotamia.

MESOPOTAMIA									
	Argiacuol	Argiudol	Eutrodox	Kandihumult	Kandiudult	Ocracuall	Peludert	Rodudalf	Udifuvent
Variables Químicas	COS (4)								COS (1)
	Ntotal (3)	COS (1)		P orgánico total > 8 mm (1)	COS (1)	COS (1)	COS (2)		Ca (1)
	CE (3)	Ntotal (1)		P orgánico total < 0,1 mm (1)	pH (1)	Ntotal(1)	Ntotal (2)	COP (1)	K (1)
	pH (2)	pH (1)			P asim (1)		CIC (1)		Mg (1)
									Na (1)
Variables Físicas			Porosidad del Suelo (4)						
	Estabilidad Agregados (5)		Estabilidad Agregados (2)	DAP (1)			Estabilidad Agregados (2)		
	Indice K de Percolación (Hs) (5)	Estabilidad Agregados (1)	DAP (2)	RMP (1)		Estabilidad Agregados (1)	Indice K de Percolación (Ks) (2)		DAP (1)
	Masa Horiz A (1)	RMP (1)	Conductividad Hidráulica (1)	Infiltración (1)			Porosidad del Suelo (2)		
			Humedad Equivalente (HE) (1)				Masa Horiz A (1)		
			Infiltración (1)						
			RMP (1)						
Variables Biológicas		CBM (1)		Respiración (2)		CBM (1)	N mineralizable (1)		
		N mineralizable (1)		Presencia de Fijadores Libres de N (Azotobacter) (1)		N mineralizable (1)	NBM (1)		

Entre paréntesis se indica el número de veces en que las variables presentaron diferencias significativas o que fueron seleccionadas como indicadores.



**Tabla 4.** Variables químicas, físicas y biológicas seleccionadas para la ecorregión Norandina.

NORANDINA			
	Haplustol	Torrifluent	Ustocrepte
Variables Químicas	COS (2)		COS (6)
	P asim (2)		ReMO 5/20 (4)
	Ntotal (1)		Ntotal (2)
Variables Físicas	Estabilidad Agregados (3)		Estabilidad Agregados (3)
	Conductividad Hidráulica (1)		%Humedad (3)
	Infiltración (1)		Capacidad Hídrica de Saturación (2)
	Peso Específico Aparente (PEA) (1)	Estabilidad Agregados (2)	RMP (2)
			Cobertura (2)
Variables Biológicas			Erosión (1)
			Tubulaciones Biológicas (2)
			Respiración (2)
			CBM (1)
			Microflora Fúngica (1)

Entre paréntesis se indica el número de veces en que las variables presentaron diferencias significativas o que fueron seleccionadas como indicadores.

**Tabla 5.** Variables químicas seleccionadas para la ecorregión Cuyo.

CUYO			
	Entisol	Haplustol	Ustortent
Variables Químicas	K (1)		
	Mg (1)		
	Ca+Mg sol (1)		
	PSI (1)	COS (2)	COS (1)
	Na intercambiable (1)		
	RAS (1)		
	pH (1)		

Entre paréntesis se indica el número de veces en que las variables presentaron diferencias significativas o que fueron seleccionadas como indicadores.

### Consideraciones Finales

A partir del análisis de las tablas para las diferentes ecorregiones consideradas, puede observarse una tendencia general a no incluir o minimizar a los indicadores biológicos respecto a los físicos y químicos, posiblemente debido a que los parámetros biológicos no tienen una implicancia directa sobre los rendimientos de los cultivos, como sí lo tienen, por ejemplo, los nutrientes disponibles. A pesar de ello, es ampliamente sabido que los microorganismos tienen un papel fundamental sobre la dinámica y funcionamiento de los suelos, y por tanto deberían tener más participación dentro de los indicadores a considerar a la hora de evaluar la calidad de los suelos. Contrariamente a lo que ocurre con los indicadores biológicos, las variables químicas, mayormente asociadas a la disponibilidad de nutrientes, poseen una mayor relación con el rendimiento de los cultivos, y por tanto suelen incluirse dentro del conjunto de indicadores. En el caso de los indicadores físicos, al ser en gran parte mediciones que pueden realizarse a campo y por tanto ser de bajo costo, suelen ser incluidos en el grupo de indicadores a evaluar. Otro motivo de la mayor participación de variables físicas y químicas respecto a las biológicas es que las primeras suelen ser mediciones de rutina, estandarizadas y que pueden ser medidas en laboratorios de análisis de suelo, mientras que las biológicas no han sido aún, en su mayoría, incluidas dentro de los mismos. Es lógico que exista una tendencia a priorizar los indicadores que inciden directamente en el rendimiento, o a aquellos que sean de fácil medición, pero no debe perderse de vista que el suelo es un todo, donde lo físico, lo químico y lo biológico interactúan para dar lugar al suelo tal cual lo vemos. Si deterioramos el aspecto biológico esto se va a ver reflejado en lo químico en el corto plazo, y en lo físico en el mediano o largo plazo.

Dentro de las variables químicas, es claro que el COS juega un rol central y ha sido en todas las

regiones el indicador más seleccionado, ya sea en su contenido total o en alguna de sus fracciones lábiles, como el COP. No debe perderse de vista que es una variable sumamente valiosa, ya que es central en los procesos químicos, físicos y biológicos. Sin embargo, el COS presenta distinta sensibilidad ante diferentes situaciones. Disminuye entre el 25 y el 50% cuando suelos naturales son convertidos a tierras de cultivo y es sensible cuando queremos diferenciar situaciones contrastantes de manejo en el largo o mediano plazo. Por su parte, el cambio de sistema de labranza de convencional a siembra directa no siempre provoca cambios en esta variable. En evaluaciones a corto plazo, el COS no siempre logra diferenciar situaciones de manejo. En estos casos, el COP puede ser un indicador más útil. Cuando suelos agrícolas son convertidos en pasturas y cuando se aplican rotaciones de cultivos, el COS y el COP pueden variar o no, constituyendo para estos casos una variable de mediana confiabilidad.

El Ntotal ha sido otra de las variables más seleccionada, sin embargo suele estar altamente correlacionado con el COS, no siendo en general necesaria la inclusión de ambas en el CMI.

Al considerar los indicadores físicos, la estabilidad de agregados toma un rol predominante dentro de los mismos. Parece ser la medición que reúne las condiciones necesarias para reflejar la degradación física de los suelos y para mostrar como los mismos son afectados según las prácticas de manejo. Sin embargo existen múltiples metodologías para su medición lo cual constituye una complicación al momento de interpretar y comparar los valores obtenidos para esta variable. Por lo tanto, se considera necesario la discusión y consenso para la unificación de la metodología. El aspecto físico es muchas veces definitorio en el desarrollo de los cultivos, por lo que es esencial que al menos un indicador de este tipo conforme el CMI a evaluar. No obstante debe tenerse en

cuenta que el cambio en las variables físicas suele darse en general luego de al menos dos años de un determinado manejo. Es por ello, que en estudios de corto plazo puede no mostrar diferencias significativas.

Dentro de las variables biológicas, aunque escasas, el CBM y la respiración fueron las más utilizadas para caracterizar la dinámica de la comunidad microbiana. El CBM representa el tamaño de la comunidad microbiana y puede darnos una idea del efecto de las prácticas de manejo sobre la población microbiana. La respiración, en cambio, nos habla de la actividad de los microorganismos en los suelos. No siempre una mayor respiración está asociada a mayor tamaño de la misma (CBM). Puede suceder que una comunidad microbiana bajo estrés este respirando mucho por unidad de biomasa y eso nos da una idea de manejos poco acertados. Otra de las variables biológicas seleccionadas en muchos casos fue el nitrógeno mineralizable, el cual caracteriza la actividad de los organismos que participan en el ciclo del nitrógeno, nutriente asociado a los rendimientos de los cultivos.

Lo que debe ser remarcado, es que el CMI debería estar integrado por al menos un indicador de cada tipo, físico, químico y biológico, siempre y cuando el objetivo sea la sustentabilidad de los sistemas, y considerando que este término implica la continua mejora de la productividad sin perder de vista la salud del recurso suelo.

La ecorregión más estudiada fue la Pampeana, en tanto que la que presentó menor información fue la ecorregión Cuyo, presentando las demás ecorregiones una presión de estudio media. En la ecorregión Pampeana los suelos más estudiados fueron Argiudoles, Hapludoles y Haplustoles; en ecorregión Chaqueña Argiustoles y Haplustoles; en Mesopotamia Argiacuoles, Eutrodoxes y Peludertes; en tanto que, en Norandina los más estudiados son los Ustrocreptes.

#### Abreviaturas:

**Ca:** calcio, **Ca+Mg Sol:** calcio + magnesio solubles, **CBM:** carbono biomasa microbiana, **CE:** conductividad eléctrica, **CIC:** capacidad intercambio catiónica, **Coff:** carbono orgánico fracción fina, **Cond. Hidr. Sat. (Kh):** conductividad hidráulica saturada, **Cont. Grav. y Volum. Humedad:** contenido gravimétrico y volumétrico de humedad, **COP:** carbono orgánico particulado, **COS:** carbono orgánico del suelo, **DAP:** densidad aparente, **K:** potasio, **Masa Horiz. A:** masa horizonte **A**, **Mg:** magnesio, **N mineralizable:** nitrógeno mineralizable, **Na:** sodio, **NBM:** nitrógeno biomasa microbiana, **Norg:** nitrógeno orgánico, **NP/Nt:** relación nitrógeno particulado y nitrógeno total, **NP:** nitrógeno particulado, **Ntotal:** nitrógeno total, **P asim:** fósforo asimilable, **P:** fósforo, **PP:** fósforo particulado, **PSI:** porcentaje sodio intercambiable, **RAS:** relación absorción de sodio, **REMO 5/20:** (materia orgánica (MO) 0-5 cm - MO 0-20 cm)/(MO 0-20 cm) x 100, **RMP:** resistencia mecánica a la penetración, **Sat Bases:** saturación de bases.

#### Bibliografía

Aciar, LM; R Osinaga; JL Arzeno; DC Sánchez & F Ledesma. 2006. Infiltración evaluada con infiltrómetro de doble anillo, como indicador de calidad de suelo. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta, Argentina.

Aciar, LM; JL Arzeno & R Osinaga. 2008. Integración cuantitativa de resultados utilizando indicadores de calidad de suelo y de productividad en distintos sistemas de labranzas. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Agostini, MA; GA Studdert & GF Domínguez. 2010. Efectos de diferentes sistemas de labranza sobre algunas propiedades físicas en un suelo del sudeste bonaerense. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fe, Argentina.

Agostini, MA; GA Studdert & GF Domínguez. 2010. Cambios en algunas propiedades físicas de un suelo del sudeste bonaerense asociados a distintos sistemas de cultivo. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fé, Argentina.

Albanesi, A; A Anriquez; D Silva; F Ginés Polo & JA Domínguez Nuñez. 2010. Efecto del rolado en la mineralización de C en el suelo. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa

Fe, Argentina.

Alderete Salas, S & M Puricelli. 2008. Valoración del impacto sobre el recurso suelo, por efecto de las prácticas de manejo en el cultivo del olivo en el valle central de Catamarca, República Argentina. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Álvarez, C; C Scianca; M Barraco & M Díaz-Zorita. 2008. Impacto de diferentes secuencias de cultivos en siembra directa sobre propiedades edáficas en Hapludoles de la pampa arenosa. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Álvarez, C; F Frank; L Goicochea; E Noellemeyer & A Quiroga. 2004. Evolución de parámetros físicos en un Haplustol éntico bajo distintos usos del suelo en la región Semiárida Pampera. Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Álvarez, C; M Barraco; M Díaz-Zorita; C Pecorari & M Zaniboni. 2004. Manejo de cultivos de cobertura en rotaciones con base soja en el noroeste bonaerense. Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Alvarez, CR; FH Gutiérrez Boem; MA Taboada; P Prystupa & JF Ocampo. 2004. Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo bajo distintos manejos en el norte de Buenos Aires. Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Alvarez, CR; A Bono; MA Taboada; FH Gutierrez Boem; PL Fernández & P Prystupa. 2006. Distintos manejo del suelo en la pampa ondulada: Efectos sobre las propiedades físicas. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta, Argentina.

Alvarez, MF; LF Montti; ML Osterrieth & JL del Río. 2006. Rugosidad de agregados en Argiudoles típicos del sudeste bonaerense con distintos usos de suelo. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta, Argentina.

Alvarez, F; ML Osterrieth; VB Laborde & LF Montti. 2008. Estabilidad, morfología y rugosidad de agregados de argiudoles típicos sometidos a distintos usos: su rol como indicadores de calidad física en suelos de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Ciencia del Suelo* 26 (2): 115-129.

Alvarez, MF; ML Osterrieth & JL del Río. 2008. Efecto de distintos usos del suelo sobre propiedades físicas de Argiudoles típicos del sudeste bonaerense. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Alvarez, MF; ML Osterrieth; A Becker; B Parra; JL del Río & MP Cantú. 2008. Estudio comparativo de la morfología de agregados, su rol como indicador en la calidad de molisoles de la región pampeana. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Amiotti, N; D Marelló; E Schmidt & O Bravo. 2010. Degradación de suelos inducida por sobrepastoreo en el oeste del partido de Villarino, Buenos Aires. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fe, Argentina.

Andriulo, A; A Irizar; L García; L Hanuch & F Rimato-

ri. 2008. Efecto de los monocultivos de soja y maíz sobre el aporte de carbono y algunas propiedades edáficas luego de 20 años bajo siembra directa. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Anríquez, A; A Albanesi; C Kunst; R Ledesma; C López & J Godoy. 2004. Evaluación de indicadores biológicos de calidad de suelos en ecosistemas rolados de la región chaqueña. Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Aoki, AM; P Campitelli; O Gudelj; CI Vettorello; G Esmoriz & R Sereno. 2008. Efectos de diferentes sistemas de cultivos y labranzas sobre propiedades indicadoras de calidad de suelo. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Aoki, A; P Campitelli; G Esmoriz; JI Tuda & R Sereno. 2010. Evaluación de propiedades físicas y químicas en un suelo bajo diferentes sistemas de cultivo y labranzas. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fe, Argentina.

Aparicio, V & JJ Costa. 2004. Indicadores físicos y químicos de la calidad de suelos en el sudeste bonaerense. Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Aparicio, V & JL Costa. 2006. Síntesis de indicadores de calidad del suelo en el sudeste bonaerense. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta, Argentina.

Aparicio, V & JL Costa. 2007. Soil quality indicators under continuous croppingsystems in the Argentinean Pampas. *Soil and Tillage Research* 96: 155-165.

Aparicio, V & JL Costa. 2008. Evolución de algunos indicadores de calidad de suelo en el sudeste de la región Pampeana. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Apezteguía, HP; AM Aoki; MR Ateca; CI Vettorello & R Sereno. 2008. Indicadores de calidad y funcionamiento hídrico de suelos en la región central de Córdoba. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Apezteguía, HP; P Campitelli; O Bachmeier; R Sereno. 2006. La fracción liviana de la materia orgánica en bosque nativo y suelos cultivados. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta, Argentina.

Arolfo, RV; JC Bedano & AR Becker. 2008. El impacto del paquete tecnológico siembra directa-soja transgénica- glifosato en la mesofauna del suelo en la cuenca de Gral. Deheza, Córdoba. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Arranz, C; J Galantini; J Iglesias; H Krüger & S Venanzi. 2004. Sistemas de Labranza: efecto del pastoreo animal sobre la distribución del tamaño de poros. Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Arzeno, JL; ER Corbalán; DJ Huidobro; P Arias; A Franzoni & AD Matta. 2004. Evaluación del impacto de la agricultura orgánica usando indicadores de calidad de suelos. Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Arzeno, JL; ER Corvalán; DJ Huidobro; A Franzoni & AD Matta. 2004. Indicador de calidad de suelo: relación de la materia orgánica entre dos profundidades 0-5 y 0-20 cm. Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Arzeno, JL; LM Aciar; E Corvalán; J Huidobro & T Rodríguez. 2008. Uso de indicadores de calidad de suelo sobre parcelas de largo plazo en Salta. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Arzeno, JL; R Osinaga; F Ferrary Laguzzi; E Corvalán & T Rodríguez. 2010. Relación de la MO entre: 0-5 y

0-20 cm (%REMO 5/20), como indicador de calidad de suelos en parcelas de largo plazo de Salta. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fe, Argentina.

Banegas, NR; AS Albanesi; MR Toranzos & R Pedraza. 2008. Indicadores de calidad de suelo en un sistema ganadero con pasturas tropicales. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Barbagelata, PA.; OP Caviglia & OF Papparotti. 2000. Evaluación de dos sistemas de labranzas con riego suplementario. I. Efectos sobre el crecimiento, rendimiento y eficiencia en el uso del agua en el cultivo de trigo y la resistencia mecánica del suelo. Actas XVII Congreso Argentina de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Argentina.

Baridón, E; A Pellegrini & J Lanfranco. 2004. Pérdida de suelo en una microcuenca sobre Argiudoles y Natracualfes. Efectos de dos sistemas de manejo. Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Baridon, E; A Pellegrini & V Cattani. 2010. Estabilidad estructural y contenido de carbono orgánico en relación al uso de suelo en una zona subtropical de Argentina. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fe, Argentina.

Barrios Arosemena, MX; LI Picone; FO García; KP Fabrizio & G Cendoya. 2000. Cambios en los contenidos de carbono y nitrógeno del suelo en sistemas bajo siembra directa en transición desde labranza. Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

Barrios, B; A Buján; A Bozzo; S Debelis & M Yañez. 2000. Evaluación de algunos parámetros físicos y desarrollo radicular en soja con siembra directa, en una rotación. Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

Barrios, MB; AA Bozzo; SP Debelis; C Leiva; G Miranda; C Gimenez Padilla & A Bujan. 2004. Efecto de laboreo conservacionista sobre el rendimiento y

algunas propiedades físicas del suelo en soja. Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Barrios, MB; A Buján; AA Bozzo; SP Debelis; J De Grazia; S López; HA Rodríguez; HI Andrada & F Fernández. 2008. Variables físicas bajo diferentes sistemas de labranza. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Barrios, MB; J De Grazia; HA Rodríguez; LE Villar; IR Paladino; A Blason; SP Debelis; PA Tittonell; SC López & A Buján. 2010. Variables físicas del suelo bajo un cultivo de maíz en diferentes sistemas de labranzas. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fe, Argentina.

Bedano, JC; MP Cantú & ME Doucet. 2000. La influencia de distintos sistemas productivos en las comunidades de fauna edáfica en agroecosistemas del sur de Córdoba. Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

Bedano, JC; MP Cantú & ME Doucet. 2004. La mesofauna edáfica como bioindicador de calidad de suelos: el uso de la densidad de una especie. Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Bedano, JC; R Arolfo & A Domínguez. 2008. La mesofauna edáfica como indicadora de la degradación del suelo. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta, Argentina.

Beltrán, C; L Ferreras; S Toresani; B Bonel; G Magra; J Villar & M Migliorati. 2010. Impacto de ciclos agrícolas y ganaderos sobre parámetros del suelo. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fé, Argentina.

Benintende, M; S Benintende; D David; M Sterren & M Saluzio. 2010. Indicadores biológicos y bioquímicos: caracterización de suelos de Entre Ríos. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo,

Rosario, Santa Fe, Argentina.

Benintende, SM; M Benintende & MA Sterren. 2006. Población microbiana e indicadores biológicos en suelos con uso arrocero. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta, Argentina.

Benintende, SM & MC Benintende. 2008. Indicadores biológicos de calidad de suelos con diferente intensidad de cultivo de arroz. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Besson, P; G Farias, JP Folguera & L Ferreras (ex aequo). 2000. Compactación relativa del suelo y estabilidad de los agregados bajo diferentes situaciones de manejo. Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

Bonel, BA; S Toresani; L Ferreras; E Fernández; C Esteban; S Bacigalupo & M Bodrero. 2010. Uso potencial de indicadores biológicos y bioquímicos en sistemas de producción agropecuarios. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fe, Argentina.

Bonelli, CL; G Lorenz & SD Roldán, S.D. 2000. Estabilidad estructural en suelos del Chaco Semiárido. Análisis de distintas metodologías. Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

Bongiovanni, MD; JC Lobartini & GA Orioli. 2000. Cambios en las sustancias húmicas y agregados del suelo provocados por labranzas. Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

Bongiovanni, MD & A Degioanni. 2010. Carbono orgánico en suelos con uso agrícola y ganadero del sur de Córdoba. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fé, Argentina.

Bravo, O & JC Silenzi. 2000. Uso del índice de estabilidad mecánica para evaluar la resistencia a la erosión eólica en suelos de la región Semiárida

Bonaerense. Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

Bricchi, E; B Parra; F Formia & L Verri. 2004. Efecto del uso y las labranzas sobre la susceptibilidad a la compactación de un Hapludol típico. Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Buschiazzi, DE; SB Aimar & M Zappa. 2000. Erosión eólica de un Hapludol Entico cultivado con girasol en tres sistemas de labranza. Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

Campitelli, P; A Aoki; O Gudelj; A Rubenacker; M Pasquero & R Sereno. 2008. Evaluación del efecto de uso y prácticas de calidad de suelo mediante el análisis de componentes principales. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Cantú, MP; A Becker; JC Bedano; TB Musso & HF Schiavo. 2004. Indicadores e índices cuantitativos de calidad ambiental y de suelos para evaluar la sustentabilidad de agroecosistemas. Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Cantú, MP; A Becker; JC Bedano; HF Schiavo & F Hugo. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. Cienc. Suelo 25 (2): 173-178.

Cantú; MP; JC Bedano; BJ Parra; AR Becker & HF Schiavo. 2008. Selección de indicadores de suelos y establecimiento de pesos relativos mediante métodos estadísticos multivariados. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Cardozo, MS; JL Arzeno; J León; C Sánchez & J Huidobro. 2006. Estudio de suelos desmontados de uso agrícola, a través de indicadores de calidad de suelo. Anta-Salta. Actas XX Congreso Argentino

de la Ciencia del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta, Argentina.

Carrasco; N; JL Costa & MS Zamora. 2008. Calidad del suelo en el área sur de la cuenca del arroyo Claromecó. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Carrasco, N; D Carmona; JL Costa & L Picone. 2010. Indicadores biológicos de calidad de suelo en el área sur de la cuenca del arroyo Cloremecó. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fé, Argentina.

Carrizo, ME; MA Pilatti & O Felli. 2008. Complejo intercambiable y acidez del suelo en Argiudoles del centro de Santa Fé. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Caruso, H; MC Camardelli & S Miranda. 2008. Efectos del desmonte sobre los indicadores químicos de los suelos y la condición de las pasturas en el este de Salta. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Castañeda, MA; R Osinaga & JL Arzeno. 2010. Evaluación de la humedad del suelo en dos sistemas de labranza. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fe, Argentina.

Castiglioni, MG; ME Mendive Álvarez; J Córdoba; M Ochoa; D Mazzoni. 2010. Cambios en la porosidad y distribución de poros asociados a causas edáficas y por el uso de la tierra. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fé, Argentina.

Cazorla, C. 2005. Resistencia a la penetración como indicador de compactación en ensayos de larga duración bajo SD en Marcos Juárez. Seminario Internacional Indicadores de Calidad de Suelo, Marcos Juárez, Córdoba, Argentina.

Cerana, J; MG Wilson; J Noir & S Rivarola. 2004. La estabilidad estructural como indicador de deterioro de suelos arroceros. Actas XIX Congreso Argen-

tino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Cerana, JA; MG Wilson; JJ De Battista; J Noir & C Quintero. 2006. Estabilidad estructural de los vertisoles de Entre Ríos en un sistema arrocerero regado con agua subterránea. RIA, 35 (1): 87-106.

Corbella, RD; JR García; GA Sanzano; AM Plasencia & J Fenández de Ullivarri. 2006. Diferentes fracciones de carbono orgánico como indicadores de calidad de suelos del este tucumano. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta, Argentina.

Díaz, CG; R Osinaga, R & J Arzeno. 2010. Cobertura, planchado y erosión activa como indicadores de calidad de suelos en parcelas de largo plazo. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Argentina.

Díaz, CG; R Osinaga, R & J Arzeno. 2010. Resistencia a la penetración, humedad del suelo y densidad aparente como indicadores de calidad de suelos en parcelas de largo plazo. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Argentina.

Gudelj, V; C Galarza; P Vallone; G Espoturno; O Gudelj; G Ayub; G Nieri & H Ghio. 2000. Comparación de lotes en producción agrícola manejados con diferentes alternativas conservacionistas. Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

Gudelj, O & B Masiero. 2000. Efecto del manejo del suelo sobre su densidad aparente. Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Argentina.

Gudelj, O & B Masiero. 2001. Efecto del manejo del suelo sobre su estabilidad estructural. Informe técnico del área Suelos y Producción Vegetal. N° 128. EEA Marcos Juárez, p 31-43.

Guillén, SC; MC González; JP Vidal; J Manzur & D Pérez Gómez. 2006. Indicadores de sustentabilidad en sistemas de cultivo soja/trigo. Tucumán, Argentina. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina,

Salta, Argentina.

Gutiérrez, N; C Venialgo; J Gutiérrez; R Restelli; E Moro. 2000. Propiedades edáficas en un Durustol éntico sometido a sistemas de labranza cero y rotación maíz-soja. Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

Heredia, OS; L Giuffré; G Hansen & ED Arzuaga. 2008. Efecto de los cambios en el uso de la tierra y el clima sobre las propiedades químicas de los suelos de General Viamonte, Buenos Aires, Argentina. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Huidobro, Dina; JL Arzeno; E Corvalán; A Franzoni & A Matta. 2004. Monitoreo del carbono en distintos sistemas de manejo de suelo en Cerrillos-Salta. Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Iglesias, MC; CA Venialgo; DA Sosa & NC Gutiérrez. 2000. Actividad biológica como indicadora de cambios en un ensayo de labranzas en la zona yerbatera argentina. Anais 2º Congreso Sul-americano da Erva-Mate e 3º Reuniao Técnica da Erva-Mate, Encantado, RS. 19 a 23 de novembro de 2000. p. 241-244.

Iglesias, MC; NC Gutiérrez; C Venialgo & R Gutierrez. 2000. La degradación de celulosa como bioindicador de distintos manejos en la producción algodонера y su relación con la materia orgánica y nutrientes. Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

Iglesias, JO; G Minoldo; MR Landriscini; JA Galantini & AM Miglierina. 2008. Rotación de cultivos en la zona semiárida. Efecto de largo plazo sobre algunas propiedades del suelo. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Iglesias, J; J Galantini; J Gasparoni & R Agamenoni. 2010. Efecto de diferentes rotaciones con cebolla en el Valle Bonaerense del Río Colorado. I

Propiedades físicas del suelo. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fé, Argentina.

Imhoff, S; MC Miretti; Butarelli & HO Imvinkelreid. 2010. Eficiencia del indicador "S" para diferenciar estados de deterioro estructural inducido por maquinaria agrícola. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fe, Argentina.

Imhoff, S; JP Gay; A Grioni; P Ghiberto. 2006. Calidad física de Argiudoles de Santa Fé determinada por medio del intervalo hídrico óptimo. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta, Argentina.

Indelángelo, N; MG Wilson & HAA Tasi. 2007. Indicadores de calidad para dos suelos con características vérticas de Entre Ríos (Argentina). Cuadernos Lab. Xeológico de Laxe 32: 111 - 125.

Irigoin, J; E Penón & MC Costa. 2004. Integración de atributos edáficos en un índice de calidad de suelo. Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Jimenez, MP; MR Palma; RL Defrieri & AM de la Horra A.M. 2002. Sensibilidad de los indicadores de calidad del suelo". Actas XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Puerto Madryn, Chubut, Argentina.

Kiessling, RJ; JA Galantini; JO Iglesias & H Kruger. 2010. Sistemas de labranza en el suroeste bonaerense. Relación entre el carbono orgánico y algunas propiedades físicas del suelo. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fe, Argentina.

Krüger, H; S Venanzi & J Galantini. et al. 2004. Rotación y cambios en propiedades químicas de un Hapludol típico del sudoeste bonaerense bajo labranza. Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Lardone, A; E Bricchi & A Degioanni. 2010. Efecto de sistemas de labranzas sobre el contenido de materia orgánica total en Hapludoles típicos. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fe, Argentina.

Lattanzi, A; J Arce; HJ Marelli; C Lorenzón & T Baignorria. 2007. Efecto de largo plazo de la siembra directa y de rotaciones de cultivos sobre los rendimientos, el carbono y nitrógeno orgánico, en un suelo Argiudol típico en Marcos Juárez. En: Roberto Díaz Rossello & Catalina Rava (eds.). Aportes de la ciencia y la tecnología al manejo productivo y sustentable de los suelos del cono sur. Pp. 39-56. IICA PROCISUR. Montevideo, Uruguay. 148 pp.

Ledesma, M; J Arseno; R Osinaga; D Sánchez & M Aciar. 2006. Infiltración evaluada con permeámetro de disco como indicador de calidad de suelos. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta, Argentina.

López Fourcade, R; C Clérico; JM Cisneros; C Cholaky. 2008. Evaluación de la degradación de los suelos de la Pampa Medanososa frente a los cambios de uso actuales. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

López, AN; AM Vincini; D Carmona; HA Alvarez Castillo & PL Manetti. 2000. Impacto de las prácticas de manejo sobre la fauna edáfica en dos sistemas de producción. Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

Malsam, SJ; E Noellemeyer & A Quiroga. 2006. Efectos provocados por desmontes en suelos de la región del caldenal. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta, Argentina.

Mandolesi, ME; P Vidal; MM Ron & H Forján. 2002. Carbono orgánico y sus fracciones según uso del suelo en un Argiudol Típico del centro sur bonaerense. Boletín del INTA. Chacra Experimental Integrada Barrow, Tres Arroyos, Buenos Aires, 6 pp.

Mandolesi, ME; MM Ron; P Vidal & H Forjan. 2006. Fracciones de carbono orgánico en u Argiudol típico del centro sur bonaerense. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta, Argentina.

Manetti, PL; AN López; NL Clemente & AJ Faberi. 2008. Abundancia de los organismos de la meso y macrofauna del suelo bajo labranza convencional y siembra directa. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Manso, ML; H Forján; GA Studdert; M Zamora & R Bergh. 2008. Evolución de variables físicas bajo dos sistemas de labranza. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Martinez Uncal, MC; S Aimar; HM Martinez & R Hevia. 2006. Estudio de materia orgánica y estabilidad en un Haplustol del Caldenal, con distintos manejos. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta, Argentina.

Mercado Cárdenas, GE; LM Aciar; C Pérez Brándan & JL Arzeno. 2008. Variabilidad de la microflora fúngica en plantación directa de tabaco como indicador de calidad de suelo. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Mestelan, S; J Ressia; M Pazos; G Mendivil; D Olgaray & R Balbuena. 2002. Impacto de diferentes sistemas de labranzas en propiedades de un Phaeozem Luvico del Centro de la provincia de Buenos Aires. Actas XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del suelo, Puerto Madryn, Chubut, Argentina.

Mestelan, S; JC Ramaglio; H De Dominicis; O Sánchez; D Cogliatti; R Silvestro. 2010. Evolucion de propiedades físicas en sistemas ganaderos integrados a agricultura continua bajo siembra directa. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fe, Argentina.

Miglierina, AM; RA Rosell & J Cacchiarelli. 2000.

Dinámica de nutrientes en fracciones granulométricas de un Hapludol típico bajo labranzas diferentes. Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

Minoldo, G; J Galantini; R Rosell; H Kruger & S Venanzi. 2004. Fracciones orgánicas en suelos de la región semiárida bajo diferentes rotaciones. Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Minoldo G; J Galantini; L Suñer; J Iglesias; H Kruguer & S Venanzi. 2010. Efecto de los sistemas de labranza y cultivos antecesores sobre algunas propiedades químicas del suelo en el sudoeste bonaerense. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fe, Argentina.

Miretti, MC; G Poi & S Imhoff. 2008. Indicador físico de la degradación de alfalfares en un Argiudol de Santa Fé. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Moro, E; C Venialgo; N Gutierrez; O Ingaramo; D Drgan; A Asselborn; J Oleszczuk. 2002. Variabilidad temporal del índice de estabilidad de agregados en diferentes sistemas de labranza y rotaciones en el sudoeste del Chaco. XIII Reunión de Comunicaciones Científicas y Técnicas, Facultad de Ciencias Agrarias UNNE.

Moro, E; C Venialgo; N Gutiérrez & O Ingaramo. 2004. Variabilidad temporal de la compactación máxima en suelos de la provincia del Chaco. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas 2004, Universidad Nacional del Nordeste.

Morón, A; H Marelli; J Sawchik; V Gudelj; C Galarza & J Arce. 2004. Indicadores de la calidad de suelo en experimentos de rotaciones de cultivos en Córdoba Argentina. Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Morón, A; V Gudelj; J Sawchik; C Galarza; H Marelli & J Arce. 2004. Indicadores de la calidad de suelo en lotes de producción agrícola con labran-

zas contrastantes en Córdoba Argentina. Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Moscatelli, G; C Iruiria; R Sobral; R Mon & A Luters. 2006. Medición de parámetros físicos químicos y biológicos en suelos de la región Pampeana para establecer criterios de calidad y salud. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta, Argentina.

Murro, A; M Aciar; JL Arzeno; R Osinaga & DC Sánchez. 2006. Tubulaciones biológicas evaluadas como indicador de calidad de suelo. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta, Argentina.

Musso, TB; MP Cantú & A Becker. 2006. Indicadores de calidad del suelos. Un set mínimo para Hapludoles de la cuenca del arroyo La Colacha. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta, Argentina.

Musso, TB; MP Cantú & AB Becker. 2004. Efecto de distintos sistemas de labranza y de fertilización sobre el contenido de carbono orgánico, N total y el pH de un Hapludol típico del sur de Córdoba, Argentina. Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Novelli, L; O Caviglia; M Wilson & C Sasal. 2010. Impacto de la frecuencia de soja sobre la agregación y el almacenaje de carbono en Molisoles y Vertisoles de Entre Ríos. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fé, Argentina.

Orellana, J & MA Pilatti. 1998. Indicadores edáficos en agricultura sostenible. II) idoneidad de variables edáficas para evaluar sostenibilidad en agroecosistemas. Actas XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Córdoba, Argentina.

Orellana, J & MA Pilatti. 2004. Posibles indicadores edáficos de estabilidad: I. La estabilidad de agre-

gados. Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Paladino, I; J Irigoín; G Civeira & G Moscatelli. 2008. Selección de indicadores de calidad de suelos en distintas series de la región Pampeana, mediante análisis multivariado. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Paredes, FA & HC Dalurzo. 2010. Evolución de la resistencia mecánica de un Argiudol bajo diferentes manejos. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fe, Argentina.

Parra, BJ; MP Cantú; A Becker & JC Bedano. 2008. Indicadores de degradación en Haplustoles del área de General Deheza. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Parra, BJ; AR Becker & MP Cantú. 2010. Compactabilidad, carbono orgánico y densidad aparente bajo distintos sistemas de manejo agrícolas del centro sur de Córdoba. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fé, Argentina.

Pellegrini, AE; E Baridón; JW Lanfranco & A Aragón. 2008. Modificación del contenido y composición de la materia orgánica en suelos del centro oeste formoseño ante el proceso de agriculturización. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Peralta, N; AR Becker; MP Cantú; BJ Parra; JC Bedano & HF Schiavo. 2008. Evaluación del impacto del uso y manejo del suelo sobre las propiedades físicas en Hapludoles típicos en la cuenca del arroyo La Colacha, provincia de Córdoba, Argentina. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Pilatti, MA; OM Felli & S Imhoff. 2006. Cambios por el uso en un Argiudol típico, sur de Santa Fé: 1) Evolución de propiedades químicas: 1983 a 2003. 2006. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia

del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta, Argentina.

Pilatti, MA; S Imhoff; P Ghiberto & O Felli. 2006. Cambios por el uso en un Argiudol típico, sur de Santa Fe: 2) Evolución de propiedades físicas: 1983 a 2003. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta, Argentina.

Piñeiro, G; JM Paruelo; M Oesterheld; EG Jobbagy; RD Jackson & AI Altesor. 2004. Efectos del pastoreo sobre los ciclos de carbono y nitrógeno en los pastizales del Río de la Plata. Actas IX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Piquín, EJ; JL Arzeno; MP Cabrera y C Sánchez. 2006. Evaluación de la calidad de suelo mediante la biomasa y la actividad respiratoria (in vitro). Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta, Argentina.

Piquín, EJ; JL Arzeno; MP Cabrera & C Sánchez. 2006. La actividad respiratoria a campo como indicador de la calidad de suelos. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta, Argentina.

Quintero, C; MG Wilson; A Paz González; E Vidal Vázquez; E Díaz & J Cerana. 2004. Utilización de indicadores para evaluar el efecto del uso arrocero sobre la calidad del suelo. Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Ramírez Pisco, R; MA Taboada & R Gil. 2006. Efectos a largo plazo de la labranza convencional y la siembra directa sobre las propiedades físicas de un Argiudol típico de la Pampa Ondulada Argentina. Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín 59(1): 3237-3256.

Rangeon, NI; LM Aciar; R Osinaga; JL Arzeno & C Sánchez. 2008. Análisis de la resistencia a la penetración y humedad de suelo como indicadores de calidad en distintos sistemas de labranza. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potre-

ro de los Funes, San Luis, Argentina.

Reynoso, L & A Andriulo. 2008. Gestión ambiental en el manejo de nutrientes bajo agricultura intensiva: índice de riesgo a la contaminación por N y P. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Reynoso, L & A Andriulo. 2008. Índices de carga contaminante de N y P desarrollados para la Pampa Ondulada bajo agricultura continua. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Rienzi, EA; S Rebottaro; P Rodríguez; CM Kvolek; C Barcelonna & D Cabrelli. 2004. Cambios físicos sobre suelos arenosos en Concordia (ENTRE RÍOS, ARGENTINA) provocados por plantaciones de *Pinus elliotii* (ENGELM). R.C. Suelo Nutr. Veg. 4 (1): 1-13.

Rivarola; SE & RA Roselli. 2006. Distribución de agregados y biomasa edáfica como indicadores de calidad del suelo. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta, Argentina.

Rodríguez, ML; AR Becker; MP Cantú; HF Schiavo; BJ Parra & JC Bedano. 2008. Evaluación del impacto del uso y manejo del suelo sobre las propiedades químicas en Hapludoles típicos en la cuenca del arroyo La Colacha, provincia de Córdoba, Argentina. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Roldán, S; G Lorenz & L Bonelli. 2000. Aspectos de calidad de materia orgánica del suelo en función del uso de la tierra en el centro-este santiagueño. Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

Rollán, AA; MS Karlin & OA Bachmeier. 2004. Siembra directa y densificación subsuperficial en Molisoles del centro norte de Córdoba. Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Rollán, AA & OA Bachmeier. 2006. Propiedades físicas sensibles al manejo del suelo en la región

centro-norte de la provincia de Córdoba. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta, Argentina.

Romaniuk, R; A Costantini & L Giuffré. 2004. Evaluación de parámetros órgano biológicos como potenciales indicadores de calidad del suelo. Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Romaniuk, R; L Giuffré; A Costantini & RP Ríos. 2008. Método sistemático para evaluar la calidad del suelo en sistemas hortícolas bajo manejo convencional y orgánico. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Romaniuk, R; L Giuffré & C Costantini. 2010. Estudio de la estructura de la comunidad microbiana en la evaluación de la calidad de los suelos. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fe, Argentina.

Romero, V; JL Arzeno; D Moreno; R Osinaga; CD Sánchez & A Franzoni. 2008. Uso de los indicadores de calidad de suelo en fincas del umbral al Chaco en Salta y Santiago del Estero. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Ron, MM; C Facchinetti; ME Mandolesi & RJ Kiessling. 2004. Efecto de la acción antrópica sobre índices químicos de calidad edáfica en un lote productivo del partido de Tornquist. Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Rossi, MS; RR Casas; RO Michelena; BA Pérez & IE García. 2008. Indicadores bioquímicos y microbiológicos para la descripción del estado de salud del suelo. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Salomón, M.; AD Vega Avila; M Toro & F Vazquez. 2008. Estudio de indicadores biológicos de calidad

del suelo en un ambiente semiárido. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Saluso, A; O Ermácora; C Romero & C Debona. 2004. Variación estacional de la abundancia y diversidad de la artropodofauna edáfica en dos agroecosistemas. Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Sánchez, MC; O Heredia; N Bartoloni; C González & N Arrigo. 2006. Secuencias de Cultivos y Labranzas: efecto sobre las fracciones de carbono del suelo. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta, Argentina.

Sánchez, MC; FA Galizzi; RA Duffau y EA Azar. 2008. Agricultura sustentable en sistemas productivos con riego: valores iniciales de propiedades físicas y químicas del suelo en Santiago del Estero, Argentina. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Sanzano, GA; R Corbella; J García & G Fadda. 2004. La degradación física de un haplustol típico bajo distintos sistemas de manejo de suelo. Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Sasal, MC; MG Wilson; NA Garcarena; HA Tasi & O Papparotti. 2008. Escurrimiento y pérdidas de suelo en sistemas de cultivo bajo siembra directa. Efecto de algunas propiedades edáficas superficiales. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Schmidt, E; N Amiotti & O Bravo. 2008. Comportamiento de indicadores químicos y biológicos de calidad de suelos bajo labranza reducida y siembra directa continua en la región semiárida sur. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Schmidt, E; N Amiotti & O Bravo. 2006. Indicadores de pérdida de calidad de suelos bajo siembra

directa continua en la Pampa Semiárida. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta, Argentina.

Silenzi, JC ; CA Puricelli & NE Echeverría. 2000. El estado de compactación de dos suelos representativos de la región semiárida pampeana argentina resultante de distintos usos y manejos y su implicancia en el desarrollo radicular de las gramíneas. Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia de Suelo, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

Silenzi, JC; CA Puricelli; NE Echeverría; T Grossi & AG Vallejos. 2000. Degradación y recuperación de la región semiárida Pampeana Argentina como resultado de distintos usos y manejos. Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

Silenzi, JC; AG Vallejos; NE Echeverría & MP De Lucía. 2004. Análisis de la gestión ambiental en la producción de trigo mediante labranza convencional y siembra directa. Indicadores de sustentabilidad 8 a 12. 2004. Actas VI Congreso Nacional de Trigo y IV Simposio Nacional de Siembra Otoño Invernal. Universidad Nacional del Sur, Departamento de Agronomía, Bahía Blanca, Bs. As., Argentina.

Studdert, G & H Echeverría. 2002. Agricultura continua, labranzas y carbono orgánico en la capa arable en el sudeste bonaerense. Actas XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Puerto Madryn, Chubut, Argentina.

Studdert, GA & HE Echeverría. 2002. Rotaciones mixtas, labranzas y carbono orgánico en la capa arable en el Sudeste Bonaerense. Actas XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Puerto Madryn, Chubut, Argentina.

Suñer, L; C Franco & R Rosell. 2004. Evolución del fósforo en suelos bajo diferentes rotaciones de cultivos. Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Tasi, HA; MG Wilson; A Paz González; N Indelángo, & MC Sasal. 2007. Sensibilidad de algunas pro-

iedades de un vertisol con uso ganadero-agrícola para indicar calidad de suelos. 10th International Symposium on Soil and Plant Analysis, Budapest, Hungary.

Torella, JL; E Angelotti; RM Introcaso; JC Ceriani & JM Guecaimburu. 2004. Respuesta de parámetros biológicos del suelo a la implementación de la siembra directa. Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Toresani, S; B Bonel; L Ferreras; V Faggioli; E Fernández & G Magra. 2008. Indicadores biológicos, físicos y químicos del suelo en sistemas de labranza y fertilización. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Torres, CG & AC Sánchez. 2004. Estado de agregación en suelos bajo diferente manejo en la quebrada de Humahuaca, Jujuy. Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional Sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Torres-Duggan, M; CR Alvarez & MA Taboada. 2010. Riego complementario en sistemas productivos extensivos: influencia sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fe, Argentina.

Uberto, ME; JM Cisneros; C Vignolo; C Cholaky & R Pedelini. 2002. Sistemas de labranza en Haplustoles énticos del área manicera de Córdoba (Arg.): I. Efecto sobre las propiedades físicas. Actas XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Puerto Madryn, Chubut, Argentina.

Urricariet, S & R Lavado. 1999. Indicadores de deterioro en suelos de la Pampa ondulada. Ciencia del Suelo 17 (1): 37-44.

Vargas Gil, S; A Becker; C Oddino; M Zuza; A Marinelli & G March. 2009. Field trial assessment of biological, chemical and physical responses of soil to tillage intensity, fertilization and grazing. Environmental Management 44: 378-386.

Vargas Gil, S; J Meriles; C Conforto; M Basanta; V Radl; A Hagn; M Schloter & GJ March. 2011. Response of soil microbial communities to different management practices in surface soils of a soybean agroecosystem in Argentina. European Journal of Soil Biology 47(1): 55-60.

Venialgo, CA; NC Gutiérrez & JR Gutiérrez. 2004. Variables edáficas en diferentes sistemas de uso del suelo en el sudoeste chaqueño. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas 2004, Universidad Nacional del Nordeste.

Venialgo, CA; O Ingaramo; S Ibaló; MF Roldán; G Banzhaf & NC Gutierrez. 2004. Índice de cono, humedad presente y densidad aparente en diferentes labranzas y rotaciones. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas 2004, Universidad Nacional del Nordeste.

Venialgo, C1 & DA Sosa. 2008. Influencia del manejo de suelo sobre algunas variables edáficas en plantaciones de yerba mate del noreste de Corrientes (Argentina). Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Vettorello, CI; P Campitelli; S Ceppi & R Sereno. 2004. Efectos de tres diferentes usos y manejos del suelo sobre el carbono orgánico total y sus componentes. Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Vettorello, CI; AM Aoki & GF Esmoriz. 2006. Parámetros físicos, químicos e hidrológicos en un Haplustol con diferentes manejos. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta, Argentina.

Vicentín, J; D Mistrorigo; S Benintende & M Benintende. 2006. Indicadores químicos y biológicos de calidad de suelo y productividad en pasturas. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta, Argentina.

Vicentín, J.; D. Mistrorigo; S. Benintende & M. Sterren. 2008. Efecto de los años de pastura sobre al-

gunas propiedades químicas de los suelos de Gral. Viamonte; Buenos Aires, Argentina. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Vidal, C & V Aparicio. 2008. Evaluación de algunas propiedades físicas y químicas de suelos provenientes del desmonte en el norte de Santa Fé. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Videla, C; PC Trivelin; GA Studdert; HE Echeverría & JA Bendasolli. 2004. Fraccionamiento granulométrico de materia orgánica de suelos del SE bonaerense bajo pastura, labranza convencional y siembra directa. Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Villamil, MB; NM Amiotti & N Peinemann. 2008. Multivariate characterization of grassland soils and their association with dominant plants' chemistry. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Villar, JL & LA Romero. 2000. Rotaciones agrícolo-ganaderas para el centro de Santa Fe: Respuesta de algunos parámetros de fertilidad del suelo y del rendimiento de grano de los cultivos. Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

Wilson, MG; G Barral; E Díaz; O Duarte & R. Valenti. 2004. Estado estructural de suelos arroceros regados con agua de embalse en Entre Ríos. Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional Sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Wilson, MG; H Tasi; N Garcíarena; N Indelangelo & MC Sasal. Indicadores de calidad de suelo. <http://inta.gov.ar/unidades/631000>. Marzo 2011.

Wilson, MG; SE Rivarola; CE Quintero; JA Cerana & RA Benavidez. 2000. Evaluación de la estabilidad estructural de suelos arroceros de Entre Ríos. Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Argentina.



Wilson, M; J Paz Ferreiro; C Quintero; E Vidal Vázquez; E Díaz & J Cerana. 2007. Distribución de poros en un suelo vertisólico de uso arrocero. *Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe Coruña* 32: 207 – 220.

Wilson, M; J Paz Ferreiro; H Tasi; E Vidal Vazquez & J De Battista. 2008. Impact of Land Use Change on selected Soil Properties of Mollisols in the Entre Ríos Province, Argentine. 15th ISTRO Conference. Budapest.

Wilson, MG; HA Tasi; A Paz González; N Indelángelo & EL Díaz. 2008. Indicadores de calidad para suelos del área de bosques nativos de Entre Ríos. *Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Wilson, MG; J Oszust; C Sasal; A Paz González. 2010. Variación espacial de la resistencia mecánica a la penetración y su relación con estados estructurales del suelo bajo distintas secuencias de cultivos. *Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*, Rosario, Santa Fe, Argentina.

## La profundidad de muestreo para análisis de fertilidad y calidad de suelos

### Proyecto específico PNECO-093012

Ing. Agr. (M. Sc.) Tomás Loewy  
AER Bahía Blanca. [tloewy@bvconline.com.ar](mailto:tloewy@bvconline.com.ar)

#### Introducción

Todos los investigadores y docentes, del área fertilidad de suelos, concuerdan en señalar a la fase de muestreo como la más crítica del proceso analítico. Esto es especialmente así para fines de diagnóstico. Tal prevención se basa en la conocida variabilidad espacial (horizontal – vertical), cultural, estacional, temporal y operatoria. Para abordarla se formulan diferentes métodos y “filosofías”, que no terminan de estabilizarse en una puesta en común. El tema exhibe diversos enfoques que sería bueno ordenar -según cada objetivo particular- y atender al mismo nivel con que se realizan los controles de métodos ínter laboratorios. No se debe desconocer que los análisis de suelos son un insumo imprescindible, no solo para reponer nutrientes, sino -también- como

evaluación de tierras, monitoreo de calidad y conservación del recurso.

Lo que se aborda aquí es la fuente de variación vertical, por la aparente menor atención relativa a esta medida. Es normal que mientras los taxonomistas otorgan un valioso poder diagnóstico a la estructura morfológica, de esa dimensión, muchos “fertilólogos” -para el muestreo- otorgan más celo a la variabilidad horizontal.

Durante los años 70, se desarrolló un proyecto de FAO (con sede en Balcarce) sobre Conservación de Suelos. En esa oportunidad se programó un muestreo sistemático de la región pampeana, para Materia Orgánica, pH y Fósforo extraíble. La

---

1. INTA, Estación Experimental Bordenave, 8187, Buenos Aires, Argentina

pauta de estandarización de profundidad fue de 0-12 cm, popularizando el muestreador de pico y tacho, cuyas bondades están a la vista. El criterio elemental era extraer el segmento más conspicuo de la capa arable y/o del horizonte A. Como un complemento, necesario, se implementó un 5% de las muestras con una 2ª profundidad, hasta los 20 cm. De esta forma se relevaban los patrones de cambio -en profundidad- para cada variable. Un producto de este Proyecto fue el muy difundido mapa de fertilidad fosfórica, dando lugar a numerosos programas de investigación sobre la nutrición de este elemento (calibraciones, fertilización, etc.).

### Objetivos

- Promover el debate, académico y operativo, de la posibilidad de estandarizar la profundidad de muestreo de suelos, para fines de diagnóstico y calidad, inicialmente en los análisis de rutina.

- Idealmente se pretende que la norma sea de uso nacional, por las innegables ventajas comparativas y de evaluación.

- Como etapa intermedia u objetivo de mínima, podrían establecerse pautas para las zonas áridas/semiáridas vs. húmedas o la Calidad de los suelos vs. Diagnóstico de fertilidad.

### Cambios

Avanzados los años 90 asistimos a un aumento en la profundidad de las muestras de suelos, para análisis de rutina, promovida desde la región pampeana húmeda. Esta variación, de 0-12 a 0-20 cm., no fue una propuesta del INTA o la Universidad, ni el resultado de una investigación o taller de trabajo. Algunos hablaron de una cuestión de practicidad o de mejor cobertura de la zona radicular. Si hubo otras causales del cambio no

fueron explicadas. Simultáneamente también se impulsó el fraccionamiento en tres profundidades para N disponible (0-20, 20-40 y 40-60 cm). Se acepta que para elementos móviles como N o S disponible y humedad, las profundidades de muestreo dependen de las texturas, tipos de suelos, cultivos y objetivos, independientemente de los horizontes genéticos.

### Propuesta

Para los análisis de rutina, como pH, Materia Orgánica (MO) y Fósforo extraíble (Pe), es importante una standardización -de la profundidad de muestreo- a nivel nacional. Al respecto se sugiere confirmar o adoptar la medida de 0-12 cm., para fines de diagnóstico, calibraciones y monitoreo de calidad. Mantener este segmento dentro de la capa arable y/o el horizonte "A" es relevante a los efectos de una mejor reproducibilidad y valor comparativo en diferentes suelos. No debemos olvidar que en las zonas semiáridas y áridas (70 % del territorio nacional) difícilmente el horizonte A se extiende hasta los 20 cm. También hay trabajos de calibración, para el fósforo extraíble, en base a esta medida (0-12 cm).

El conocimiento de la fertilidad a distintas profundidades del suelo no es, necesariamente, vinculante a las rutinas de muestreo. Al menos para el análisis de los atributos poco móviles y estables, resulta de sentido común atender a los cambios naturales del perfil. Se pueden incluir uno, dos o más estratos/horizontes, para distintos fines, pero mezclarlos -como norma- no es consistente.

Para siembra directa (SD), la profundidad de 0-12 también es válida. Si bien no hay capa arable si-gue vigente no sobrepasar el horizonte A, como criterio. No obstante, tanto en este sistema como en el convencional o conservacionista, es justificable incluir estratos menores (o mayores), con fi-

nes específicos. En particular ya hay experiencias útiles de las ventajas de testear los primeros 5 o 6 cm. vs. 12, en suelos con distinta historia agrícola o más o menos prístinos. Con SD, además, pueden interesar otros segmentos de estratificación inducida. Para agua y nutrientes móviles, parece adecuado y razonable indicar 2 o 3 profundidades, ya sea en diagnóstico o investigación

También el instrumento/herramienta de muestreo, aunque no es objeto de este apartado, debe ser objeto de norma. Aun muchos laboratorios (públicos y privados) incluyen la pala como instrumento alternativo al específico, admitiendo -además- parte del procesamiento a campo. No hace falta abundar en estas innecesarias fuentes de variación que, al igual que la profundidad de muestreo, luego no son revertidas o atenuadas en las etapas siguientes.

### Conclusiones

Mal podríamos trabajar en neutralizar o moderar la variabilidad espacial, si agregamos una fuente consistente en su componente vertical. Es difícil volver atrás con la modalidad ya adoptada, sobre todo en la pampa húmeda. Sería razonable, empero, que para indicadores de calidad de suelo se respete los horizontes genéticos, como una norma básica, al diseñar los sistemas analíticos

La profundidad de muestreo, según fines, es un parámetro relevante del proceso de análisis de suelos. Su variación, por lo tanto, no debería adoptarse sin consulta y consenso de la comunidad científica especializada y los servicios técnicos de distintas zonas. Las ventajas de uniformar algunas medidas, según propósitos, es innegable. La presente propuesta recoge antecedentes y criterios que esperan ser enriquecidos por otros aportes.

## La materia orgánica como indicador base de calidad del suelo

Adrián Enrique Andriulo<sup>1</sup> y Alicia Beatriz Irizar<sup>1</sup>

### Tendencia general en la captura de carbono en el suelo

El incremento de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, y el consecuente cambio climático tendrán efectos importantes (positivos y/o negativos) en el siglo XXI. Si se pretende reducir las emisiones de dichos gases e incrementar su captura en los suelos y en la vegetación, se deberá tomar un cierto número de medidas tecnológicas que estén acompañadas por el desarrollo de nuevas estrategias y políticas apropiadas para el manejo de la agricultura y los bosques.

Una de las estrategias disponibles para mejorar la resiliencia de los agroecosistemas es aumentar las reservas de materia orgánica del suelo (MOS), las cuales están relacionadas con efectos signifi-

cativos directos en sus propiedades y con un impacto positivo sobre las cualidades ambientales o agrícolas y sobre la biodiversidad. Las consecuencias incluirán mayor fertilidad del suelo y mayor productividad de la tierra para la producción de alimentos y la seguridad alimentaria. (FAO, 2002)

La MOS es un indicador clave de la calidad del suelo, tanto en sus funciones agrícolas como en sus funciones ambientales -entre ellas captura de C y calidad del aire. Además, es la principal determinante de su actividad biológica. La diversidad, la cantidad y la actividad de la fauna del suelo y de los microorganismos están directamente relacionadas con ella. La MOS y la actividad biológica

---

1. INTA, Estación Experimental Pergamino. Pergamino, 2700, Buenos Aires, Argentina.

que ésta genera tienen gran influencia sobre las propiedades químicas y físicas de los suelos. La agregación y la estabilidad de la estructura aumentan con su contenido. Éstas, a su vez, incrementan la tasa de infiltración y la capacidad de agua disponible, así como la resistencia contra la erosión hídrica y eólica. También mejora la dinámica y la biodisponibilidad de los principales nutrientes para las plantas.

La MOS tiene una composición diversa y compleja en la que se pueden identificar varias fracciones. Estas fracciones tienen un papel muy diferente en el suelo y es necesario reconocer estas diferencias. Una consecuencia de la diversidad de materiales y funciones es que al agregar materia orgánica para mantener o mejorar su contenido en el suelo, el simple aumento en su contenido total puede no traer los beneficios esperados. Esto indica que también es necesario tener en cuenta la naturaleza, así como la cantidad de material orgánico añadido, su volumen y ubicación. Son importantes para su manejo la naturaleza y la cantidad de los residuos frescos y los flujos que se generan con la incorporación de fracciones lábiles. Si bien estamos muy lejos de comprender todas las funciones de la MOS e incluso en los casos donde se han identificado relaciones con las propiedades del suelo y las funciones, a menudo, no se entiende completamente la naturaleza de dichas relaciones. Sin embargo, está claro que la MOS dispara una serie de funciones clave que influyen en muchas de las actividades llevadas a cabo en la superficie de la tierra: una función global, a través del ciclo de C, y diferentes funciones en relación a la nutrición de las plantas, a los organismos del suelo (biodiversidad) y al medio ambiente y su gestión sostenible. Por lo tanto, es imprescindible mantener las existencias de MOS y en los casos en que éstas se han reducido de forma significativa, hay que aumentarlas. En la actualidad no hay claridad sobre lo que debería ser el umbral objetivo

de los niveles de MOS, pero está universalmente reconocido que una acción clave en la mayoría de los sistemas con suelos degradados es añadir materiales orgánicos y mejorar el contenido de MOS con prácticas agrícolas adaptadas.

La mayoría de los suelos del mundo bajo agricultura han sido esquilados de su MOS después de la aplicación de sistemas convencionales de labranza manual o mecánica, en comparación con su situación original bajo cubierta vegetal natural. Sin embargo, se ha constatado que este proceso de degradación es reversible. En muchos de los predios de agricultores, en climas húmedos y subhúmedos y en cultivos bajo riego, el contenido de MOS se ha incrementado después de cambiar las prácticas de manejo de suelos hacia la agricultura de conservación, incluyendo la labranza mínima y la SD. Incluso en condiciones semiáridas, el sistema de SD resulta eficiente, si bien con menores tasas de captura de C. La medida del progreso de la captura de C en los suelos agrícolas es técnicamente posible, pero hasta el momento, raramente ha sido hecha más allá de niveles experimentales. Para su implementación, las organizaciones regionales de suelos deberían realizar una supervisión sistemática del suelo por medio de una combinación de lugares permanentes de monitoreo, lugares de muestreo bien distribuidos, combinados con la descripción del manejo de la tierra por parte de los agricultores y la teledetección de la cobertura del suelo (FAO, 2002).

#### **Evaluación de las reservas de MOS y sus principales cambios**

En los próximos 25 años, para estimar el potencial de captura de C en el suelo bajo distintos escenarios (Batjes, 1999) será necesario distinguir dos aspectos: cuál es la existencia (reserva) actual de MOS y cuáles son los cambios en las existencias. Hay varios problemas importantes que deben ser

resueltos y también resultan escasos los datos de campo sobre los diferentes factores de control en nivel de C del suelo en periodos de 20 años, tales como: tipo de suelo, condiciones climáticas, uso de la tierra y prácticas agrícolas.

En general, los cambios producidos en los sistemas de cultivo de nuestro país en las últimas décadas fueron masivamente adoptados sin una evaluación previa de su posible impacto sobre las reservas de MOS en el largo plazo. La magnitud y el sentido de los efectos de los principales cambios tecnológicos introducidos en el escenario agrícola nacional de los últimos 30 años sobre la reserva de MOS han sido muy poco estudiados. Por ello, resulta imperativo evaluar la efectividad de los diferentes sistemas de cultivo para mitigar el efecto invernadero en la región (Irizar, 2010).

En sistemas bajo agricultura continua, el sistema de labranza y la secuencia de cultivo son los principales reguladores del ciclo y el almacenamiento de MOS (Paustian et al., 1997). Generalmente, se acepta que los sistemas de labranza afectan principalmente a la tasa de descomposición de MOS y a su pérdida por erosión, y que la secuencia de cultivos afecta, mayormente, a la cantidad C aportado (Rasmussen et al., 1980; Havlin et al., 1990; Porter et al., 1997). Si bien algunos estudios concluyeron que la reducción de las labranzas podría acumular más C en el suelo respecto a una rotación de mayor complejidad (West & Post, 2002; Apezteguía et al., 2000; Bayer et al., 2000), existe poca información al respecto.

El tipo de labranza influye sobre la localización de los residuos en el perfil del suelo. El laboreo produce una relocalización de los residuos de los cultivos. En cambio, la SD deja todos los residuos aéreos sobre la superficie del suelo, originando efectos importantes sobre su funcionamiento. Estos efectos incluyen el aumento de la DAP y menor aireación, mayor estabilidad de agregados,

menor temperatura y amplitud térmica, aumento en el contenido de humedad del suelo y menor contacto de los residuos con el nitrógeno mineral del suelo (Balesdent et al., 2000). Sus combinaciones tienen un impacto muy pronunciado sobre la mineralización de la MOS (Oorts et al., 2006). La gran dispersión obtenida en las tasas de acumulación de C bajo SD de diferentes partes del mundo pueden estar relacionadas con diferencias en el clima, los sistemas de cultivo, la fertilización, la profundidad de laboreo, el tipo de laboreo, las características de suelo, y también en las profundidades de muestreo (Franzluebbers, 2004). Se debe tener en cuenta que la duración de estas tasas de cambio no es permanente y que el C podría alcanzar un nuevo equilibrio en 15-20 años (West & Post, 2002).

La secuencia de cultivo altera el momento, ubicación, cantidad y calidad de los aportes de residuos de cultivo, afectando el tamaño, la tasa de reciclado y la distribución vertical de los compartimentos de C y nitrógeno (N) (Franzluebbers et al., 1994). Además, la intensificación de la rotación actúa favorablemente sobre el balance de MOS (Wright & Hons, 2005; Dou et al., 2007). En climas más cálidos y húmedos, permite realizar un uso más eficiente de las condiciones ambientales, y al producirse mayor biomasa de residuos a través del año, existen, en el largo plazo, mayores oportunidades para ingresar C al suelo vía fotosíntesis y de lograr mayores reservas de MOS (Franzluebbers, 2004). Además, al existir un aumento de tiempo de ocupación del suelo por raíces vivas, los exudados radicales estimulan la actividad microbiana, favoreciendo la agregación (Puget & Drinkwater, 2001; Deneff & Six, 2006). A su vez, la rotación de residuos de diferente calidad produce el mismo efecto (Luo et al., 2010). Por otro lado, la desaparición o disminución del período de barbecho contribuye a aumentar las reservas de MOS (Campbell et al., 1991, 2000).

Los problemas que surgen frecuentemente al comparar resultados de investigaciones del efecto de los sistemas de labranza y/o secuencias de cultivo sobre el COS, son la profundidad hasta la que se realiza el muestreo, la que debería alcanzar al menos la profundidad de laboreo (Franzluebbers, 2004), y la expresión de los resultados. Estos últimos pueden expresarse como concentración (% g kg<sup>-1</sup>), como stock (Mg ha<sup>-1</sup>) a profundidad constante, o como stock (Mg ha<sup>-1</sup>) en masa equivalente de suelo. La utilización de la última expresión tiene en cuenta la variación de la  $\rho_{\text{ap}}$  con la profundidad entre diferentes sistemas de labranza y/o sistemas de cultivo, y se la recomienda para evitar errores de sub o sobreestimación (Powelson & Jenkinson, 1981; Lal et al., 1998; Balesdent et al., 2000).

Además, cuando se comparan secuencias de cultivo y/o sistemas de labranza, las diferencias en MOS entre los tratamientos y su evolución en el largo plazo están afectadas por otros factores adicionales: climáticos (precipitación, temperatura), edáficos (textura, pendiente, reserva inicial de MOS), profundidad, momento de muestreo y expresión de los resultados. La magnitud y sentido de variación de cada uno de ellos y su interacción con las secuencias de cultivo y los sistemas de labranza es compleja. La fuerte interacción entre las variables en juego ha sido señalada por Lal et al. (1998) y por Paustian et al. (1997). Debido a que la gran cantidad de cambios tecnológicos introducidos en los sistemas de cultivo poseen impactos diversos sobre el ciclo de la MOS, deberían estudiarse los efectos separados de la secuencia de cultivos, del sistema de labranza, de la fertilización nitrogenada y de sus interacciones sobre el balance de la MOS. Para poder aislar los efectos de las secuencias y los sistemas de labranza sobre la evolución de la MOS en el largo plazo, es imprescindible controlar experimentalmente estas fuentes de variación adicionales. Esto se puede lograr, utilizando ensayos a campo con situación

de partida conocida, suelos con muy poca variabilidad textural y sin fases por erosión, el mismo momento de muestreo para todos los tratamientos analizados, cuya profundidad de muestreo incluya, al menos, la profundidad de laboreo y permita expresar los resultados a igual masa de suelo (OECD, 2002).

Uno de los grandes desafíos agronómicos actuales es encontrar sistemas de cultivos que mantengan o aumenten las reservas de MOS en los agroecosistemas y contribuyan a mitigar el efecto invernadero.

#### **Propuesta de un sistema de supervisión de tierras para verificar la captura de carbono (FAO)**

Será necesario contar con herramientas para la supervisión, la verificación o la certificación, de modo de poner en claro los cambios en los depósitos de C en relación con el tipo de suelo, las condiciones climáticas, la ocupación de la tierra y las diferentes prácticas de manejo. Las parcelas permanentes georreferenciadas constituyen un apoyo para la descripción de los perfiles y el muestreo para las determinaciones analíticas y la conservación de las muestras. Debe realizarse la descripción actual y anterior de la ocupación de la tierra y de las prácticas agrícolas. Es necesario considerar que un plazo de cinco a diez años es el período mínimo apropiado para supervisar cambios en los depósitos de C. La red debería estar unida a una base de datos digitales relacionados con datos de suelos y ocupación de la tierra, pero también con otras bases de datos de condiciones biofísicas o socioeconómicas que permitan la determinación de la distribución espacial en distintas escalas (nacional, regional). Unos pocos lugares pueden ser seleccionados por ecorregiones y ocupación de la tierra con diferentes prácticas y ser supervisados con más equipos a fin de obtener una evaluación más detallada de las existencias de C -por ejemplo, usando isótopos de C que

permitan la identificación de la fuente de MOS en el caso de la conversión del uso de la tierra de C3 a C4 o viceversa- y para medir los flujos del C.

#### **Conclusión**

El desarrollo de la agricultura pasada se tradujo en una disminución de las reservas de MOS creadas durante un período de larga evolución. En muchas de las tierras cultivadas, sobre todo en las regiones áridas y semiáridas, esto ha llevado a una reducción de la productividad de la tierra debido a su degradación y a la desertificación. Se ha demostrado que es posible revertir esa tendencia, si se cambia el tipo de agricultura. Los suelos pueden secuestrar en 25 años más del 10% de las emisiones antropogénicas. Al mismo tiempo, esto proporciona otros beneficios importantes para el suelo, los cultivos, la calidad del ambiente, la prevención de la erosión y la desertificación y para el fortalecimiento de la biodiversidad. La agricultura, las tierras de pastoreo y las sabanas tienen el potencial para almacenar C, siendo prioritario generar prácticas agrícolas que mejoren el almacenamiento del C y la productividad. Nuestra atención debería ser dirigida a estos beneficios potenciales y a la necesidad de iniciar la recolección de datos y el análisis de las existencias y flujos del carbono, en escala piloto, en diferentes sitios seleccionados. También es necesario definir algunas prioridades para las tierras degradadas con medidas adaptadas para las tierras cultivadas, pasturas y agrosilvicultura. Se conoce la existencia de deficiencias en los datos asociados con las extrapolaciones regionales y globales, justificando los análisis cuantitativos y los problemas para medir e interpretar los datos de campo sobre el flujo del C. Nuestro rol debería basarse en validar y promover los conceptos; en ayudar a medir, supervisar, modelar, y finalmente en organizar redes para desarrollar y adaptar soluciones prácticas.

## Bibliografía

Apezteguía, HP; HP Salas; E. Lovera & R Sereno. 2000. El efecto de labranzas y rotaciones sobre la conservación de la materia orgánica edáfica. 11th International Soil Conservation Organization Conference, ISCO 2000. Buenos Aires.

Balesdent, J; C Chenu & M Balabane. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil Till. Res.* 53: 215-230.

Batjes, NH. 1999. Management options for reducing CO<sub>2</sub>- concentrations in the atmosphere by increasing carbon sequestration in the soil. ISRIC. Wageningen, The Netherlands. 114 pp.

Bayer, C; J Mielniczuk; TJC Amado; L Martín-Neto & SV Fernández. 2000. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil Till. Res.* 54: 101-109.

Campbell, CA; VO Biederbeck; RP Zentner & GP Lafond. 1991. Effect of crop rotations and cultural practices on soil organic matter, microbial biomass and respiration in a thin Black Chernozem. *Can. J. Soil Sci.* 71: 363-376.

Campbell, CA; RP Zentner; EG Gregorich; G Roloff; BC Liang & B Blomert. 2000. Organic carbon accumulation in soil over 30 years in a semiarid southwestern Saskatchewan : Effects of crop rotations and fertilizers. *Can J. Soil. Sci.* 80: 179-192.

Denef, K & J Six. 2006. Contributions of incorporated residue and living roots to aggregate-associated and microbial carbon in two soils with different clay mineralogy. *Eur. J. Soil Sci.* 57: 774-786.

Dou, F; AL Wright & FM Hons. 2007. Depth distribution of soil organic C and N after long term soybean cropping in Texas. *Soil Till. Res.* 94: 530-536.

FAO. 2002. Informe sobre recursos mundiales de suelos. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Disponible en: <http://ftp.fao.org/docrep/fao/004/y2779S/y2779s00.pdf>. Consultada el: 15/12/2011.

Franzluebbers, AJ; FM Hons & DA Zuberer. 1994.

Long term changes in soil carbon and nitrogen pools in wheat management systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1639-1645.

Franzluebbers, AJ. 2004. Tillage and residue management effects on soil organic matter. Pp. 227-268. In: Magdoff, F & RR Weil (eds). *Soil organic matter in sustainable agriculture*. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, 33431.

Havlin, JL; DE Kissel; LD Maddux; MM Claassen & JH Long. 1990. Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 448-452.

Irizar, A. 2010. Cambios en las reservas de material orgánica del suelo y sus fracciones granulométricas: efecto de la secuencia de cultivo, del sistema de labranza y de la fertilización nitrogenada. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Buenos Aires. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

Lal, R; J Kimble; RF Follet & CV Cole (eds). 1998. The potential of U.S. Cropland to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. CRC Press, Boca Raton, Florida. 104 pp.

Luo, Z; E Wang & OJ Sun. 2010. Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments. *Agric. Ecosyst. Environ.* 139: 224-231.

OECD. 2002. Expert Meeting on Soil Organic Carbon Indicators for Agricultural Land. Ottawa, Canadá.

Oorts, K; B Nicolardot; R Merckx; G Richard & H Boizard. 2006. C and N mineralization of undisturbed and disrupted soil from different structural zones of conventional tillage and no-tillage systems in northern France. *Soil Biol. Biochem.* 38: 2576-2586.

Paustian, K; HP Collins & E Paul. 1997. Management controls on soil carbon. Pp. 15-49. In: Paul, EA; K Paustian; ET Elliot & CV Cole (eds). *Soil organic matter in temperate agroecosystems: long-term experiments in North America*. CRC Press Lewis Publishers, div. of CRC Press, Boca Raton,

Florida. 33431.

Powlson, DS & DS Jenkinson. 1981. A comparison of the organic matter, biomass, adenosine triphosphate and mineralization nitrogen contents of ploughed and direct-drilled soils. *J. Agric. Sci. Cambridge* 97: 713-721.

Porter, KN; OR Jones; HA Torbert & PW Unger. 1997. Crop rotation and tillage effects on organic carbon sequestration in the semiarid southern Great Plains. *Soil Sci.* 162: 140-147.

Puget, P & LE Drinkwater. 2001. Short-term dynamics of root- and shoot-derived carbon from a leguminous green manure. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 771-779.

Rasmussen, PE; RR Allmaras; CR Rhode & NC Roager. 1980. Crop residue influences on soil carbon and nitrogen in a wheat-fallow system. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 596-600.

West, TO & WM Post. 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1930-1946.

Wright, AL & FM Hons. 2005. Soil carbon and nitrogen storage in aggregates from different tillage and crop regimes. *Soil Biol. Biochem.* 69: 141-147.

## El estado estructural como indicador de calidad de suelo bajo siembra directa

María Carolina Sasal<sup>1</sup>, Adrián Enrique Andriulo<sup>2</sup>, Hubert Boizard<sup>3</sup>,  
Joel Leonard<sup>4</sup> y Marcelo Germán Wilson<sup>1</sup>

### Introducción

La evolución del funcionamiento físico de los suelos y su relación con la dinámica del agua son aspectos clave en la sustentabilidad ambiental de los agroecosistemas. No es posible manejar sustentablemente un medio tan complejo y vulnerable como el suelo a menos que comprendamos sus atributos, funciones internas e interacciones con el ambiente (Hillel, 2004). Los indicadores de calidad permiten conocer las tendencias a la recuperación o a la degradación del recurso suelo bajo determinadas prácticas de manejo y eventualmente generar alertas tempranas.

El comportamiento físico de los suelos limosos de

clima húmedo ha sido considerablemente estudiado. En general, se caracterizan por su susceptibilidad a compactarse, a formar estructura masiva y homogénea (Voorhees & Lindstrom, 1984; Alakukku, 1998). La escasa capacidad natural de regeneración de porosidad se agrava en suelos bajo uso agrícola debido al tránsito continuo y no controlado de implementos agrícolas y se mitiga con labores de remoción del suelo. Sin embargo, es también ampliamente conocido que el laboreo convencional conduce a la degradación de suelos agrícolas, la cual incluye pérdidas de espesor del suelo por erosión y reducción de los stocks de

---

<sup>1</sup> INTA, Estación Experimental Paraná. Oro Verde 3101, Entre Ríos, Argentina.

<sup>2</sup> INTA, Estación Experimental Pergamino. Pergamino 2700, Buenos Aires, Argentina.

<sup>3</sup> INRA, UPR 1158 Agrolmpact, site d'Estrées-Mons, F-80203 Péronne, France.

carbono y de nutrientes. La siembra directa (SD) resulta una práctica adecuada para mitigar procesos erosivos asociados a la labranza en Molisoles. Sin embargo, combinada con la simplificación de las secuencias de cultivos y particularmente con el monocultivo de soja, genera la necesidad de estudiar nuevos aspectos de la degradación física de los suelos cultivados.

La mayoría de los trabajos que describen características edáficas bajo SD abordan aisladamente la descripción de algunos indicadores de ciertas características de la porosidad edáfica, la agregación o algunas propiedades hidrológicas en situaciones contrastantes de tipos de suelo o climas luego de transcurrido cierto número de años de SD (Dabney et al., 2004; Hubbard et al., 2001; Kay & VandenBygaart, 2002; Lal & Vandoren, 1990). En general, la SD es comparada con situaciones testigo bajo labranza convencional. Sin embargo, los parámetros tradicionalmente utilizados para caracterizar la aptitud física de un suelo, como la densidad aparente, la distribución de poros por tamaño y la estabilidad de agregados, no permiten explicar las variaciones en la tasa de infiltración de lotes agrícolas bajo SD continua (Sasal et al., 2006). Tampoco permiten visualizar los cambios en la organización de las estructuras del horizonte superficial del suelo. En efecto, bajo SD, la ausencia de labores tiene como efecto indirecto la ausencia de homogeneización de propiedades edáficas.

Es escasa la bibliografía sobre la evolución de la estructura del suelo bajo SD y raramente se realiza un análisis integrado entre las modificaciones inducidas en los estados estructural e hídrico del suelo. En el estudio de la organización estructural de suelos limosos sin remoción, cobran relevancia las escalas de tiempo y espacio analizadas. Particularmente, Argentina carece de una cronosecuencia de mediciones reproducibles de la estruc-

tura de suelos bajo SD para analizar y comprender su evolución desde su adopción masiva en la década de 1990. En efecto, resulta necesario tener una mirada integral y dinámica del funcionamiento del suelo y adecuada al sistema de SD.

Para poder analizar la evolución de la estructura, es necesario valerse de una metodología adecuada que permita evaluar la variación temporal y espacial de la estructura observada a campo, integrando los estados estructural e hídrico del suelo (Roger-Estrade et al., 2004; Boizard et al., 2016). La técnica del perfil cultural es un método semi-cuantitativo de descripción morfológica de la estructura de suelos cultivados. Permite diferenciar visualmente distintas estructuras en el perfil de suelo, clasificarlas por las características macroscópicas que le imprimen los sistemas de cultivo y mapearlas (Manichon 1987), sin generar disturbios como se haría con un muestreo o un tamizado, e independientemente de la humedad del suelo al momento de la medición (Boizard et al., 2002). En los últimos años, el alcance de esta metodología se ha potenciado al ser combinada con el análisis de imágenes (fotografías parciales del perfil).

La complementación de la técnica del perfil cultural con el análisis del sistema de porosidad permite corroborar en laboratorio, los tipos de estructura identificados visualmente a campo (Stengel, 1979). Sin embargo, no exime al primer método de la subjetividad que imprime la habilidad del operador, al delimitar zonas o espesores correspondientes a los distintos tipos de estructura. Por ello se propone la medición de resistencia al corte de suelos (RC) como herramienta de medición in situ, para discernir cuantitativamente qué tipo de estructura se presenta en cada perfil analizado. (Sasal et al., 2016)

### Estado estructural del horizonte superficial de Argiudoles bajo siembra directa

La mayoría de los trabajos que describen el estado estructural del horizonte superficial de los Argiudoles bajo SD, informan densificación del horizonte por aumento en la cohesión de las partículas del suelo cuando se suspenden los labores (Senigagliesi & Ferrari, 1993; Taboada et al., 1998; Cosentino & Pecorari, 2002), o por capas compactadas por tránsito o por antiguos pisos de arados o rastras (Alakukku et al., 2003). Sin embargo, la evolución de la estructura masiva o la caracterización de otros tipos de estructura presentes bajo SD son, al presente, aspectos considerablemente menos estudiados.

En los últimos años, diversos trabajos en suelos limosos bajo SD (Alvarez et al., 2009; Ball & Robertson, 1994; Bonel et al., 2005; Morrás et al., 2004; Pagliai et al., 1983; Sasal et al., 2006; Shipitalo & Protz, 1987; Soracco et al., 2010; VandenBygaart et al., 1999), han registrado una estructura laminar (con agregados alargados orientados paralelamente a la superficie del suelo) dentro de los primeros diez centímetros del horizonte superficial (Figura 1). La presencia de estructura laminar constituye un aspecto de importancia dado que restringe el ingreso de agua al suelo (Sasal et al. 2010).



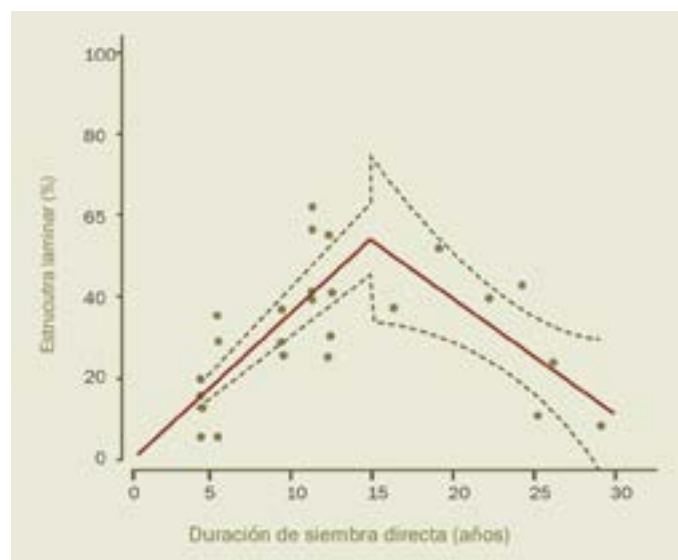
**Figura 1.** Estructura laminar de los primeros centímetros de un Argiudol típico bajo SD. Ensayo de largo plazo (INTA Pergamino).



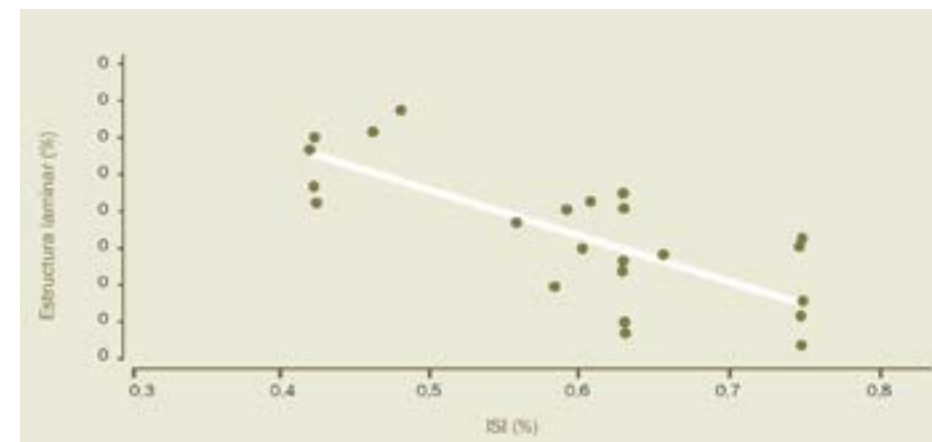
En estudios realizados en el centro-norte de la Pampa húmeda, región relativamente homogénea respecto a tipo de suelo, clima y características de la agricultura, el método del perfil cultural con análisis de imágenes fue la metodología seleccionada para conocer la organización estructural de suelos limosos bajo SD, poner en evidencia la extensión regional de la estructura laminar y estudiar su evolución, (Sasal et al., 2016). En lotes de distinta antigüedad de SD, se analizó la magnitud de la extensión de la estructura laminar. El 100% de los lotes muestreados presentó estructura laminar. Este resultado fue posible de hallar gracias a la utilización de la aproximación del perfil cultural, que permite la observación del horizonte superficial del suelo en pozos de gran tamaño, dado que la realización de pozos tradicionales, pequeños y para extracción de muestras a profundidades fijas no hubiera permitido identificar estructuras laminares muy delgadas o discontinuas.

El estudio a escala regional de la estructura laminar, permitió identificar algunos factores condicionantes de su proporción en el horizonte superficial. Para ello, se consideró la antigüedad de SD de cada lote muestreado y se incorporó al análisis el índice de intensificación de la secuencia (ISI), que integra características de los sistemas de cultivo difíciles de cuantificar, como la duración de los barbechos, los momentos de siembra y cosecha, y la continuidad de la actividad biológica asociada a las raíces activas en el suelo. (Novelli et al., 2013)

Los perfiles culturales realizados consecutivamente en distintos ensayos, muestran que la proporción de los distintos tipos de estructuras es dinámica en el corto plazo y aún luego de más de 20 años de establecidas las secuencias de cultivos. La proporción de estructura laminar en el perfil está asociada con el número de años bajo SD (Figura 2) y la intensificación de la secuencia de cultivos (Figura 3).



**Figura 2.** Relación entre la proporción de estructura laminar (cp) en el perfil del horizonte superficial y los años bajo SD en la pampa húmeda norte (puntos negros= observaciones, línea roja= modelo lineal-fitted piecewise, línea gris cortada= 95% intervalo de confianza).



**Figura 3.** Regresión lineal entre la proporción de estructura laminar (%) y el índice de intensificación de la secuencia (ISI)

### Efecto del estado estructural de Argiudoles bajo siembra directa sobre la dinámica del agua

La disponibilidad de parcelas de escurrimiento con 10 años de SD en la EEA INTA Paraná (Figura 5) y diferentes secuencias de cultivos, permitió contar con una amplia gama de proporciones de estructuras en el perfil de horizonte A, y encontrar funciones para relacionarlas con algunos

componentes del balance de agua. Se realizó la medición directa de escurrimiento y la utilización del trazador Blue Brilliant para visualizar el movimiento del agua en el suelo. Estas técnicas no son novedosas en sí mismas, sino en su aplicación.



**Figura 4.** Parcelas de escurrimiento de INTA EEA Paraná

Se demostró que la estructura laminar altera el patrón de drenaje, restringe el ingreso de agua al suelo y aumenta el escurrimiento superficial en función de su proporción en el perfil del ho-

rizonte A. La proporción de estructuras laminar y granular explicaron el 80% de la variación del escurrimiento (Figura 6).

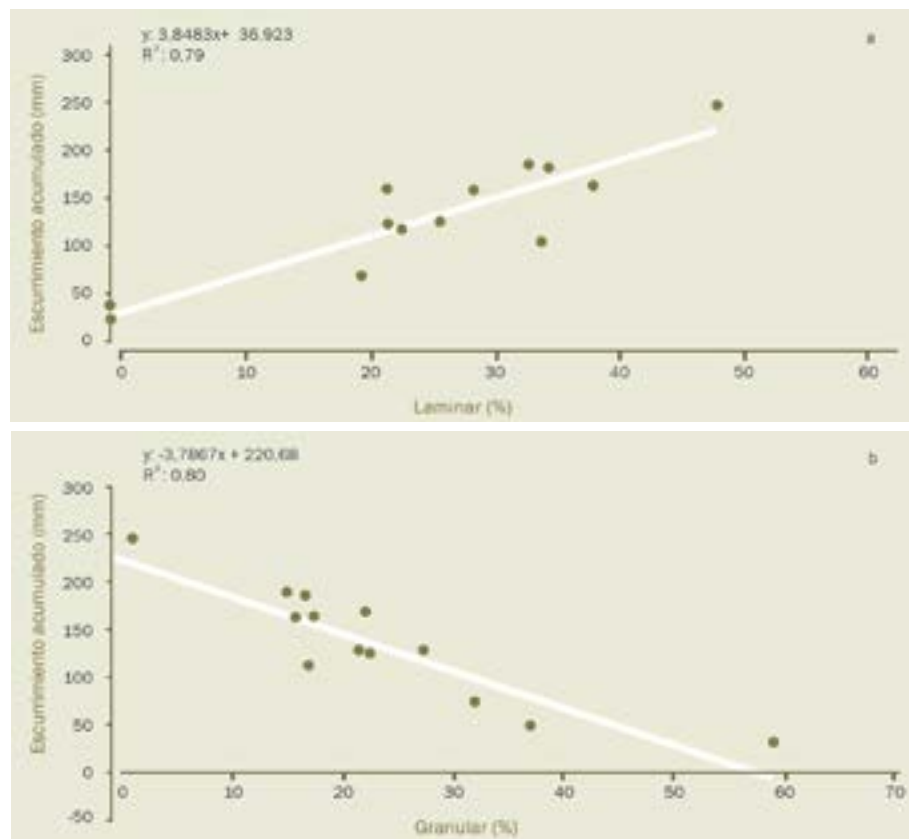


Figura 5. Regresión lineal entre porcentaje de estructura laminar (a) o granular (b) y escurrimiento acumulado promedio de cuatro campañas analizadas.

Los porcentajes de estructura laminar y granular explicaron el 70 y el 60% de la variación del espesor coloreado con el trazador, respectivamente ( $p < 0,01$ ). Es decir, que a mayor proporción de estructura laminar y menor proporción de estructura granular, el espesor coloreado por el trazador fue menor. De esta manera, puede visualizarse el efecto negativo de la estructura laminar y positivo de la estructura granular superficial sobre el ingreso de agua al suelo. En la figura 7 puede

observarse la relación negativa entre el espesor de suelo que fue coloreado con el trazador y el escurrimiento acumulado promedio. El espesor coloreado explicó un 87 % de la variación del escurrimiento promedio de las cuatro campañas. Aplicando una regresión múltiple ( $y = 133,11 - 2,11 * \text{granular} + 1,95 * \text{laminar}$ ), la combinación de la estructura laminar y la granular explican el 85 % de la variación del escurrimiento promedio.

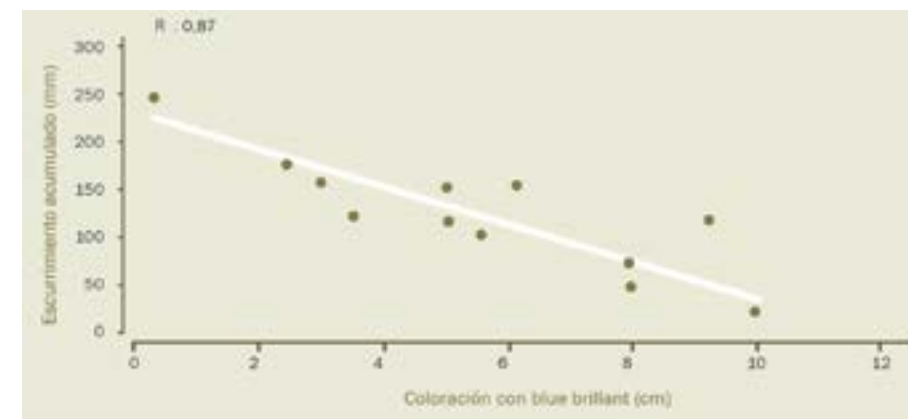


Figura 6. Correlación entre espesor coloreado con trazador Blue Brilliant y escurrimiento acumulado promedio de cuatro campañas analizadas.

La secuencia de cultivos implementada bajo SD condiciona la formación y las características de esta estructura. La comparación de distintas secuencias, características de la región, y con la misma antigüedad de SD indicó que el ingreso

de agua al suelo fue mayor en las secuencias de cultivos más intensificadas (>ISI) (Figura 8). Así, el ISI se robustece como indicador, no sólo del estado estructural, sino también del funcionamiento hídrico del horizonte superficial del suelo.

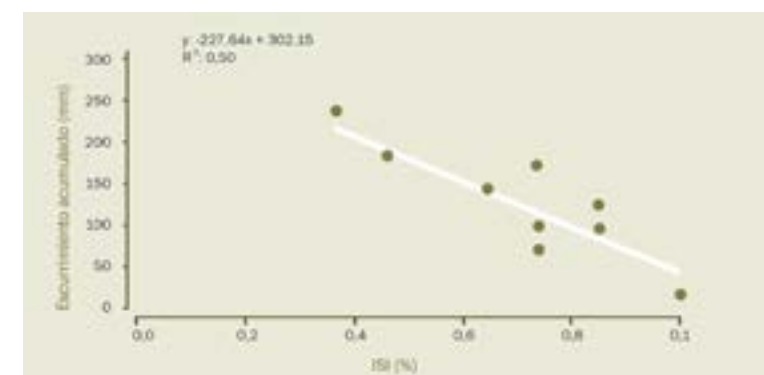


Figura 7. Regresión lineal entre el índice de intensificación de la secuencia (ISI) y el escurrimiento acumulado promedio de cuatro campañas (mm).

La descripción del estado estructural edáfico bajo SD resultó indicadora de efectos negativos de la simplificación del sistema de cultivo, evidenciado en la expansión del monocultivo de soja, sobre la sustentabilidad del agroecosistema. Entre estos

efectos negativos se destacan la formación de estructura laminar de considerable espesor, la ausencia de estructura granular superficial, la menor proporción de macroporos mayores a 300  $\mu\text{m}$  y la baja estabilidad de la estructura gamma subya-

cente y en consecuencia, la restricción al ingreso del agua que favorece el escurrimiento superficial. Por ejemplo, un aumento de la proporción de estructura laminar en el horizonte superficial de 20 a 50% puede duplicar las pérdidas de agua por escurrimiento.

Las secuencias más intensificadas en la región son las que presentan trigo, ya que es el principal cultivo de invierno y precede a una soja de segunda fecha de siembra. De esta manera, se mantiene el suelo con elevado tiempo de ocupación, similar al tiempo que ocuparía una pastura. Además, el trigo se siembra con poca distancia entre hileras y así puede favorecer la interrupción de capas continuas de estructura laminar con sistemas radicales en cabellera y la formación de estructura granular superficial. Un incremento del 10 a 20% en la proporción de estructura granular en el horizonte superficial puede reducir las pérdidas de agua por escurrimiento en un 20%.

### Consideraciones finales

La caracterización del estado estructural de suelos en SD permite detectar patrones estructurales favorables o desfavorables y caracterizarlos, resultando un buen indicador de la dinámica del agua a la escala de lote. A partir de estos resultados, la descripción de la organización estructural con el método del perfil cultural adquiere mayor relevancia y se comprueba su valor como herramienta de diagnóstico para predecir el ingreso de agua al suelo. Además, las ecuaciones generadas permiten identificar, mediante el índice ISI, secuencias de cultivos con proporciones de estructuras laminar y granular que mejoran la captación de agua para aumentar rendimientos de cultivos y minimizar riesgos ambientales asociados a las pérdidas de agua por escurrimiento.

La valorización de herramientas de diagnóstico para detectar las causas de mal funcionamiento estructural disponibles permitirá dar precisión a la toma de decisiones para mejorar la planificación de las secuencias de cultivos a implementar. Por ejemplo, la bibliografía indica que la clásica medición de conductividad hidráulica, tanto a campo como en laboratorio, no ha resultado un buen indicador del ingreso del agua al suelo y de los cambios generados en el suelo por su uso. Sin embargo, la complementación de la técnica con la aplicación del trazador Blue Brillant permitió visualizar el efecto negativo de la estructura laminar y positivo de la estructura granular superficial sobre el ingreso de agua al suelo.

### BIBLIOGRAFÍA

Alakukku, L. 1998. Properties of compacted fine-textured soils as affected by crop rotation and reduced tillage. *Soil Till. Res.*, 47:83-89.

Alakukku, L., Weisskopf, P., Chamen, W.C.T., Tijink, F.G.J., Van der Linden, J.P., Pires, S., Sommer, C. y Spoor, G. 2003. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: A review. Part 1. Machine/soil interactions. *Soil Till. Res.*, 73:145-160.

Alvarez, C.R., Taboada, M.A., Gutierrez Boem, F.H., Bono, A., Fernandez, P.L. y Prystupa, P. 2009. Topsoil Properties as Affected by Tillage Systems in the Rolling Pampa Region of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 73: 1242-1250.

Ball, B.C. y Robertson, E.A.G. 1994. Effects of soil water hysteresis and the direction of sampling on aeration and pore function in relation to soil compaction and tillage. *Soil Till. Res.*, 32:51-60.

Boizard, H., Richard, G., Roger-Estrade, J., Dürr, C. y Boiffin, J. 2002. Cumulative effects of cropping systems on structure of the tilled layer in northern France. *Soil Till. Res.*, 64:149-164.

Boizard, H., Yoon, S.W., Leonard, J., Lheureux, S., Cousin, I., Roger-Estrade, J. y Richard, G. 2013. Using a morphological approach to evaluate the effect of traffic and weather conditions on the structure of a loamy soil in reduced tillage. *Soil Tillage Res.* 127, 34–44. doi:10.1016/j.still.2012.04.007

Boizard, H.; Peigné J; Sasal MC; Guimaraes, M.F.; Piron, D.; Tomis, V.; Vian, F.; Cadoux, S.; Ralisch, R.; Tavares Filho, J.; Heddadj, D.; De Battista, J.; Duparque, A.; Franchini, J.C. y Roger-Estrade, J. 2016. Developments in the profil cultural method for an improved. *Soil Tillage Res.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2016.07.007>

Bonel, B., Morrás, H.J.M. y Bisaro, V. 2005. Modificaciones en la microestructura y la materia orgánica en un Argiudol bajo distintas condiciones de cultivo y conservación. *Ciencia del Suelo*, 23:1-12.

Cosentino, D.J. y Pecorari, C. 2002. Limos de baja

densidad: impacto sobre el comportamiento físico de los suelos de la región pampeana. *Ciencia del Suelo*, 20: 9-16.

Dabney, S.M., Wilson, G.V., McGregor, K.C. y Foster, G.R. 2004. History, residue, and tillage effects on erosion of loessial soil. *Trans ASAE*, 47:767-775.

Hillel, D. 2004. *Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier Academic Press. USA. 494 p.

Hubbard, R.K., Lowrance, R.R. y Williams, R.G. 2001. Preferential flow in clayey Coastal Plain soil as affected by tillage. *ASAE*, 261-262

Kay, B.D. y VandenBygaart, A.J. 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil Till. Res.*, 66: 107-118.

Lal, R. y Vandoren, D.M.Jr. 1990. Influence of 25 years of continuous corn production by three tillage methods on water infiltration for two soils in Ohio. *Soil Till. Res.*, 16:71-84.

Manichon, H. 1987. Observation morphologique de l'état structural et mis en évidence d'effets de compactage des horizons travaillés. Pp. 39-52 en Monnier, G., Goss, H.J. (eds). *Soil compaction and regeneration*. Balkema. Rotterdam. The Netherlands

Morrás, H.J.M., Tonel, B. y Michelena, R. 2004. Características microestructurales del horizonte superficial de algunos suelos pampeanos bajo siembra directa. En *Actas del XIX Congreso Arg. de la Ciencia del Suelo*, Paraná.

Novelli, L.E., Caviglia, O.P., Wilson y M.G., Sasal, M.C. 2013. Land use intensity and cropping sequence effects on aggregate stability and C storage in a Vertisol and a Mollisol. *Geoderma* 195-196: 260-267.

Pagliai, M., LaMarca, M. y Lucamante, G. 1983. Micromorphometric and micromorphological investigations of a clay loam soil in vitiviculture under zero and conventional tillage. *J. Soil Sci.*, 34:391-403.

Roger-Estrade, J., Richard, G., Caneill, J., Boizard,

H., Coquet, Y., Défossez, P. y Manichon, H. 2004. Morphological characterisation of soil structure in tilled fields: from a diagnosis method to the modelling of structural changes over time. *Soil Till. Res.*, 79: 33-49.

Sasal, M.C., Andriulo, A.E. y Taboada, M.A. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in argentinian pampas. *Soil Till. Res.*, 87:9-18.

Sasal, M.C., Castiglioni, M.G. y Wilson, M.G. 2010. Effect of crop sequences on soil properties and runoff on natural rainfall erosion plots under no tillage. *Soil Till. Res.*, 108:24-29.

Sasal, M.C.; Boizard, H.; Andriulo, A.; Wilson, M.G. y J. Léonard. 2016. Platy structure development under no-tillage in the northern humid Pampas of Argentina and its impact on runoff. *Soil Tillage Res.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2016.08.014>

Senigagliesi, C. y Ferrari, M. 1993. Soil and crop responses to alternative tillage practices. Pp. 27-35 en Buxton, D.R., Shibles, R., Forsberg, R.A., Blad, B.L., Asay, K.H., Paulsen, G.M., Wilson, R.F. (eds.). *International crops science I*. Madison, Wis., Crop Science Society of America, Inc.

Shipitalo, M.J. y Protz, R. 1987. Comparison of morphology and porosity of a soil under conventional and zero tillage. *Can. J. Soil Sci.*, 67: 445-456.

Soracco, C.G., Lozano, L.A., Sarli, G.O., Gelati, P.R. y Filgueira, R.R. 2010. Anisotropy of Saturated Hydraulic Conductivity in a soil under conservation and no-till treatments. *Soil Till. Res.*, 109:18-22.

Stengel, P. 1979. Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ. *Ann. Agron.*, 30: 27-51.

Taboada, M.A., Micucci, F.G., Cosentino, D.J. y Lavado, R.S. 1998. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina. *Soil Till. Res.*, 49:57-63.

VandenBygaert, A.J., Protz, R., Tomlin, A.D. y Miller, J.J. 1999. Tillage system effects on near-surface soil morphology: observations from the landscape to micro-scale in silt loams soils of southern Ontario. *Soil Till. Res.*, 51:139-149.

Voorhees, W.B. y Lindstrom, M.J. 1984. Long-term effects of tillage method on soil tilth independent of wheel traffic compaction. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48:152-156.

## Indicadores biológicos de calidad de suelo

Cecilia Videla<sup>1</sup>, Liliana Picone<sup>1</sup>

Con el fin de promover el desarrollo de una agricultura sustentable, es importante desarrollar indicadores de calidad de suelo que reflejen tempranamente los cambios a los que son sometidos los ecosistemas a través de las prácticas de manejo y que puedan ser empleados por agricultores, asesores agropecuarios e investigadores.

Particularmente, los indicadores biológicos de la calidad de suelo proveen información sobre los organismos vivos del suelo, y miden propiedades y procesos que permiten detectar, con la mayor sensibilidad, los cambios en las funciones del suelo. Miden propiedades del suelo dinámicas, es decir, aquellas que están más sujetas a cambios debido a la actividad del hombre y son fuertemente afectadas por las prácticas agronómicas.

Se considera importante monitorearlos porque estos indicadores biológicos responden más rápidamente a cambios en el manejo o en las condiciones ambientales que los indicadores físicos y químicos. Además de seleccionar cuáles propiedades biológicas cuantificar, es necesario tener en cuenta la variación espacial y temporal de las mismas. Debido a que la actividad de los organismos del suelo es fuertemente regulada por las condiciones ambientales, ellos presentan una gran variabilidad en el tiempo, por lo cual es importante considerar en función al objetivo del trabajo, si se realizarán muestreos estacionales o, de realizarse anuales, tener especial cuidado en hacerlos siempre en la misma época del año. Con respecto a la variación espacial, los indicadores que son altamente no homogéneos en su distribución requerirán un

<sup>1</sup>-Universidad Nacional de Mar del Plata, Facultad de Ciencias Agrarias.

muestreo más intensivo que aquellos más uniformemente distribuidos.

Uno de los determinantes más importantes de la calidad de suelo es la habilidad que tiene para descomponer residuos vegetales y animales, mantener adecuados tamaños de fracciones de nutrientes y de materia orgánica y actuar como un sistema de filtrado con capacidad de degradar o reducir compuestos tóxicos o peligrosos para proveer agua pura a los ríos, lagos y aguas subterráneas. Muchos de estos procesos son llevados a cabo, y por ende, regulados, por las actividades de los microorganismos (hongos, bacterias, protozoos, levaduras, etc.). A su vez, cualquier factor que afecte estas actividades, tiene gran efecto sobre la fertilidad del suelo y por ende en su calidad.

### Selección de indicadores biológicos

Para estimar la calidad del suelo se deben realizar observaciones o mediciones de diferentes propiedades o procesos y algunos de estos indicadores pueden ser combinados en la determinación de los índices de calidad del suelo o en un conjunto mínimo de datos (CMD).

Los indicadores deben ser limitados en número y manejables por los diferentes tipos de usuarios, simples y fáciles de medir, cubrir las mayores situaciones posibles (Doran & Zeiss, 2000, Cantú et al., 2007), incluyendo la variación temporal, y ser muy sensibles a cambios ambientales y al manejo del suelo (Dick et al., 2000).

La selección de estos indicadores depende tanto del suelo como de las funciones a evaluar, entre las que se incluyen: el soporte para el desarrollo de los organismos vivos, flujos de agua y de nutrientes, la diversidad y la productividad de plantas y animales, la eliminación o descontaminación

de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Esta selección depende también de la sensibilidad de estas propiedades a cambios en el manejo del suelo o en el clima, así como en su accesibilidad y utilidad para productores, especialistas en agricultura, conservacionistas y responsables de definir políticas de manejo (Doran & Parkin, 1996, Rezaei et al., 2006).

Por otra parte, muchas de las funciones del ecosistema suelo son difíciles de inferir directamente y, en consecuencia, la calidad del suelo a menudo debe inferirse a partir de otras propiedades más fácilmente medibles (Weil & Magdoff, 2004). Teniendo en cuenta la calidad del suelo, los indicadores se deben orientar principalmente hacia la detección de cambios o tendencias que se puedan medir en el tiempo. Sin embargo, algunos indicadores pueden cambiar más rápidamente que otros, por lo que los cambios detectados no sólo deben ser reales, sino también suficientemente sensibles en períodos cortos de tiempo, para que se pueda tomar una acción rápida a fin de corregir los problemas antes que ocurran situaciones no deseadas o pérdidas irreversibles de calidad del suelo.

Algunos autores sugieren que un indicador de calidad de suelo no es adecuado si no está directamente relacionado a quienes serán usuarios de la información que el indicador provea. Si el objetivo es desarrollar un índice para producción de cultivos, entonces la materia orgánica del suelo, la infiltración, la agregación, el pH, la biomasa microbiana, las fracciones de N, la densidad aparente, la conductividad eléctrica o la salinidad y la disponibilidad de nutrientes representan un grupo de indicadores que pueden usarse para describir la mayoría de las funciones básicas del suelo, como la capacidad de absorber, retener y liberar agua para las plantas, mantener la productividad y responder a los procesos de manejo y de erosión (Rezaei et al., 2006).

### Indicadores biológicos disponibles

Entre las propiedades o características biológicas que pueden incluirse en un índice de calidad de suelo o en un CMD para evaluar la calidad de un suelo, pueden incluirse mediciones de micro y macroorganismos y sus actividades o funciones. También pueden ser utilizados, la concentración o población de lombrices, nemátodos, termitas, hormigas, así como la biomasa microbiana, hongos, actinomicetes o líquenes, debido al rol que ejercen en el desarrollo y la conservación del suelo, ciclaje de nutrientes y fertilidad del suelo (Anderson, 2003). También pueden incluirse procesos metabólicos, como la evolución de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), utilizada como una medida de la actividad microbiana relacionada a la descomposición de la materia orgánica del suelo. Un índice muy utilizado es el cociente metabólico ( $q\text{CO}_2$ ), definido como la relación respiración:biomasa microbiana, y que está muy asociado con la mineralización de sustratos orgánicos por unidad de biomasa microbiana (Bastida et al., 2008).

Otros indicadores biológicos que han sido ampliamente estudiados son los compuestos químicos o productos metabólicos de organismos, particularmente algunas enzimas tales como celulasas, arilsulfatasa, fosfatasas, relacionadas con las funciones específicas de degradación de sustratos o a la mineralización de N, S o P orgánicos del suelo. Los ensayos de actividad enzimática del suelo actúan como indicadores potenciales de calidad de los ecosistemas al ser operativamente prácticos, sensibles, integradores, siendo descriptos como “huellas biológicas” de manejo pasado del suelo y se relacionan con las labranzas y la estructura del suelo (Dick, 2000). También pueden servir como indicadores biológicos de la calidad del suelo, las tasas de descomposición de residuos de plantas en bolsas, las mediciones de la cantidad de semillas de malezas, la presencia y cuantifica-

ción de la población de organismos patógenos (Janssens et al., 2006).

Relacionar las actividades de uno, o de unos pocos microorganismos de suelo con la calidad del suelo, es algo imposible de lograr ya que en el suelo viven miles de especies, la mayoría de ellas sin identificar aún, y de muchas de ellas aún no conocemos siquiera su función (Paul & Clark, 1996). Sumado a esto, también existe el inconveniente que el resultado de la actividad microbiana, por ejemplo la evolución de  $\text{CO}_2$  desde el suelo, es el resultado neto de complejas interacciones sustrato-microorganismo, involucrando a su vez, un vasto número de microbios del suelo. Para superar esta dificultad, se han desarrollado métodos para medir los microorganismos del suelo como una única e indiferenciada unidad o “caja negra”, llamada biomasa microbiana del suelo (Jenkinson & Powlson, 1976). Si bien tiene algunas limitaciones, este enfoque permite detectar la dirección de cambio (aumento o disminución) en la materia orgánica del suelo y el funcionamiento del ecosistema suelo debido, por ejemplo a incrementos en la concentración de metales, cambios en el pH o agregados de residuos de cultivos. El valor de la biomasa microbiana como un indicador o “alerta temprana” de los cambios en las condiciones del suelo, la ubica entre uno de los indicadores recomendados para monitorear las variaciones en la calidad de un suelo.

Actualmente, la mayoría de los programas de monitoreo de la calidad del suelo, incluyen mediciones de biomasa y respiración, aunque también se extienden a mineralización del nitrógeno, diversidad microbiana y algunos grupos funcionales de fauna edáfica. Mediciones más promisorias tales como la utilización de sustratos que da el perfil catabólico de la comunidad microbiana, el análisis de los ácidos grasos en las membranas celulares de organismos y de ácidos nucleico, que hacen a

la biodiversidad, son señaladas como indicadores biológicos de la calidad del suelo

Para la mayoría de los indicadores biológicos, hay poca evidencia disponible que relacione directamente el valor del indicador con la productividad o el riesgo de impacto ambiental negativo. Sin embargo, en suelos Argiudoles de la Región Pampeana, se ha demostrado que algunos indicadores biológicos, como la actividad enzimática (fosfatasas, ureasas, deshidrogenasas),  $qCO_2$  y carbono de la biomasa microbiana (CBM), presentan respuesta en suelos bajo manejo agrícola intensivo respecto al suelo de referencia o bajo manejos más conservacionistas, (Ferrerías et al., 2009).

### Valores de referencia

Un aspecto muy importante a tener en cuenta para una mejor interpretación de los indicadores de calidad de suelo, es disponer de datos de base o situación de referencia para comparar y determinar si ocurrieron impactos negativos o positivos sobre el ambiente. Además, deben determinarse variaciones en el tiempo y tasas de cambio, así como los indicadores locales, para definir posibles modelos a escalas mayores (Segnestam, 2002). Hay varias alternativas a fin de utilizar como valores de referencia:

- El mismo sitio en un momento más temprano (comparación longitudinal)
- Un sitio similar en otro lugar (comparación transversal)
- Un valor derivado de un rango de observaciones
- Un valor en un área natural sobre el mismo tipo de suelo

Otro aspecto importante a definir es el límite crítico, que es el rango de valores deseables de un indicador, el cual debe ser mantenido para el nor-

mal funcionamiento del ecosistema suelo (Arshad & Martin, 2002), por ejemplo, para la mayoría de los cultivos, el pH debe ser de 6.5-7.0. No obstante, si bien este concepto es práctico, dependiendo de la propiedad es difícil establecerlo debido a la variedad de factores que inciden en el mismo (tipo de suelo, clima, uso).

### Consideraciones finales

Si bien hay diversas propiedades biológicas del suelo que pueden usarse como indicadores de calidad del suelo, ya sea solas o en combinación con otras propiedades física o químicas, cualquiera de ellas está lejos de ser universal, y debieran ser elegidas de acuerdo a la situación particular bajo estudio. Por otro lado, hay varias propiedades que son tan difíciles de determinar y de interpretar, que muchas veces puede explicarse lo mismo utilizando mediciones más simples y menos costosas. Del mismo modo, sólo debieran usarse propiedades sensibles a cambios en el manejo. Adecuadas estrategias de muestreo y análisis multivariados de los resultados son factores clave para considerar cuando se usan indicadores biológicos. No menos importante es la interacción con los productores que son quienes toman las decisiones de manejo y finalmente afectan la calidad del suelo.

### Bibliografía

Anderson T. 2003. Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality. *Agriculture Ecosystems and Environment* 98: 285–293.

Arshad M.A., Martin S. 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 88: 153–160.

Bastida F. ZA, Hernández H., García C. 2008. Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. *Geoderma* 147: 159-171.

Cantu M. BA, Bedano C. and Schiavo H. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del Suelo (Argentina)* 25:173-8.

Dick R. Soil enzyme stability as an ecosystem indicator. Oregon, United States: <http://cfpub.epa.gov/ncer/abstracts>; 2000. [cited 2010 8th June ].

Doran J, Parkin, T. 1996. Quantitative Indicators of soil quality: A minimum data set. In: Doran J, Jones, A., editor. *Methods for assessing soil quality*. Wisconsin: Soil Science Society of America Chapter 2.

Doran J, Zeiss, M. 2000. Soil Health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology* 15:3-11.

Ferrerías; Toresani S, Bonel B, Fernández E, Bacigaluppo S, Faggioli V & Beltrán C. 2009. Parámetros químicos y biológicos como indicadores de calidad del suelo en diferentes manejos. *Ciencia del Suelo (Argentina)* 27: 103-114.

Janssens J, Deng, Z., Sonwa, D., Torrico, J.C., Mulin-dabigwi, V., Pohlan, J. 2006. Relating agro-climax of orchards to eco-climax of natural vegetation. *Acta Horticulturae* 707: 181-186.

Jenkinson D.S. & D.S. Powlson. 1976. Effects of Biotic Treatments on Metabolism in Soil. 5. Method for Measuring Soil Biomass. *Soil Biology & Biochemistry*, 8, 209-213.

Paul EA & FE Clark, 1996. *Soil Biology and Biochemistry*. 2nd Edition Academic Press, Inc., New York, NY.

Rezaei S, Gilkes, R., Andrews, S. 2006. A minimum data set for assessing soil quality in rangelands. *Geoderma* 136: 229–34.

Segnestam L. 2002. Indicators of the environmental and sustainable development. Theories and Practical Experience. Environmental Economic Series, Paper N° 89, 61 pp. World Bank, Washington DC." Weil R, Magdoff, F. 2004. Significance of soil organic matter to soil quality and health. In: Magdoff F, Weil, R., editor. *Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture*. Boca Raton, FL: CRC Press. p. 1-43.

## Indicadores de Calidad de Suelo en etapa de ajuste

Jose Luis Arzeno<sup>1</sup>

A lo largo del desarrollo del presente Manual se ha puesto énfasis en el concepto de Conjunto Mínimo de Indicadores (CMI), conformado por los Indicadores de Calidad de Suelos (ICS) que sobresalieron por su eficiencia y eficacia en cada zona o sistema productivo y/o Ecorregión. Junto al CMI, se utilizan también otros ICS que en términos generales acompañan las tendencias del CMI, pero con menor intensidad, es decir que resultan menos eficaces, por lo que se los podría llamar indicadores complementarios.

Por otra parte, en algunas zonas se ha trabajado con ICS que se encuentran en “etapa de ajuste”, es decir que aún se está ajustando la metodología de su determinación en el laboratorio y/o que falta aún desarrollar las metodologías de muestreo a campo o de calibración, para determinar sus va-

lores umbrales o de referencia. Se habla entonces de los “ICS en etapa de ajuste”, es decir, actualmente estos indicadores no tienen suficiente información como para presentarlos, pero se estima que pueden resultar de utilidad en el futuro. Los “ICS en etapa de ajuste” son diferentes para las diversas zonas, y el estado de avance también puede ser diferente para cada una de ellas.

A efectos de ejemplificar, se expone a continuación un estudio realizado en Jujuy-Salta, en el cual se trabajó especialmente con un grupo de ICS ligados a la Materia Orgánica (MO). Se comenzó en las parcelas de largo plazo de la EEA Salta, cuantificando la relación porcentual de la MO a dos profundidades: 0-5 y 0-20 cm, (% ReMO 5/20:  $MO\ 0-5 - MO\ 0-20 / MO\ 0-20 \times 100$ ) (Arzeno et al., 2010).

---

1. INTA, Estación Experimental Salta, 4400, Salta, Argentina

Luego se la utilizó en el Observatorio Ambiental de Tartagal. Los resultados obtenidos permitieron considerar al % ReMO 5/20 como un complemento de los otros ICS ligados a la materia orgánica, posibilitando la interpretación de su dinámica (Arzeno et al., 2012). La %ReMO media de 23 lotes evaluados fue de 36,8 % (clasificada como mejoradora en una primera aproximación). Cuando más alto es el % ReMO 5/20 indica que se van enriqueciendo los primeros 5 cm, debido a la siembra directa (SD) y la abundancia de rastrojos en especial de maíz y sorgo.

En las parcelas de largo plazo de la EEA Salta, se trabajó además en el fraccionamiento de la MO y en su potencial de mineralización (PM), destacando la importancia de la Materia Orgánica particulada (MOP), en especial de la fracción más gruesa (MOP 212-2000  $\mu\text{m}$ ) y específicamente a 5 centímetros de profundidad, como un indicador temprano de los cambios ocurridos por las diferentes prácticas agronómicas, de corto o mediano plazo, por ser estas fracciones, de ciclado más rápido (Ferrary Laguzzi et al., 2010 a).

De la misma manera, el PM resultó ser un indicador temprano de los efectos del uso sobre las

propiedades del suelo, observándose que su variación se logró especialmente a partir de la variación de MOP (Ferrary Laguzzi et al., 2010 b).

Posteriormente en fincas del Observatorio ambiental de Tartagal, se compararon dos metodologías de determinación del Potencial de mineralización de la MO: aeróbica y anaeróbica, (Ferrary Laguzzi et al., 2012), sobresaliendo la última como ICS, por su eficiencia y eficacia. Se programa utilizar este conjunto de ICS ligados a la MO, y el CMI sobre diferentes suelos de la Hoja Lajitas 1/50.000 (Dpto Anta, Salta).

Respecto a los indicadores físicos de calidad de suelo, el Terrón húmedo (TH), ligado a la retención de agua, es considerado un ICS en etapa de ajuste. Este indicador presenta una alta correlación con la Capacidad de campo.

Cabe destacar además la utilización de un Índice también en etapa de ajuste, el "Perfil cultural simplificado y cuantificado", mediante el cual, apoyado en el perfil cultural, se cuantifica el estado del suelo y la distribución de raíces, llegando a un valor final que oscila entre 1 y 10.

#### Bibliografía

Arzeno J.L.; R.Osinaga; F. Ferrary Laguzzi; E. Corvalán y T. Rodríguez 2010 - Relación de la MO entre: 0-5 y 0-20 cm (% REMO 5/20), como indicador de calidad de suelos en parcelas de largo plazo de Salta. En: Resumen XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario. pag 224.

Arzeno J.L.; Corvalán E.; Vivas F; Huidobro D.J.; Ferrary Laguzzi F. 2012 – Indicadores de calidad de suelo en Fincas del Observatorio ambiental de Tartagal. En: XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata.

Ferrary Laguzzi F.; R.Osinaga; J.L. Arzeno y T. Rodríguez 2010 a – Fraccionamiento de la materia orgánica como indicador químico de la calidad del suelo en distintos sistemas de labranza. En XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario.

Ferrary Laguzzi F.; R.Osinaga; J.L. Arzeno y T. Rodríguez 2010b – Mineralización de la materia orgánica como indicador químico de la calidad del suelo en distintos sistemas de labranza. En XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario.

Ferrary Laguzzi F.; J.L. Arzeno; E. Corvalán y T. Rodríguez 2012 – Comparación de métodos de ensayo para la determinación de nitrógeno potencialmente mineralizable en diferentes manejos agrícolas. En XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata.



## Selección de indicadores de calidad de suelo. Obtención del conjunto mínimo de indicadores (CMI). Criterios para la definición de valores umbrales y obtención de índices

Marcelo Germán Wilson<sup>1y2</sup> y Silvana María J. Sione<sup>2</sup>

El interés por el desarrollo sustentable obliga a establecer las capacidades para evaluar el estado del medio ambiente y detectar anticipadamente las condiciones y tendencias de cambio. Surge así la inquietud por desarrollar indicadores ambientales, que se constituyen en herramientas necesarias para dirigir el curso de las acciones hacia un

futuro sustentable.

Como producto de la aplicación del capítulo 40 de la Agenda 21 se han desarrollado diferentes metodologías basadas en el uso generalizado de indicadores e índices para evaluar la calidad ambiental, calidad de suelos y sustentabilidad, entre otros.

---

1. INTA, Estación Experimental Paraná. Oro Verde 3101, Entre Ríos, Argentina.

2. Universidad Nacional de Entre Ríos, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Oro Verde 3101, Entre Ríos, Argentina.

El valor de un impacto sobre el ambiente no siempre está bien representado por la diferencia del factor alterado con y sin proyecto, requiriéndose la identificación de indicadores, que constituyen la expresión medible de dicho impacto y permiten estimarlo en forma cuantificada. El primer paso para predecir la magnitud de los impactos es asignar a cada uno de ellos, un indicador cuantificable que mejor lo represente (Gómez Orea, 1999). La degradación del suelo es uno de los problemas ambientales de mayor importancia ya que impacta negativamente a todas las escalas de percepción (global, regional y local), condicionando o impidiendo el cumplimiento de las funciones del recurso (Cantú, 2004).

Doran et al. (1996) sostienen que, si bien en los procesos de desarrollo sustentable intervienen diversos factores, la calidad del suelo constituye un indicador básico del manejo sustentable.

Distintos autores han abordado el estudio de indicadores de calidad de suelos (ICS) y destacan los que, a su juicio, son más relevantes. Sin embargo, en la actualidad, no se cuenta con metodologías de trabajo ni de expresión de los resultados unificados que permitan evaluar objetivamente, comparar ni controlar el impacto de las prácticas agropecuarias sobre la calidad del suelo en una región. Por ello, surge la necesidad de establecer los para cada región y uso del suelo.

Dumanski et al. (1998) establecen que los ICS no pueden ser un grupo ad hoc para cada situación en particular sino que deben ser los mismos en todos los casos, lo que posibilita las comparaciones a nivel nacional e internacional. Sin embargo, otros autores consideran que los indicadores que se utilizan deben reflejar en cada caso las principales restricciones en congruencia con la función o las funciones principales que se evalúan, por lo que los indicadores a aplicar difieren en cada

caso en particular. Al respecto se han presentado grupos de indicadores obtenidos para situaciones regionales o locales (Brejda et al., 2000; Cantú et al., 2004; Segnestam, 2002; Astier et al., 2002, Wilson et al, 2007).

Seybold et al. (1999) proponen dos metodologías para medir y evaluar los cambios en la calidad del suelo: una basada en el monitoreo de tendencias y otra en la determinación de valores de referencias. Estos autores, al igual que otros (Doran y Parkin, 1994; Larson y Pierce, 1994) proponen en sus modelos, por razones prácticas, un Set de datos mínimos (MDS) potencial, que consiste en un conjunto de atributos relacionados a las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, útiles para evaluar la calidad del mismo.

En la República Argentina, Cantú et al (2007) desarrollaron y aplicaron un conjunto mínimo de indicadores (CMI) del estado del recurso suelo para evaluar su calidad en agroecosistemas con suelos molisoles, integrado por las siguientes variables: C orgánico, pH, saturación de bases, agregados estables al agua, velocidad de infiltración, densidad aparente y espesor del horizonte A. Por su parte, Wilson (2003) y Cerana et al (2006) han obtenido un CMI para la evaluación del efecto del cultivo de arroz sobre el suelo.

#### **Selección de indicadores de calidad de suelo. Obtención del conjunto mínimo de indicadores (CMI).**

La evaluación de la calidad del suelo debe basarse en sus funciones específicas, entendiendo cada función como el resultado de la interacción de las diversas propiedades del suelo, de modo que los mejores indicadores serán aquellas propiedades que influyan significativamente sobre la capacidad del suelo para proveer cada función, los usos a los cuales se destine y el ecosistema en el cual se está realizando la evaluación (Astier et al., 2002). Sin embargo, Navarrete Segueda et al.

(2011) afirman que, dada la naturaleza dinámica e interactiva de los procesos edáficos, rara vez se observa una relación uno a uno entre un indicador y una función, ya que cada función puede estar determinada por una serie de atributos del suelo, por lo que diferentes propiedades pueden ser simultáneamente relevantes en varias funciones que desempeñe un suelo en particular. De ahí que el fin último de la evaluación de la calidad de suelos sea identificar los atributos que llevan al suelo a cumplir sus funciones, de tal modo que éstos puedan traducirse en propiedades cuantificables, de utilidad como indicadores.

Doran y Parkin (1994) indican que son diversas las técnicas que se han aplicado para la selección de indicadores de calidad de suelo. Entre las técnicas aplicadas estos autores citan el análisis de factores, el uso de ecuaciones de regresión para describir las relaciones entre los indicadores y las funciones del suelo, las evaluaciones mediante regresión lineal múltiple basada en las propiedades físicas y químicas, y el análisis de componentes principales (ACP).

Cualquiera sea la técnica aplicada, un aspecto prioritario es la necesidad de definir claramente el patrón de comparación que se utilizará como estándar, dado que éste puede hacer que los resultados del análisis con indicadores difiera (Etchevers et al, 2009). Básicamente, la metodología utilizada para seleccionar los ICS que permitan identificar aquellos suelos más vulnerables a la degradación cuando son puestos en producción agrícola, consiste en medir un grupo de variables de suelo, y evaluar su sensibilidad al uso con respecto a una condición considerada de referencia. Se evalúan las variables de suelo en función de su respuesta a los cambios en las condiciones edáficas asociadas al uso, seleccionando aquellas más sensibles. Dicho análisis se realiza para cada combinación de subgrupo de suelos – sistema de

producción, utilizando el ACP. Este análisis permite encontrar con pérdida mínima de información, un nuevo conjunto de variables no correlacionadas (Componentes Principales, CP) que expliquen la estructura de la variación. Permite además, visualizar la sensibilidad de las variables a través de un gráfico bidimensional (BILOT), logrado a partir de los dos primeros componentes del ACP. Siguiendo los criterios de selección utilizados por Maddoni et al. (1999), Schipper y Sparling (2000) y Govaerts et al. (2006), las variables con los mayores valores de ponderación (E1) del CP 1 (coeficiente de ponderación mayor a  $\pm 0,25$ ), son seleccionadas como ICS. Con ellos se conforma el CMI. La interpretación del comportamiento de los indicadores en el ACP permite estimar la dinámica del suelo en función del uso.

Una vez obtenido el CMI para cada binomio suelo – sistema de producción, se realiza el Análisis de Conglomerados utilizando la distancia euclídea promedio y datos estandarizados, con la finalidad de construir un dendrograma jerárquico que muestre el encadenamiento de tratamientos con diferentes condiciones de uso, con la finalidad de agrupar aquellos tratamientos similares. Para la conformación de grupos se toma como criterio el valor correspondiente al 50% de la distancia máxima. De esta manera, se logra sintetizar considerablemente la información y visualizar relaciones multivariadas de compleja naturaleza.

En la siguiente etapa, se realizan correlaciones lineales entre las variables analizadas para identificar asociaciones entre ellas. El coeficiente de correlación de Pearson es una medida de la magnitud de la asociación lineal entre dos variables que no depende de las unidades de medida de las variables originales.

Finalmente, la dinámica de las variables físicas, físico químicas, químicas y microbiológicas del sue-

lo en relación al uso del suelo, se realiza tomando a la condición inalterada como referencia a través de la determinación de la significancia ( $< 0.01$ ),  $R^2$  y la pendiente relativa de la regresión lineal. Para detectar la sensibilidad de cada variable en relación al uso, se prioriza el grado de ajuste entre la variable y los años de uso (por medio del  $R^2$  y la significancia), además de tener en cuenta la pendiente relativa, dado que la variable más sensible es la que mayor cambio experimenta por cada año de uso.

#### **Criterios para la definición de valores umbrales (VU) de los indicadores de calidad de suelos**

La evaluación de la calidad del suelo debe concebirse en un contexto donde se establezcan y especifiquen las escalas espacio-temporales. De esta forma, el seguimiento de la calidad del suelo podrá efectuarse de manera comparativa o relativa. Al respecto, Massera et al. (1999) sugieren dos vías fundamentales: 1) comparar la dinámica de un mismo sistema a través del tiempo, y 2) comparar simultáneamente uno o más sistemas de manejo alternativo o innovador, con una situación de referencia.

Se ha destacado la importancia de establecer para cada indicador la línea base (baseline), de referencia o de inicio de una actividad, para reflejar la generación de impactos positivos o negativos en el ambiente, y los valores umbrales (thresholds) para el monitoreo de impactos negativos, los cuales no deben exceder un determinado nivel o valor (Segnestam, 2002). Los valores umbrales (VU), que pueden ser valores máximos o mínimos dependiendo de la variable en cuestión, representan para cada indicador, el nivel por encima del cual el recurso suelo se torna sensible a los procesos degradativos generados por el uso, arriesgándose su capacidad de recuperación.

Existen distintos criterios para establecer los VU. Tolon Becerra y Ramírez Román (2000) conside-

ran que la asignación de valores umbrales para cada indicador puede realizarse de acuerdo a los siguientes criterios: valores legales (o combinación de valores legales de los datos); valores establecidos científicamente; medias espaciales (comparaciones sincrónicas), medias temporales (comparaciones diacrónicas); opinión de expertos; opinión de representantes institucionales y de grupos sociales (a través de encuestas) y opinión popular (también a partir de encuestas). Cantú et al. (2007), para evaluar la calidad del suelo en agroecosistemas con molisoles, identificaron un CMI y definieron para cada ICS valores umbrales calculados a partir de los suelos de referencia y aplicando criterios teóricos.

La asignación de valores umbrales y de línea base a cada indicador constituye una etapa fundamental en la evaluación de la calidad de los suelos, dado que conforman el marco de referencia para cotejar los valores obtenidos de cada indicador, ante una situación particular de uso del suelo, posibilitando la detección de tendencias a la degradación o a la recuperación de la calidad del recurso.

#### **Obtención de índices**

Orellana et al. (1997) consideran que el CMI es insuficiente para cuantificar la calidad del suelo y que sólo permite detectar niveles de degradación o de recuperación del suelo. La medición ocasional de este CMI no es suficiente sino que se requiere conocer su dinámica. A tal fin, estos autores establecen índices globales e interactivos de productividad y de degradación de suelos, a partir de la integración de los indicadores que integran el CMI.

Ferrazzino et al. (2004) coinciden con el criterio anterior y sostienen que el estudio de los indicadores físicos, físico-químicos, biológicos, económicos y sociales relacionados con la calidad del

suelo resulta insuficiente, siendo necesaria su integración para la interpretación de los resultados. Expresan que la problemática de la calidad del suelo se manifiesta como un fenómeno total, integral, que abarca la complejidad del recurso en sí mismo y la indisoluble unidad de sus dimensiones constitutivas. A través de los indicadores integrados, utilizados para medir conceptos complejos y multidimensionales, es posible considerar la multidimensionalidad de la realidad de la calidad del suelo y la interpretación de tales dimensiones. Una de las técnicas aplicables para la integración de los indicadores que conforman el CMI y la obtención de índices, es la técnica mixta propuesta por el MESMIS (Marco de Evaluación de Sistemas de manejo de Recursos naturales mediante indicadores de Sustentabilidad, Masera et al., 2000). Esta técnica combina información numérica y gráfica. La numérica representa el aspecto cuantitativo de la técnica. Los valores de los indicadores son transformados a una escala nominal, según el criterio de Tylor (1993, citado por Masera, 2000), según el cual los valores asignados en cada intervalo de la escala representan la distancia del valor del indicador al VU (máx o mín) establecido para el mismo. De esta forma, los valores que adquieren los diferentes intervalos de la escala dependen de la distancia de los valores del indicador respecto a los VU y de cuán perjudicial o beneficioso resulta este efecto sobre el recurso. Esta distancia entre valores constituiría una medida directa de la intensidad del impacto de una actividad sobre el suelo.

Los valores de las escalas a la que son transformados los datos pueden oscilar entre 0 y 4 ó entre 0 y 3, correspondiendo el mayor valor (3 ó 4) a la situación de mejor calidad del suelo, lo que representa un menor impacto del sistema productivo sobre el recurso. El 0 representa la peor condición (impacto de mayor intensidad).

La técnica exige que la totalidad de valores alcanzados por los indicadores del CMI, independientemente de su unidad de expresión original, sean transformados a esta escala, posibilitando a posteriori la integración de ICS en índices.

La representación gráfica de los datos mediante el tipo de gráfico Ameba o Estrella constituye la parte cualitativa de la técnica propuesta por MESMIS. En este gráfico cada eje representa un indicador y sobre cada eje se visualizan los valores transformados a la escala nominal. Estos gráficos permiten evaluar la posición relativa de cada situación evaluada, respecto a la situación inalterada (en la que el suelo aún no está puesto en producción) y a una situación de referencia que refleja un manejo sustentable del recurso suelo (en producción). En esta situación de referencia, a diferencia de la inalterada, los ICS adquieren sus "mejores valores" (valores de referencia, VR) con el suelo en producción. Los VR representan los límites necesarios para garantizar el mantenimiento de la productividad a largo plazo y por ende la sustentabilidad del sistema.

Finalmente se obtienen los índices de calidad de suelo (InCS). Estos pueden obtenerse directamente a partir de la sumatoria de los valores obtenidos por cada indicador, o bien mediante una sumatoria ponderada, en la que se contempla el peso de cada uno de los ICS. La definición de índices permite establecer clases de calidad de suelo (ver caso de estudio).

#### **Caso de estudio. Evaluación del impacto del sistema de producción de arroz sobre el suelo en Entre Ríos**

Para evaluar el impacto del sistema de producción de arroz sobre el recurso suelo, se efectuó un estudio a escala de establecimiento agropecuario, evaluándose seis lotes que diferían en su historia de manejo, básicamente en el porcentaje de par-

ticipación del cultivo de arroz en la rotación. Se aplicó el CMI propuesto por Wilson (2003), constituido por los siguientes ICS: índice de inestabilidad estructural (Is), índice Ks de percolación de Hénin (Ks), contenido de materia orgánica (MO), contenido de sodio de intercambio (CSI), reacción del suelo (pH) y conductividad eléctrica del extracto, CE(e). Estos ICS fueron determinados en la situación inicial (año 0) a efectos de realizar un diagnóstico de la calidad de suelo en los lotes, en tanto que al año 1 se efectuó un moni-

toreo de los mismos. En base a la bibliografía (Wilson, 2003; Cerana et al., 2006; Wilson y Banchemo, 2006) y consultas a expertos se determinaron para cada indicador, los VR y los VUmáx y VUmín admisibles. Se trabajó con una base de datos provenientes de 75 sitios de muestreo localizados en el área arrocera tradicional, sobre suelos vertisólicos y con diferentes historias de manejo (Wilson, 2003). En la Tabla 1 se presentan los valores de la situación inalterada (In) y los VU para cada uno de los indicadores del CMI.

Indicador	Unidad	In	VR	VU
Is	adimensional	< 0,16	0,3	0,9 (máx)
Ks	cm.h-1	> 25,0	16,5	6,0 (mín)
MO	%	> 7,0	4,0	2,8 (mín)
CSI	cmol.kg-1	< 0,5	0,5	1,4 (máx)
CE(e)	µS.cm-1	< 600		3000 (máx)
pH	adimensional	6,5	7,38	5,3 (mín)

**Tabla 1:** Indicadores de calidad del suelo. Valores para la situación inalterada (In), valores de referencia (VR) y valores umbrales mínimos o máximos (VU mín o máx)

Wilson y Banchemo (2006) indican que en suelos vertisoles, valores de Is superiores a 0,5 indican problemas de deterioro estructural, mientras que con valores mayores a 0,90 los problemas de deterioro estructural son severos, por lo que se consideró como VUmáx un valor de Is de 0,9. Los valores de la condición inalterada surgieron de promediar datos provenientes de suelos vertisólicos del área de estudio.

Los In, VR y VU establecidos para el Ks de percolación surgieron como resultado del análisis de la base de datos provenientes de suelos vertisólicos de la zona arrocera, los que fueron a su vez sometidos a discusión por expertos en el tema.

Respecto al contenido de MO, se consideró como

VUmín el requerimiento para satisfacer la condición de suelo vertisólico (Soil Survey Staff, 2006), y como VUmáx el promedio de los valores determinados en la condición inalterada de los suelos de referencia en el área de estudio.

Para la determinación de los VU (máximo) de CSI se siguió el criterio de Cook y Muller (1997), quienes consideran que niveles superiores a 1,4 cmolc.kg-1 resultan peligrosos para la estabilidad de agregados y la dispersión coloidal en suelos vertisólicos. Los valores de la situación inalterada fueron obtenidos a partir de la base de datos de suelos vertisólicos locales.

El VUmín de pH fue establecido en función del

punto de toxicidad para el desarrollo de los cultivos de la zona. Si bien la bibliografía cita al pH neutro como la mejor condición del suelo en cuanto a calidad (Whittaker et al., 1959; Soil Survey Staff, 1993), en este trabajo se consideró el promedio de los valores determinados en la condición inalterada para suelos vertisólicos de la zona, el cual resultó próximo al pH neutro (6,5). Respecto al CE(e), los In, VR y VU fueron establecidos a partir del análisis de la base de datos provenientes de suelos vertisólicos de la zona arrocera y de la consulta a expertos en el tema.

**Estandarización e integración de indicadores.**

**Obtención de índices de calidad del suelo.**

La aplicación del marco conceptual y los aspectos metodológicos para la obtención de ICS adecuados a los objetivos perseguidos permitió obtener una serie de indicadores estandarizados e índices de calidad de suelo. En la Tabla 2 se presentan, a modo de ejemplo, los valores de Ks y su transformación a una escala nominal para la estandarización de los mismos.

Como se observa en la tabla anterior, los rangos de las escalas pueden compartir un valor similar

Ks (cmh-1)	ESCALA
<6	0
6-10	1
10-16	2
16-25	3
>25	4

**Tabla 2:** Transformación de los valores de Ks a una escala nominal.

en sus límites inferiores y superiores (por ejemplo en el Ks de percolación, 6-10 y 10-16 cmh-1). Esto se hace con el fin de no recurrir a decimales en la valoración de los rangos. Para todo efecto, se entenderá en este trabajo, que los límites no comparten los valores, pudiéndose interpretar como si tuvieran decimales (6-9,99 y 10-15,99 cmh-1), de manera que las clases siempre resultan independientes.

Para todos los indicadores del CMI, la condición óptima fue valorizada con el máximo valor de la escala (4 ó 3).

El InCS fue obtenido a partir de la sumatoria de los valores adquiridos por cada uno de los indicadores del CMI en su transformación a la escala nominal (índice sin ponderar). En este caso se asume que el peso relativo de los indicadores en la determinación de la calidad del suelo es equitativo.

Para la interpretación de estos InCS se establecieron clases de calidad de suelo (Tabla 3).

Índices de Calidad de suelos (InCS)	Rangos	Clases de calidad de suelos
1	0 - 4	Muy baja calidad
2	4 - 9	Baja calidad
3	9 - 14	Moderada calidad
4	14 - 19	Alta calidad
5	19 - 22	Muy alta calidad

**Tabla 3:** Clases de calidad de suelos a partir de los InCS.

En la Tabla 4 se presentan los InCS obtenidos para la situación inalterada y para la situación de referencia, representada por un modelo de producción en el que la participación del cultivo de arroz

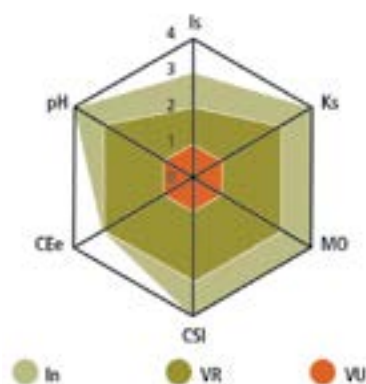
no supera el 20%. Ambas situaciones permiten sostener una calidad de suelos muy alta y alta, con valores de InCS de 5 y 4, respectivamente.

Indicador	Unidad	In	Escala	VR	Escala
Is	adimensional	< 0,16	3	0,3	2
Ks	cmh-1	> 25,0	4	16,5	3
MO	%	> 7,0	4	4,0	3
CSI	cmolckg-1	< 0,5	4	0,5	3
CE(e)	µScm-1	< 600	3	700	3
pH	adimensional	6,5	4	7,38	3
<b>InCS</b>			<b>5</b>		<b>4</b>
<b>Clase de calidad de suelo</b>			<b>Muy alta</b>		<b>Alta</b>

**Tabla 4:** Transformación de los In y los VR correspondientes a cada indicador, a la escala nominal.

En la Figura 1, la superficie verde del gráfico representa la situación inalterada (sin producir) para suelos vertisólicos de la zona de estudio, en tanto que el área gris indica la posición relativa de un modelo productivo en el que se respetan los valores de los indicadores que garantizan una productividad sostenida a largo plazo en lo que al recurso suelo concierne. Este modelo productivo resulta equivalente a un sistema en el que la participación del cultivo de arroz en la rotación es de un 20% aproximadamente. En esta situación los impactos del cultivo de arroz sobre el suelo son de una intensidad tal que no comprometen la sostenibilidad de su aptitud productiva a largo plazo.

sensible a los procesos degradativos generados por el uso arrocero, arriesgándose su capacidad de recuperación.



**Figura 1:** Diagrama "ameba" correspondiente a la situación inalterada (In), posición relativa de los VR y de los VU.

El área del gráfico en color rojo representa una condición en la que los ICS han alcanzado los valores umbrales (máximos o mínimos), límite a partir del cual la calidad del suelo se torna altamente

Se obtuvo también un índice ponderado (InCS-pond), a partir de la aplicación de un ACP. Los resultados de este análisis indica que el CP contribuye con el 83.5% del total de la variabilidad de los datos. El InCS ponderado obtenido indica los pesos relativos de cada ICS:

$$InCS\ pond = 0.19 * pH + 0.18 * CSI + 0.17 * MO + 0.17 * Is + 0.13 * CE + 0.165 * Ks$$

Se observa que los seis indicadores del CMI tienen similar importancia. El análisis comparativo entre la aplicación de los dos índices (ponderado y sin ponderar) permitió observar que ambos reflejaron la misma calidad de suelo en los distintos lotes evaluados, por lo que se considera que los dos índices resultan de utilidad para estudiar el impacto del sistema productivo arrocero sobre el suelo. En este estudio de caso, se muestra la evaluación de la calidad del suelo aplicando el InCS sin ponderar.

**Validación de InCS**

El uso de indicadores e índices de calidad del suelo a nivel de establecimiento agropecuario permitió evaluar el impacto del cultivo de arroz sobre la calidad del recurso, observándose diferencias apreciables entre los valores de InCS correspondientes a las diferentes secuencias de cultivos realizadas en los lotes evaluados. De forma global es posible afirmar que, a excepción del lote destinado a pradera y sin inclusión de cultivo de arroz, todos los modelos productivos analizados a escala de establecimiento agropecuario generaron impactos de diversa magnitud sobre el suelo, causando deterioros de diferente grado en su calidad respecto al modelo de producción considerado de referencia, con el que se garantizaría la sustentabilidad de la productividad del suelo a largo plazo.

Los modelos productivos que presentaron una situación más crítica correspondieron a aquellos con mayor participación del cultivo de arroz en la rotación, o a aquellos en los que se implantó este cultivo en la última campaña evaluada. En estos casos, la posición relativa de los mismos distó del sistema de referencia básicamente en los ICS relacionados con la calidad del agua de riego.

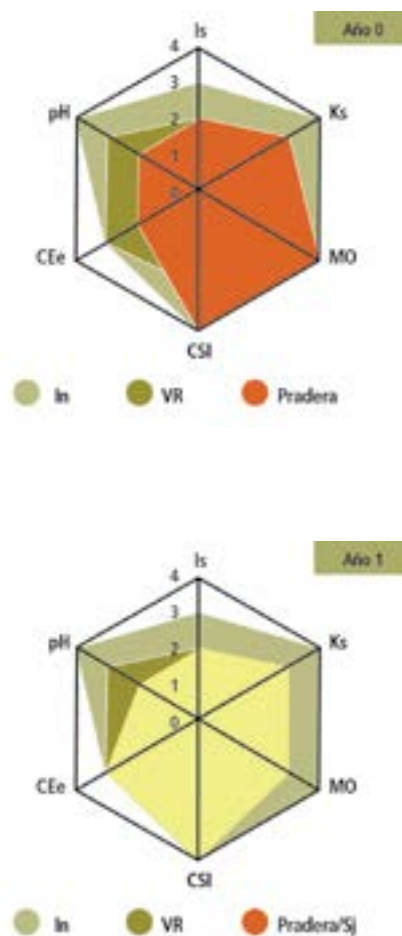
La utilización de agua de origen subterráneo (bicarbonatada sódica) para riego, produce un aumento del CSI en el suelo. Los grandes volúmenes de agua requeridos para inundar el cultivo y el desequilibrio entre la relación de adsorción de sodio (RAS) y la salinidad del agua de riego, magnifican los efectos de sodificación en suelos donde predominan arcillas montmorillonitas (Wilson, 2003). So y Cook (1993) expresan que estos aumentos de CSI provocan condiciones desfavorables que inducen a la desagregación del suelo y a la dispersión de las arcillas.

En todos los casos, la inclusión de cultivos diferentes del arroz (soja – ray grass) en la última campaña permitió la recuperación de los ICS, generando un incremento en la calidad del suelo.

Los InCS oscilaron entre 5 y 2, correspondiendo los mayores índices al lote en que no presentó arroz en la rotación, con predominio de praderas. En las situaciones con mayor participación de arroz, los valores de InCS resultaron fuertemente influenciados por el indicador CSI, que constituye la propiedad más afectada por el manejo del arroz, básicamente por el riego. Estos modelos productivos fueron los que más distaron del modelo de referencia y de la situación inalterada.

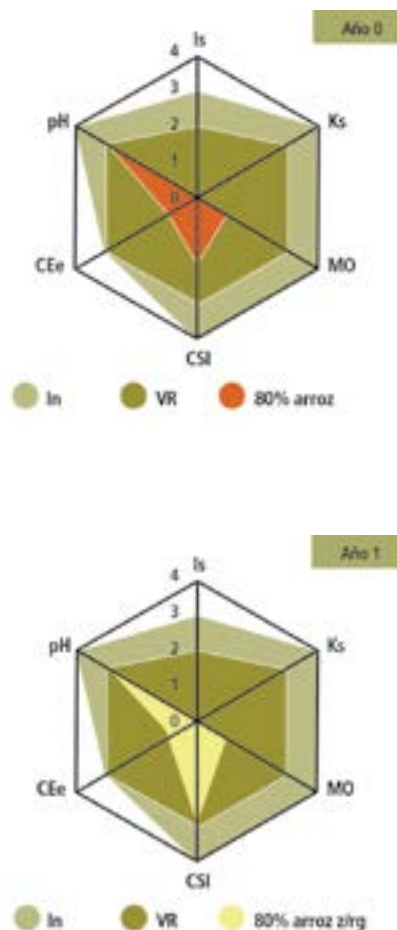
A modo de ejemplo, en la Figura 2 se presenta la situación del lote sin cultivo de arroz en su historia de manejo, en el que se registró una muy alta calidad de suelos al año 0, observándose que la

inclusión del cultivo de soja en la rotación afectó el contenido de MO al año 1, disminuyendo un 28% aproximadamente, pasando la calidad del suelo de muy alta a alta.



**Figura 2:** Diagrama "ameba" correspondiente al lote sin cultivo de arroz en la rotación. Posición relativa frente a la situación inalterada (In) y a los VR

La menor calidad de suelo en la situación inicial correspondió al lote con 80% de participación de arroz en la rotación, en el que se registró un InCS de 2, constituyendo el modelo productivo más alejado de la situación de referencia, comprometiéndose severamente la sustentabilidad de la productividad del recurso suelo (Fig. 3).



**Figura 3:** Diagrama "ameba" correspondiente al lote con 80% de arroz en la rotación. Posición relativa frente a la situación inalterada (In) y a los VR

En este lote, la inclusión de ray grass en la última campaña permitió una leve recuperación del CSI como producto de la ausencia de riego con agua bicarbonatada sódica. A pesar de este aspecto, el suelo mantuvo el valor 2 de su InCS, reflejando su baja calidad, lo que estaría indicando que la inclusión de un solo ciclo de ray grass no sería suficiente para recuperar el deterioro del suelo ocasionado por una alta participación de arroz en la secuencia de cultivos.

El índice de calidad de suelo obtenido y aplicado a nivel de establecimiento agropecuario permitió evaluar el impacto del cultivo de arroz sobre la calidad del suelo, estableciendo diferencias apreciables entre secuencias de cultivos.

### Consideración final

En este apartado se presentan los criterios y herramientas metodológicas para la obtención de los conjuntos mínimos de indicadores de calidad de suelos y el desarrollo de índices de calidad, los que deben estar basados en los binomios suelos-sistemas productivos, y ser desarrollados localmente. Se presentan además, criterios para la asignación de valores umbrales y de línea base a cada indicador seleccionado.

Finalmente, se expone un estudio de caso de obtención de índice de calidad de suelos desarrollado localmente y su aplicación a nivel de establecimiento, que puede brindar utilidad para futuras investigaciones.

### Bibliografía

- ASTIER, C.M., MASS-MORENO, M. y ETCHEVERS, B.J. (2002). Derivación de indicadores de calidad de suelo en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia* 36: 605-620.
- BREJDA, J.J., MOORMAN, T.B., KARLEN, D.L. and T.H. DAO (2000). Identification of regional soil quality factors and indicators: I. Central and southern high plains. *Soil Sci. Soc. Am.* 64:2115-2124.
- CANTÚ, M. P.; BECKER, A.; BEDANO, J. C.; MUSSO, T. B.; SCHIAVO, H. F. (2004). Indicadores e índices cuantitativos de Calidad Ambiental y de Suelos para evaluar la sustentabilidad de Agroecosistemas. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. CD, 8 pp. Paraná.
- CANTÚ, M. P.; BECKER, A.; BEDANO, J. C. Y H.F. SCHIAVO (2007). Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del Suelo* 25(2): 173-178, 2007
- CERANA, J.; WILSON M.; DE BATTISTA J.J.; NOIR J. y C. QUINTERO (2006). Estabilidad estructural de los vertisoles en un sistema arrocerero regado con agua subterránea. *Revista de Investigaciones Agropecuarias RIA.* 35 (1): 87-106.
- COOK G.D. and W. MULLER (1997). Is exchangeable

sodium content a better index of soil sodicity than exchangeable sodium percentage?: a reassessment of published data. *Soil Science* 162 (5): 343-349.

DORAN J. and T. PARKIN (1994). Defining and assessing soil quality. *Soil Science Society of America* 677: 3-21.

DORAN, J.; SARRANTONIO, M. y M. LIEBIG (1996). Soil health and sustainability. *Advances in Agronomy* 56, Academic Press, San Diego. 324 pp.

DUMANSKY, J.; FERRY, E.; BYERLEE, D. and C. PIERI (1998). Performance indicators for sustainable agriculture. Washington. The World Bank

ETCHEVERS J.; C. HIDALGO; M. VERGARA; M. BAUTISTA y J. PADILLA. 2009. Calidad de suelo: conceptos, indicadores y aplicación en agricultura. En: J. López-Blanco y M. Rodríguez-Gamiño. 2009. Desarrollo de indicadores ambientales y de sustentabilidad en México. Ed. Universidad Nacional Autónoma de México UNAM Colección Geografía para el siglo XXI. Serie Libros de Investigación, No. 3. 196 p.

FERRAZINO, A.; PASCALE, C. y M. CONTI (2004). Multidimensionalidad e interdisciplinariedad del estudio de calidad de suelos. En: Anales del XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná, Entre Ríos.

GÓMEZ OREA D. (1999). Evaluación del Impacto ambiental. Ed. Mundi Prensa. Editorial Agrícola Española S.A. 699 pp.

GOVAERTS, B.; SAYRE, K.D. and J. DECKERS (2006). A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil and Tillage Research* 87: 163-174.

LARSON W. and F. PIERCE (1994). The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. *Soil Science Society of America* 677: 37-51.

MADDONI, G.; URRICARRIET, S.; GHERSA, C. y R. LAVADO (1999). Assessing soil quality in the Rolling Pampa, using soil properties and maize characteristics. *Agronomy Journal* 91: 280-287.

MASERA, O.; ASTIER, M. y LOPEZ RIDOURA, S. (2000). Sustentabilidad y manejo de recursos naturales. El Marco de Evaluación MESMIS. Ediciones Mundi-Prensa México. 109 pp.

ORELLANA de J., PILATTI M.A. and D. GRENÓN (1997). Soil quality: An approach to physical state assessment. *Journal of sustainable agriculture*. The Haworth Press, Inc. 9 (2/3): 91-108.

NAVARRETE SEGUEDA, A.; VELA CORREA, G.; LOPEZ BLANCO, J. y M. RODRÍGUEZ GAMIÑO. (2011). Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo. *Contactos* 80: 29-37.

SEGNESTAM, L. (2002). "Indicators of environment and sustainable development: Theories and practical experience". *Environmental Economics Series*. 89, The World Bank Environment Department.

SEYBOLD C.; HERRICK J. and J. BREJDA (1999). Soil resilience: A fundamental component of soil quality. *Soil Science* 164 (4): 224-234.

SCHIPPER, L.A.; SPARLING G.P. (2000). Performance of soil condition indicators across Taxonomic groups and Land uses. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 300-311.

SO, H.B. and G.D. COOK (1993). The effect of slaking and dispersion on the hydraulic conductivity of clay soils. In *Soil Surface sealing and crusting* (J.W.A. Poesen and M.A. Nearing, Eds.). Cremlingen, Germany. *Catena Supplement* 24: 55-64.

SOIL SURVEY STAFF (1993). *Soil Survey Manual*. Handbook 18. USDA. Washington DC. 437 pp.

SOIL SURVEY STAFF (2006). *Key to Soil Taxonomy*. USDA Tenth Edition. Washington DC. 341 pp.

TOLON BECERRA, A. and M.D. RAMIREZ ROMAN. "Model analysis of sustainability indicators" (in spanish). AGL2003-04540, MICYT - FEDER. Available in <http://www.indirural.ual.es/produccionpdf/bilbao04.pdf>, 2000.

WILSON, M.G. (2003): Efecto del sistema de producción de arroz sobre la calidad del suelo en Entre Ríos, Argentina. Tesis de Maestría en Ciencias

Agropecuarias, Universidad Nacional de Río Cuarto. 88 p.

WILSON, M. y A. BANCHERO (2006). Calidad del suelo. Efectos del uso arrocero. En: *El arroz. Su cultivo y sustentabilidad en Entre Ríos*. Editorial Universidad Nacional de Entre Ríos y Ediciones de la Universidad Nacional del Litoral. Director de obra René Benavidez. Tomo I. 667-672. ISBN 978-950-698-169-3.

WILSON, M.; VALENTI, R. y J. CERANA (2007). Condición de suelos arroceros regados con agua de embalse. En: *Evaluación agrohidrológica de represas para riego. Su estudio en Entre Ríos*. Ed. Universidad Nacional de Entre Ríos. 101-111. ISBN 978-950-698-191-4.

WHITTAKER, CW; MS ANDERSON & RF REITEMEIER. (1959). Liming soils: An aid to better farming. *USDA Farmers Bull.* 2124. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.

## Metodologías de construcción de índices de calidad de suelos

Romina Romaniuk<sup>1</sup>

### Introducción

La sustentabilidad de los sistemas puede ser evaluada a través del estudio de la calidad del suelo. Esto requiere la medición de indicadores y la comparación de los resultados para evaluar las consecuencias de diferentes sistemas de manejo (Karlen et al., 1997; Nael et al., 2004, Giuffré et al., 2006). Los indicadores de calidad de suelo pueden ser brevemente definidos como aquellas propiedades y procesos, que una vez medidos, permiten detectar con mayor sensibilidad cambios en sus funciones. Doran y Parkin (1996) enfatizan que los indicadores deben estar correlacionados con los procesos que tienen lugar en el ecosiste-

ma, integrar diferentes propiedades y procesos, ser accesibles a muchos usuarios, sensibles al manejo y al clima. Los mismos deben ser "predictivos", lo que implica reflejar cambios tempranos en los procesos ecológicos e indicar la probable ocurrencia de cambios futuros (Herrick et al., 2002). Las primeras aproximaciones realizadas en el estudio de la calidad de los suelos centraron su esfuerzo en la selección de un conjunto mínimo de datos universal que fuese útil para evaluar su calidad en suelos de todo el mundo (Doran y Parkin, 1994; Gregorich et al., 1994; Karlen y Stott, 1994; Larson y Pierce, 1994). Sin embargo, quedó

---

1. Instituto de Suelos INTA Castelar, 1686, Hurlingham, Buenos Aires, Argentina.



demostrado que los indicadores apropiados para evaluar las funciones del suelo no son universales, sino que difieren según el objetivo de manejo en relación al tipo de suelo, clima y ecosistema que sea evaluado (Andrews et al., 2002 a).

Una evaluación consistente de la calidad del suelo requiere una metodología sistemática para seleccionar, interpretar e integrar las propiedades del suelo que sean útiles como indicadores de calidad. Sin embargo, aunque existen muchos métodos para monitorear y evaluar la calidad del aire y del agua, ningún método único ha sido aceptado para la evaluación de la calidad del suelo debido, en gran parte, a la complejidad y variabilidad que presenta el sistema edáfico. Esto repercute en la gran cantidad de muestras que deben obtenerse y sumado a ello, en el gran número de determinaciones que deben realizarse para abarcar las diferentes funciones o propiedades del suelo, las que a su vez suelen estar interrelacionadas (Lu et al., 2008). De esta manera, el poder evaluar la calidad del suelo extrayendo la información más representativa de cada sistema y su integración en un valor final que caracterice adecuadamente su calidad, representa sin duda alguna un gran desafío.

**Combinación de variables en un índice de calidad de suelos: antecedentes en la temática**  
Según el trabajo realizado por Batidía et al. (2008), de las 14000 publicaciones que aparecen desde 1940 en referencia al término "calidad del suelo", sólo 934 se refieren a índices, y de ellas, son muy pocas las que realmente proveen un índice que permita cuantificar la calidad de los suelos. Un índice de calidad de suelo puede ser definido como el mínimo conjunto de parámetros, que interrelacionados, provee datos numéricos acerca de la capacidad de un suelo para llevar a cabo sus funciones (Acton y Padburry, 1993). Se realizaron aproximaciones sistemáticas para desa-

rollar un índice integrado de calidad de suelos. Pierce y Larson (1993) propusieron utilizar procedimientos estadísticos de control de calidad para evaluar la dinámica de los cambios temporales en la calidad del suelo. Smith et al. (1993) emplearon la exploración de variables múltiples basada en geoestadística no paramétrica. Doran y Parkin (1994) utilizaron una simple función multiplicativa para evaluar la calidad de los suelos considerando aspectos geográficos, climáticos y socioeconómicos. Karlen y Scott (1994) propusieron un modelo de normalización de indicadores basado en el uso de curvas normalizadas para luego evaluar el efecto de los diferentes sistemas productivos sobre funciones asociadas con la calidad del suelo (Karlen et al., 1994) utilizando un índice aditivo ponderado (IAP) donde las funciones del suelo eran ponderadas arbitrariamente y multiplicadas por el valor normalizado de la variable que representaba esa función. La misma responde a la siguiente ecuación:

$$SQ = qWE (wt) + qWMA (wt) + qRD (wt) + qFQP (wt)$$

Donde SQ es calidad del suelo, qWE se refiere a la capacidad del suelo para permitir la entrada de agua, qWMA es la ponderación a la habilidad del suelo para la absorción y transferencia del agua, qRD se refiere a la capacidad del suelo para resistir la degradación y qFQP a la habilidad para sustentar el crecimiento vegetal. Wt es el peso numérico para cada función, la cual está representada por diferentes indicadores que representan a cada una de ellas. Aunque esta aproximación resulta interesante y permite integrar diferentes indicadores, cuenta con varias desventajas. La primera reside en que la ponderación para cada función (q), así como la de los indicadores que representan a cada una de ellas (wt) son fijados arbitrariamente y por tanto son subjetivos. Otra desven-

taja reside en el hecho que un mismo indicador representa generalmente a más de una función, y a su vez los mismos son elegidos sin evaluar si son sensibles para caracterizar a los sistemas evaluados. De esta manera y según el número de funciones que se cuantifiquen, el valor final del índice estará influenciado por los indicadores que caractericen a la mayor cantidad de funciones a las que arbitrariamente hayan sido asignados. Finalmente, no simplifica la evaluación de la calidad de los suelos, ya que utiliza múltiples indicadores para caracterizar a una función sin utilizar un método de reducción de los mismos, ni evaluar la correlación entre ellos.

La normalización de los indicadores responde a la función que mejor represente al indicador utilizado. Esto puede ser "cuanto mayor es mejor", "cuanto menor es mejor" o un "óptimo". Aunque este sistema de normalización es válido y representativo de la realidad de cada sistema, cuenta con ciertas limitaciones, ya que para cada indicador a normalizar hay que fijar valores umbrales, bases y óptimos. Esto es dificultoso ya que los mismos varían según el sistema productivo y tipo de suelo, entre otros factores. A pesar de las dificultades que presenta este sistema de evaluación de calidad de suelos, varios autores, implementaron esta metodología (Hussain et al. (1999), Glover et al. (2000) y Masto et al., (2007). Gregorich et al. (1994) enfatizaron la importancia de incluir a las fracciones de la materia orgánica dentro del conjunto mínimo de indicadores a utilizarse en la evaluación de la calidad de los suelos. En base a esta aproximación, Blair et al. (1995) propusieron la utilización de un índice basado en la composición de las diferentes fracciones de carbono en el suelo (índice de manejo del carbono – IMC) para evaluar la calidad de los suelos. De Bona et al. (2008) utilizaron este índice para comparar el efecto de diferentes prácticas de manejo sobre la calidad de los suelos. Concluyeron

que dicho índice debe ser considerado como un indicador y no como un índice, debido a que no considera otros aspectos asociados a las funciones del suelo.

Wander y Bollero (1999) utilizaron el análisis multivariado para analizar diferentes parámetros de suelo. Las variables fueron agrupadas en físicas, químicas y biológicas. Aquéllas que mostraron diferencias significativas entre tratamientos fueron incluidas por grupos en el análisis multivariado. Esta aproximación les permitió interpretar efectivamente un complejo conjunto de datos y pudieron identificar variables sensibles a las prácticas de manejo como así también conocer la interrelación entre las mismas. El análisis multivariado resultó ser un descriptor mucho más poderoso del sistema edáfico que el análisis univariado.

Andrews et al. (2002a) compararon diferentes métodos de construcción de índices de suelo. Para seleccionar el CMI utilizaron el sistema de opinión de expertos (OE) y el análisis de componentes principales (ACP), como métodos para reducir los indicadores analizados. Para normalizar los valores de los indicadores se utilizaron los modelos lineales (donde cada variable es normalizada usando el criterio de cuanto mayor mejor, o lo inverso) y no lineales (donde cada variable responde a una función característica según lo propuesto por Karlen y Scott, 1994). Finalmente los indicadores fueron combinados mediante la utilización de un índice aditivo (IA), donde los que fueron seleccionados tienen el mismo peso, y el sistema aditivo ponderado (IAP) diferenciándose del propuesto por Karlen et al. (1994) en que la ponderación no es arbitraria, sino obtenida mediante herramientas estadísticas. Ambos métodos de selección de indicadores resultaron adecuados. La eficiencia de los sistemas de normalización utilizados no difirió en gran medida, aunque los autores consideraron al sistema de normalización no lineal más

representativo de la realidad. Finalmente, la eficiencia de estos índices fue comparada con otras técnicas multivariadas que utilizan todas las variables (Wander y Bollero, 1999). Esta comparación mostró resultados similares entre ambas técnicas, indicando que un reducido número de variables criteriosamente seleccionadas y combinadas dentro de un índice, pueden brindar la información necesaria para la selección de la mejor práctica de manejo. Andrews et al. (2004) aplicaron este sistema de construcción de índices de calidad de suelos, mediante la creación de un programa con interacción del usuario (Soil Management Assessment Framework – SMAF) en la elección de las variables que representen mejor las funciones del suelo para los diferentes objetivos de manejo. En todos los casos, la aplicación del índice obtenido mediante esta metodología, resultó sensible para distinguir entre sistemas de manejo y otorgar mayores valores del índice a aquellos sistemas con prácticas más conservacionistas. Cambardella et al. (2004) y Karlen et al. (2009) utilizaron este sistema para evaluar la calidad de suelos a mayor escala, obteniendo una cuantificación representativa de las situaciones estudiadas. Sin embargo, este sistema sólo otorga la posibilidad de elegir entre 11 indicadores que poseen programada la función característica a partir de la cual se ponderan los indicadores, lo que limita su utilidad. A su vez, su adquisición y utilización no está disponible actualmente.

Como puede apreciarse, la utilización de análisis multivariado es cada vez más generalizada en la construcción de índices de calidad de suelo. Los resultados encontrados han sido exitosos para muchas de las variantes propuestas por diferentes autores. Sin embargo, solo algunos trabajos han vuelto a explorar estas metodologías con el fin de comparar su sensibilidad para detectar cambios en la calidad del suelo (Cambardella et al., 2004; Sharma et al., 2005; Rezaei et al., 2006; Wien-

hold et al., 2006; Erkossa et al., 2007). Todos estos trabajos utilizaron como base la metodología propuesta por Andrews et al., 2002 a, b y 2004. Esta técnica de construcción de índices también fue utilizada para crear índices microbiológicos (Bastidia et al., 2006; Dawson et al., 2007). Bastidia et al. (2008) realizaron una revisión sobre los índices propuestos y utilizados hasta el momento. Concluyeron que las metodologías propuestas por Karlen et al. (1994) y modificadas por Andrews et al. (2002 a,b, 2004) han sido las más utilizadas para cuantificar la calidad de los suelos. Lu et al. (2008) propusieron una alternativa al uso de análisis de componentes principales (ACP) o de factores (AF). Se denomina “factorización positiva de matrices”. La ventaja principal que otorga esta técnica es que la ponderación de las variables es siempre positiva, a diferencia de los ACP o AF, en donde las variables pueden quedar ponderadas negativamente, lo cual, según el autor, dificulta la interpretación de las mismas.

Qi et al. (2009) compararon diferentes índices (índice aditivo ponderado -IAP vs. [Índice de calidad de Nemoro - ICN). En este último caso los resultados son afectados por el indicador que posee el mínimo valor y luego promediados. Ambos índices fueron construidos con diferentes métodos de selección de indicadores (conjunto total de datos - CTI, conjunto mínimo de datos - CMI y Delphi data set - DDS). El CTI considera al total de los parámetros evaluados como indicadores; el CMI considera solo aquellos indicadores que hayan quedado seleccionados luego de aplicar análisis multivariado de componentes principales (Andrews et al., 2002); mientras que el DDS es una metodología de selección de indicadores basada en el sistema de opinión experto, pero que luego debe ser validada y corregida por otros especialistas (Zangh et al., 2004). Mediante estas combinaciones quedaron construidos seis índices diferentes. Aunque los resultados provistos por

los índices fueron similares, concluyeron que el IAP (índice aditivo ponderado) junto con el CMI (conjunto mínimo de indicadores) fueron los que mejor reflejaron la calidad de los suelos estudiados, recomendando su uso para futuros estudios de calidad de suelos, centrando el esfuerzo en mejorar dichas metodologías y no en crear más índices, que solamente generan confusión a la hora de seleccionar un único método para evaluar la calidad de los suelos en el mundo.

Aunque numerosos investigadores destacan que la evaluación de la calidad de los suelos debe considerar las propiedades físicas, químicas y biológicas, la metodología de construcción de índices con mayor aceptación hasta el momento (CMI integrados mediante el IAP) no considera este aspecto a la hora de integrar los indicadores. Aunque el conjunto de variables a evaluar esté integrado por variables químicas, físicas y biológicas, alguno de estos grupos de indicadores puede no quedar seleccionado para integrar el índice de calidad de suelos. Es por este motivo Romaniuk et al (2011) analizaron de manera separada los tres grupos de variables (físicas, químicas y biológicas) de manera que al menos una variable de cada tipo forme parte del índice. Esta metodología fue comparada con la que considera todas las variables conjuntamente dentro del análisis de componentes principales, con el fin de analizar si difieren en su sensibilidad para diferenciar entre las situaciones de estudios evaluadas. Según el sistema productivo evaluado, la metodología propuesta incrementó o no afectó la sensibilidad de los índices para discriminar entre situaciones de estudio. A su vez, los valores provistos por el índice mostraron una tendencia más real y similar al estado de degradación de los lotes que los valores derivados del índice según la metodología de introducción conjunta de las variables. Otra ventaja es que permite visualizar el efecto de las prácticas de manejo sobre estas propiedades y

la incidencia relativa sobre cada una de ellas, lo que otorga mayor seguridad a la hora de arribar a conclusiones acerca de los cambios en la calidad de los suelos.

### **Método sistemático para la construcción de índices de calidad de suelos**

Para la construcción de un índice de calidad de suelos puede utilizarse un método sistemático (Romaniuk et al. 2011) que consta de tres pasos consecutivos. Para un mayor entendimiento práctico de los mismos se ejemplificarán con un estudio realizado en huertas bajo manejo orgánico y convencional con diferentes años de manejo (Romaniuk et al. 2014).

#### **1. Selección de un Conjunto Mínimo de Indicadores (CMI)**

En primera instancia se realiza análisis de varianza univariado (ANVA) para todas las variables analizadas, ya sean físicas, químicas y/o biológicas. Se recomienda utilizar la prueba de comparaciones múltiples de Rienzo, Guzmán y Casanoves (DGC) que es un procedimiento basado en conglomerados (Di Rienzo et al., 2002) disponible en software estadístico INFOSTAT. Solamente aquellas variables con valor de  $p < 0,05$  y  $CV < 40$  son retenidas para el análisis posterior (Wander y Bollero, 1999).

En una segunda instancia se efectúa análisis multivariado de componentes principales considerando sólo las variables que fueron seleccionadas luego del ANVA. El análisis multivariado de componentes principales (ACP) construye nuevas variables no correlacionadas (CP) basándose en la matriz de correlación. Permite analizar la interdependencia de variables. Como resultado del mismo, se obtienen los autovalores correspondientes a cada CP. Los mismos hacen referencia a la proporción de la variabilidad total explicada por cada componente, y a la proporción de la

variabilidad total explicada, en forma acumulada. También se presentan los autovectores, que son los coeficientes con que cada variable original fue ponderada para conformar las CP. Permiten ver la incidencia que tuvo cada variable en la definición de los ejes de las componentes principales. Muestran la correlación de las variables con las CP. Para la selección final de los indicadores se procede de la siguiente manera:

**a.** Se consideran solo las componentes principales (CP) con autovalores mayores a 1 y que expliquen al menos 10% de la variabilidad del modelo. Esto se debe a que al trabajar con los datos estandarizados, cada variable posee una varianza de 1, y la varianza total es igual al número de variables que entren en el análisis. Entonces, cuando una CP posee un valor mayor a 1, significa que explica mayor proporción de la variabilidad de los datos que las variables individuales (Bredja et al., 2000).

**b.** Dentro de cada CP seleccionada, son retenidas aquellas variables que presentan autovectores con valores absolutos dentro del 10 % del mayor valor. Ejemplo: En la tabla 1 dentro de la CP seleccionada para las variables físicas, el DMP 2 es la que presenta el mayor autovector (0.53). Entonces todas las variables que entren en el rango que va de 0.53 +/- 0.053 en valores absolutos serán retenidas para el análisis. De esta manera el DMP 1 (0.51) y K (-0.49) quedaron seleccionadas.

**c.** Cuando más de una variable es retenida dentro de una CP, se utiliza el coeficiente de correlación para determinar si las variables son o no redundantes y entonces, eliminar una de ellas del CMI. Para ello se realiza el análisis de correlación de Pearson y se procede a realizar la suma de coeficientes de correlación de las variables consideradas. La variable que presenta un mayor valor derivado de la suma de los coeficientes es seleccionada como la variable de mayor peso. Luego

se evalúa la correlación entre las variable seleccionada con las demás variables. Si las variables presentan un coeficiente de correlación menor a 0.7 con la variable seleccionada, se considera que no están correlacionadas y entonces cada una de ellas, es retenida dentro del CMI. Si por el contrario, el coeficiente de correlación es mayor a 0.7, la variable es eliminada.

**Ejemplo:**

Las variables seleccionadas luego del ANVA fueron evaluadas mediante el análisis de componentes principales (Tabla 1) separadamente según su clasificación en físicas, químicas y biológicas.

El ACP de las variables físicas muestra que sólo la CP 1 explicó el 90% de la variabilidad del modelo y fue la única CP seleccionada. Dentro de esta CP quedaron seleccionadas el DMP 1 y 2 y la K1. Luego del análisis de correlación entre estas variables, solo quedó seleccionado el DMP 1.

Para las variables químicas quedaron seleccionadas las CP 1 y 2. La primera explicó el 69% y la segunda el 30%. Dentro de la CP1 quedaron seleccionadas el COT 1 y 2, el Nt1 y el CS 1 y 2.

De estas variables solo quedó seleccionado el COT 2 por presentar la mayor suma de correlaciones. Dentro de la CP 2 el pH 1y 2 presentaron los mayores valores. Sin embargo, por estar todos los valores de pH dentro del rango óptimo para la producción de los cultivos, se decidió no incluirlas en el CMI. Finalmente para las variables biológicas quedaron seleccionadas la CP 1 y 2. La primera explicó el 58% y la segunda el 31%. Dentro de la CP1 quedaron seleccionadas el CBM 1 y CBM/C 1, con la selección final del CBM 1; mientras que en la CP 2 sólo quedó seleccionado el COP 2.

**Tabla 1:** Autovalores para las CP seleccionadas y autovectores (Avalores) de las variables físicas, químicas y biológicas para las CPs seleccionadas. Prop.: proporción de la variabilidad explicada por cada CP.

ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES					
Variables	Física	Química		Biológicas	
CP	1	1	2	1	2
Avalores	3,6	6,86	3,04	4,61	2,46
Prop	0,9	0,69	0,3	0,58	0,31
Autovectores					
DA 1	0,47				
DMP 1	0,51				
DMP 2	0,53				
K	-0,49				
pH 1		-0,16	0,52		
pH 2		-0,21	0,47		
COT 1		0,37	0,13		
COT 2		0,36	0,17		
Nt 1		0,35	0,23		
Nt 2		0,31	0,33		
P 1		-0,31	0,34		
P 2		-0,28	0,38		
CS 1		0,37	0,12		
CS 2		0,36	0,18		
COP 1				0,33	0,45
COP 2				0,22	0,55
COS 1				0,34	-0,33
CBM 1				0,46	-0,01
Resp 1				0,18	-0,37
qco2 1				-0,38	-0,33
CBM/C 1				0,44	-0,19
CBM/C 2				0,39	-0,32

DA: densidad aparente, DMP: diámetro medio ponderado, K: conductividad hidráulica, COT: carbono orgánico total, CS: carbono de stock, Nt: nitrógeno total, Pext: fósforo extractable. COP: carbono orgánico particulado, COS: carbono orgánico soluble, CBM: carbono de biomasa microbiana, qCO2: cociente metabólico, CBM/C: cociente microbiano. 1:0-10 cm, 2: 10-20 cm.

**Normalización de los indicadores**

Para la normalización de los indicadores se utiliza el modelo lineal.

Modelo lineal: las variables son normalizadas según se considere que responde al criterio de “cuanto mayor es mejor” (límite superior – LS), caso en el cual se divide el valor correspondiente para cada observación por el mayor valor observado de la variable; o si responde al criterio “cuanto menor es mejor” (límite inferior – LI), entonces se divide el menor valor observado de la variable por el valor para cada observación. También se presenta el caso de “óptimo”, por ejemplo en el caso del pH. Si el pH del suelo presenta un valor entre 6,5 y 7,5, se considera que esta dentro de un rango óptimo y se le otorga un valor de 1. Si el valor de pH es menor a 6,5, se toma el criterio de “Cuanto mayor es mejor”. Si en cambio el valor de pH es mayor a 7,5, se normalizará según el criterio de “cuanto menor es mejor”.

**Ejemplo:**

Para los indicadores seleccionados, se consideró que el COT, COP y CBM responden al criterio “cuanto mayor es mejor”; y el DMP a “cuanto menor es mejor”

**3. Integración de los indicadores dentro de un índice de calidad de suelos.**

Índice aditivo ponderado:

$$ICS: (\sum WF SF) + (\sum WQSQ) + (\sum WB SB)$$

ICS = índice de Calidad de Suelo  
W = factor de ponderación derivado del ACP  
S = valor normalizado de los indicadores

A los indicadores físicos (F), químicos (Q) y biológicos (B) se les otorga el mismo peso dentro del índice. En caso de que queden seleccionadas dos o más CP dentro de un grupo de variables (F, Q

o B) los mismos deben ser ponderados utilizando los resultados derivados del ACP. Para ello el porcentaje de la variación de los datos explicado por cada CP es dividido por el porcentaje total de variación explicado por todas las CP seleccionadas. Si dentro de una misma CP quede seleccionado más de un indicador, cada uno de ellos se multiplicará por el porcentaje ponderado de los autovalores recibidos por los indicadores en la CP correspondiente.

### Ejemplo

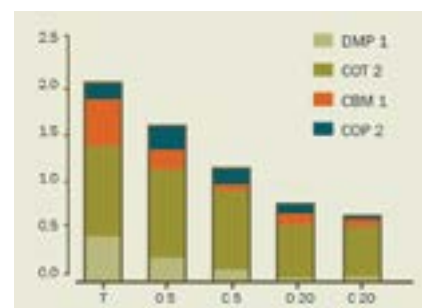
En el caso del indicador físico (DMP) y el químico (COT) seleccionado, los mismos no fueron ponderados dentro del índice ya que fueron los únicos seleccionados. Para las variables biológicas la CP 1 explicó el 58 % de la variabilidad del modelo, y la CP 2 el 31%. Es decir que entre ambas CP seleccionadas explicaron un total de 89% de la variabilidad del modelo. Entonces para obtener la ponderación de los indicadores seleccionados en la CP 1 se realiza el siguiente cálculo:  $(58 \times 100) / 89 = 65$ , por tanto el CBM está ponderado por 0,65 en el índice. El mismo procedimiento fue realizado para la CP 2, quedando el COP ponderado por 0,35. De esta manera el índice de calidad de suelo queda conformado de la siguiente manera:

$$ICS: DMP\ 1 + COT\ 2 + (0,65 * CBM\ 1 + 0,35 * COP\ 2)$$

Para comparar la sensibilidad de los índices obtenidos se calculan los valores para cada situación de manejo y/o degradación de suelo estudiada dentro de cada sistema productivo. Sobre estos resultados se realiza análisis de varianza y prueba de comparaciones múltiples (DGC) con un nivel de significancia de 0,05. Se considera más sensible a aquél que logró diferenciar la mayor cantidad de situaciones de acuerdo a los criterios utilizados.

### Ejemplo

En la figura 1 pueden observarse los valores de calidad de suelo obtenidos para las situaciones estudiadas. Los valores graficados de los indicadores corresponden a sus valores normalizados. Puede observarse que la situación testigo (T) presentó los mayores valores, seguido por la situación de manejo orgánico de 5 años (O 5), luego la situación de manejo convencional de 5 años (C 5). Estas dos situaciones corresponden a lotes que no habían sido cultivados por al menos 10 años antes de ser puestos en producción. Finalmente los menores valores observados corresponden en primer lugar a la situación de más de 20 años de horticultura bajo manejo orgánico (O 20), y por último a la situación de más de 20 años bajo manejo convencional (C 20). Cabe destacar que para todos los sistemas productivos evaluados el sistema de labranza utilizado fue convencional (Arado de reja y vertedera), siendo la diferencia principal el aporte de enmiendas orgánicas en los sistemas bajo manejo orgánico, y la aplicación de fertilizantes sintéticos en los sistemas convencionales.



**Figura 1:** Valores obtenidos mediante la aplicación del índice de calidad de suelos (ICS) para la situación testigo (T), los lotes con 5 años de producción bajo manejo orgánico y convencional respectivamente (O 5 y C 5) y los lotes con más de 20 años bajo agricultura bajo manejo orgánico y convencional (O 20 y C 20). COT: carbono orgánico total, DMP: diámetro medio ponderado, CBM: carbono de biomasa microbiana, COP: carbono orgánico particulado I y II corresponden a las profundidades de 0-10 cm y 10- 20 cm respectivamente.

### Consideraciones finales

Se espera que la metodología de construcción de índices presentada contribuya a unificar los criterios de evaluación de la calidad de los suelos en la Argentina. La aplicación de la misma por parte de distintos investigadores constituye la base a partir de la cual se puede continuar el camino hacia la evaluación de los suelos a mayor escala. De esta manera sería posible construir índices de calidad de suelo para las diferentes zonas productivas del país y aplicarlos en diferentes ambientes y sistemas productivos con el fin de validar su sensibilidad y eficiencia en la evaluación de la calidad de los suelos.

### Bibliografía

- Acton DF y Padbury GA. 1993. A conceptual framework for soil quality assessment and monitoring. A program to assess and monitor soil quality in Canada. Soil quality evaluation summary. Res. Branch Agric Ottawa, Canada.
- Andrews SS, Karlen DL y Mitchell JP. 2002 a. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. Agric. Ecosyst. Environ. 90: 25-45.
- Andrews SS, Mitchell JP, Manicini R, Karlen DJ, Hartz TK, Horwath WR, Pettygrove GS, Scow KM y Munk DS. 2002 b. On-farm assessment of soil quality in California's Central Valley. Agron. J. 94: 12-23.
- Andrews SS, Karlen DL y Cambardella CA. 2004. The Soil Management Assessment Framework: A Quantitative Soil Quality Evaluation Method. Soil Sci. Soc. Am. J. 68, 1945-1962.
- Bastidia F, Moreno JL, Hernández T, García C. 2006. Microbiological degradation index of soil in a semiarid climate. Soil Biol Biochem. 38, 3463-3473.
- Bastidia F, Zsolnay A, Hernandez T y García C. 2008. Past, present and future of soil quality in-

dices: A biological perspectiva. *Geo.* 147, 159-171.

Blair GL, Lefroid RDB, Lise L. 1995. Soil carbon fractions based on their degree oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Aus J of Agric Res.* 46, 1459-1466.

Cambardella CA, Moorman TB, Andrews SS y Karlen DL. 2004. Watershed-scale assessment of soil quality in the loess hills of southwest Iowa. *Soil Till Res.* 78, 237-247.

Dawson JJC, Godsiffe EJ, Thompson LP, Ralebitso-Senior TK, Killham KS y Paton GI. 2007. Application of biological indicators to assess recovery of hydrocarbon impacted soils. *Soil Biol Biochem.* 39, 164-177.

De Bona FD, Bayer C, Dieckow J y Bergamaschi H. 2008. Soil quality assessed by carbon management index in a subtropical Acrisol subjected to tillage systems and irrigation. *Aus. J Soil Res.* 46, 368-377.

Di Rienzo J, Guzman, AW y Casanoves F. 2002. A multiple comparison method based on the distribution of the root node distance of a binary tree. *J Agric Biol Environ Statist.* 7 (2):1-14.

Doran JW y Parkin TB. 1994. Defining and assessing soil quality. In: Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.E., Stewart, B.A. (Eds.). *Defining soil quality for a Sustainable Environment.* Soil Science Society of America, Madison, pp.: 3-21.

Doran JW y Parkin TB. 1996. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: Doran JW, Jones AJ (Eds.). *Methods for Assessing Soil Quality.* SSSA Special Pub. 49, Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI, pp. 25-37.

Erkossa T, Itanna F y Stahr K. 2007. Indexing soil quality: a new paradigm in soil science research. *Aust J Soil Res.* 45, 129-137.

Giuffré L, Romaniuk R, Conti ME, Bartoloni N. 2006. Multivariate evaluation of no-tillage system quality indicators in Argiudolls of Rolling Pampa (Argentina). *Biol Fert Soils.* 42: 556-560.

Glover JD, Reganold JP y Andrews PK. 2000. Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington State. *Agric. Eco. Environ.* 80, 29-45.

Gregorich EG, Carter MR, Angers DA, Monreal CM y Ellert BH. 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Can. J. Soil Sci.* 74, 367-385.

Herrick JE, Brown JR, Tugel AJ, Shaver PL y Havstad KM. 2002. Application of Soil Quality to Monitoring and Management: Paradigms from Rangeland Ecology. *Agron. J.* 94, 3-11.

Hussain I, Olson KR, Wander MM y Karlen DL. 1999. Adaptation of soil quality indexes and application to three tillage systems in southern Illinois. *Soil Till Res.* 50, 237-249.

Karlen DL, Wollenhaupt NC, Erbach DC, Berry EC, Swan JB, Eash NS y Jordahl JL. 1994. Long term tillage effects on soil quality. *Soil Till. Res.* 32, 313-327.

Karlen DL y Stott DE. 1994. Framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: Doran JW, Coleman DC, Bezdicek DF, Stewart BA (Eds.). *Defining Soil Quality for Sustainable Environment.* SSSA Special Pub. 35, Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI, pp. 53-72.

Karlen DL, Mausback MJ, Doran JW, Cline RG, Harris RF y Schuman GE. 1997. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 4-10.

Karlen DG, Tomer MD, Neppel J, Cambardella CA. 2009. A preliminary watershed scale soil quality assessment in north central Iowa, USA. *Soil Till Res.* 99, 291-299.

Larson WE y Pierce FJ. 1994. The dynamic of soil quality as a measure of sustainable management. Pp. 53-72. In JW Doran et al. (Ed.) *Defining soil quality for a sustainable environment.* SSSA Spec. Pub. 35. SSSA, ASA, Madison, WI.

Lu J, Jiang P, Wu L y Andrew CH. 2008. Assessing

soil quality data by positive matrix

factorization. *Geo.* 145, 259-266.

Masto RE, Chonkar PK, Singh D y Parta AK. 2007. Soil quality response to long-term nutrient and crop management on a semi-arid Inceptisol. *Agric. Ecosyst. Environ.* 18, 130-142.

Nael M, Khademi H y Hajabbasi MA. 2004. Response of soil quality indicators and their spatial variability to land degradation in central Iran. *App. Soil Ecol.* 27, 221-232.

Pierce FJ y Larson WE. 1993. Developing criteria to evaluate sustainable land management. In: Kimble JM (Ed.), *Proc. Of the 8th Int. Soil Management Workshop: Utilization of Soil Survey Information for Sustainable Land Use, May 1993, USDA-SCS, National Soil Survey, Lincoln, WI, pp. 7-14.*

Qi Y, Darilek JL, Huang B, Zhao Y, Sun W y Gu Z. 2009. Evaluating soil quality indexes in agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geo.* 149, 325-334.

Raisei F. 2006. Carbon and N mineralization as affected by soil cultivation and crop residue in a calcareous wetland ecosystem in Central Iran. *Agric. Ecosyst. Environ.* 112, 13-20.

Romaniuk R, Giuffré L, Costantini A y Nannipieri P. 2011. A comparison of indexing methods to evaluate quality of soils: the role of soil microbiological properties. *Soil Research*, 49, 733-741.

Romaniuk R, Giuffré L, Costantini A y Nannipieri P. 2014. A comparison of indexing methods to evaluate quality of horticultural soils. Part II. Sensitivity of soil microbiological indicators. *Soil Research.* 52: 409-418.

Sharma KL, Uttam Kumar Mandal, Srinivas K, Vital KPR, Biswapati Mandal, Kusuma Grace J y Ramesh V. 2005. Long-term soil management effects on crop yields and soil quality in a dryland Alfisol. *Soil Till. Res.* 83, 246-259.

Wander MM y GA Bollero. 1999. Soil Quality assessment of tillage impacts in Illinois. *Soil Sci Soc Am J.* 63, 961-971.

Wienhold BJ, Pikul JL, Liebig LA, Mikha MM, Varvel GE, Doran JW y Andrews SS. 2006. Cropping systems effects on soil quality in the Great Plains: Synthesis from a regional project. *Renew. Agric. Food System.* 21, 26-35.

Zhang B, Zhang Y, Chen D, White RE y Li Y. 2004. A quantitative evaluation system of soil productivity for intensive agriculture in China. *Geo.* 123, 319-331.

## Una propuesta metodológica para la selección de indicadores y la obtención de índices de calidad de suelo

Diana Marcela Toledo<sup>1</sup> y Sara Vázquez<sup>1</sup>

La calidad del suelo (CS) está íntimamente relacionada a la calidad ambiental, a la sustentabilidad de los sistemas de cultivo y a la salud vegetal, animal y humana (Doran & Zeiss, 2000). El Comité para la salud del suelo, de la Soil Science Society of America, adopta la definición de CS como “la capacidad del suelo para funcionar dentro de ciertos límites naturales y antrópicos del ecosistema, sustentar la productividad vegetal y animal, mantener la calidad del agua y del aire, promover la salud de plantas, animales y soportar la habitabilidad y salud del hombre” (Larson & Pierce, 1991; Doran & Parkin, 1994; Karlen et al., 1997;

De la Rosa, 2008). Se trata de un concepto holístico, que reconoce al suelo como parte de un sistema de producción diverso y dinámico, con atributos físicos, químicos y biológicos, que se pueden cuantificar en escalas temporales específicas, reconoce también los distintos roles de los suelos en los agroecosistemas y en los sistemas naturales (Karlen et al., 1997; Sánchez et al., 2003).

Considerando entonces a la CS como un elemento clave de la agricultura sustentable (Warkentin, 1995), su conocimiento y la cuantificación del impacto del uso, resulta fundamental para el desa-

---

<sup>1</sup>-Universidad Nacional del Nordeste. Facultad de Ciencias Agrarias. Cátedra de Edafología. Sargento Cabral 2131. CP 3400. Corrientes. Argentina. E-mail: marcelatoledo94@hotmail.com

rollo de sistemas productivos sustentables, tanto desde el punto de vista ambiental como económico (Cardoso Niero et al., 2010), siendo una herramienta básica a la hora de tomar decisiones de manejo para lograr una producción sostenible en el tiempo y que contribuya a la calidad ambiental. Dada las múltiples funciones del suelo: producción, hidrológica, de almacenamiento de agua, de nutrientes y energía, sostenibilidad y calidad ambiental, de control de la contaminación, de espacio para el desarrollo de la vida entre otras (FAO, 1995; Cruz et al., 2004), la calidad es más bien relativa que absoluta, siendo entonces multifuncional (De la Rosa, 2008).

La evaluación de la CS es un campo promisorio en constante evolución (Qi et al., 2009), y se relaciona con un gran número de propiedades edáficas, siendo necesaria la selección de aquellas más sensibles a los cambios producidos por el uso y las prácticas de manejo (Trasar-Cepeda et al., 1999; Sánchez-Marañón et al., 2002). En base a la compleja naturaleza del sistema-suelo, se pueden distinguir dos tipos de calidad: inherente y dinámica (De la Rosa, 2008).

La calidad inherente del suelo es intrínseca, debida a su composición, es función del material geológico, del material parental y de la topografía, siendo la mineralogía y la distribución del tamaño de partículas, estáticas o de poco cambio. Es el resultado de los factores clima, topografía, organismos, material parental y tiempo (Jenny, 1941), y está gobernada por los procesos formadores de manera que cada suelo tiene una capacidad natural para funcionar (Pierce & Larson, 1993). Puede ser definida por un rango de valores óptimos de propiedades del suelo que reflejan el potencial ideal del mismo para cumplir una función específica (Karlen et al., 1997).

La calidad dinámica es debida a factores extrín-

secos, está relacionada con la producción de cultivos, y comprende todas las propiedades que pueden cambiar en respuesta al uso y manejo antrópicos y que están fuertemente influenciadas por las prácticas agronómicas (Pierce & Larson, 1993). Es también llamada "salud del suelo" y depende de las propiedades más sensibles a los cambios y son objeto de estudio en el monitoreo de los suelos (De la Rosa, 2008).

#### **Evaluación de la calidad del suelo**

La palabra "Indicador" proviene del verbo latino "indicare", que significa revelar, señalar. Así, la evaluación de la calidad consiste en valorar y explicar los cambios sucedidos en el suelo en el espacio y en el tiempo a través de parámetros o indicadores que "revelan" su funcionamiento (Toledo et al., 2015).

La CS no se puede medir directamente, pero se puede inferir a través de la determinación de indicadores (Bredja et al., 2000) y a través de la comparación de los resultados obtenidos para evaluar las consecuencias de los diferentes sistemas y/o prácticas agronómicas (Karlen et al., 1997; Giuffré et al., 2006).

La evaluación y seguimiento de los cambios mediante la obtención de indicadores, hace posible evaluar las ganancias y pérdidas de calidad (Marriscal Sancho, 2008). De este modo, su evaluación consiste en valorar y explicar los cambios sucedidos en el suelo en el espacio y en el tiempo, a través de parámetros que valoran el cumplimiento de sus funciones (Doran & Parkin, 1994).

Se consideran como indicadores de calidad (IC), a las propiedades y procesos edáficos que resultan ser sensibles a los cambios en las funciones del suelo (Doran & Jones, 1996). Dependiendo del tipo de funcionalidad que esté bajo estudio, las propiedades seleccionadas para medir la CS

pueden variar (Nortcliff, 2002; Etchevers et al., 2009). La cantidad y multidimensionalidad de las variables que intervienen en un agroecosistema (Villamil et al., 2008) y dentro de éste, en el sistema suelo, hacen que determinar la CS, no sea un estudio sencillo. Por ello, resulta necesario que la complejidad y multidimensión sean simplificadas en valores claros, objetivos y generales que sean obtenidos en base a la información brindada por los IC.

Al evaluar el impacto del cambio de uso sobre la calidad, es importante reunir los IC en grupos como por ejemplo lo aplicado por la USDA: físicos, químicos, biológicos, y visuales o cualitativos (NRCS-USDA, 1996).

La división en categorías resulta muy importante a la hora de seleccionar IC para la construcción de índices, ya que permitirá obtener índices de calidad física, química y biológica del suelo por separado. Si bien se sabe que las propiedades del suelo están interrelacionadas, también hay evidencias de que responden en distintos plazos de tiempo. Por ejemplo, existe el conocimiento previo de que la calidad física obedece a cambios en el largo plazo en tanto que la biológica a cambios en el corto plazo (De la Rosa, 2008), por su mayor dinamismo y sensibilidad a las prácticas agronómicas, tomando la calidad química una posición intermedia.

Por lo expuesto el primer paso será entonces agrupar en categorías los atributos de suelo a evaluar.

Para los fines de esta demostración se expondrá una sola categoría: Atributos químicos.

#### **Selección de indicadores de calidad**

En este segundo paso se debe considerar que si bien, la selección de un conjunto mínimo de datos (CMD) va en detrimento de la pérdida de

información de los indicadores que no son elegidos, reduce la necesidad de determinar un gran número de variables, y evita problemas como la redundancia de información y un trabajo de laboratorio tedioso (Qi et al.; 2009; Rojas, 2012; Toledo & Vazquez, 2016).

Los componentes de un CMD no son universales, y los adecuados para una evaluación indirecta, son aquellos determinados como críticos para los objetivos de cada manejo (Andrews et al., 2004).

La aplicación de técnicas estadísticas multivariadas como el análisis de componentes principales (ACP), permite la evaluación de la CS, proporcionando un medio objetivo de extraer información e identificar los parámetros de mayor peso y relevancia (Wander & Bollero, 1999; Giuffré et al., 2006).

Se recomienda entonces, conformar un conjunto mínimo de datos (CMD) cuya composición variará con cada caso bajo estudio. Mientras que algunos de los IC pueden ser muy sensibles a los cambios, otros pueden ser más sutiles; lo que se busca es medir y cuantificar los indicadores más sensibles y desarrollar con ellos Índices de calidad que se puedan utilizar de forma fiable para vigilar y predecir el impacto de los sistemas agrícolas y prácticas de manejo (Parr et al., 1992). Así mismo los índices pueden proporcionar una indicación temprana de la degradación del suelo y la necesidad de medidas correctivas.

Para la selección de los IC más sensibles recomendamos emplear técnicas de análisis univariado como ANOVA y prueba de LSD ( $p < 0,05$ ) (Tabla 1) y el empleo de un análisis exploratorio de los datos a través una visualización multidimensional de los mismos tal como el aplicado por Villamil et al. (2008), mediante el empleo de análisis de componentes principales (ACP). Esta técnica descriptiva permite estudiar las relaciones que existen entre las variables cuantitativas, sin considerar

a priori, ninguna estructura, ni de variables, ni de individuos (Palm, 1998), de manera de visualizar simultáneamente el comportamiento de las variables, y determinar cuáles son las que más influyen en la dispersión de los individuos (Villamil et al., 2008; Rojas, 2012).

En el caso que se expone se utilizó el paquete FactoMineR, específicamente diseñado para realizar análisis multivariado con el programa R Versión 2.15.0 (R-Project, 2012). Se estableció que aquellos atributos que no resultaran significativamente afectados por el uso del suelo ( $P > 0,05$ ) en al menos una de las tres profundidades evaluadas, no serían considerados dentro del CMD (Wander & Bollero, 1999; Toledo et al., 2016). También se tuvo en cuenta si los coeficientes de variación (CV) encontrados para los distintos parámetros cabían dentro de los esperados según Pennock et al. (2008).

Los datos que figuran en la Tabla 1 fueron tomados como ejemplo y analizados mediante la apli-

cación de los programas estadísticos INFOSTAT 2011 (Di Rienzo et al., 2011) y R Versión 2.15.0 (R-Project, 2012).

El conjunto mínimo de datos (CMD) para la categoría de variables de orden químico, en los primeros 0,30 m del perfil, quedó conformado por: pH, carbono orgánico (CO), nitrógeno total (N), fósforo asimilable (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), hidrógeno (H) y aluminio (Al) intercambiables. La variable CIC, si bien presentó diferencias significativas, no fue incluida para evitar redundancia ya que la misma surge de la sumatoria de las bases y la acidez intercambiables.

Es importante realizar una visualización multivariada de los datos, a través de un análisis exploratorio ya que posibilita establecer para cada profundidad las relaciones entre variables, distinguir los usos de suelo y conocer cuales atributos presentan un mayor potencial como indicadores de calidad.

	Prof.	Sv	Cl	Ta	Yc	CV	p-valor
pH KCl	1	4,35a	3,97ab	4,28ab	3,81b	15,80	0,152
	2	4,13a	4,29a	4,12ab	3,68b	13,42	0,0407
	3	3,87b	4,36a	4,03ab	3,66b	11,62	0,0056
CO g kg <sup>-1</sup>	1	40,3a	23,5b	21,6bc	18,9c	16,70	<0,0001
	2	21,7a	17,2b	16,2b	17,2b	10,34	<0,0001
	3	17,5a	12,4c	13,5bc	14,8b	11,86	<0,0001
N g kg <sup>-1</sup>	1	4,7a	2,4b	2,0c	1,9c	19,32	<0,0001
	2	2,7a	1,9b	1,5c	1,6bc	18,38	<0,0001
	3	2,0a	1,5b	1,3b	1,4b	16,16	<0,0001
P mg kg <sup>-1</sup>	1	4,59b	12,48a	6,48b	3,82b	94,63	0,0086
	2	2,33a	0,91b	1,86a	1,93a	51,27	0,0032
	3	1,51a	0,42c	0,98b	1,20ab	48,68	<0,0001
K cmolec kg <sup>-1</sup> *	1	0,63ab	0,71a	0,72a	0,41b	47,96	0,0415
	2	0,43a	0,59a	0,57a	0,19b	63,22	0,0035
	3	0,33a	0,48a	0,51a	0,13b	66,37	0,0012
Ca cmolec kg <sup>-1</sup>	1	16,11a	7,48b	6,89bc	3,45c	54,91	<0,0001
	2	8,44a	6,85a	6,04a	3,20b	52,48	0,0025
	3	6,05ab	7,86a	5,66b	3,19c	44,32	0,0006
Mg cmolec kg <sup>-1</sup> *	1	3,24a	0,97b	1,90ab	0,75b	98,24	0,0030
	2	1,83a	1,12b	1,30ab	0,53c	56,02	0,0003
	3	1,50a	1,23a	1,01ab	0,48b	67,35	0,0078
H cmolec kg <sup>-1</sup> *	1	1,72ab	0,60c	0,87bc	2,59a	85,75	0,0011
	2	2,21ab	0,86c	1,43bc	3,00a	78,24	0,0055
	3	2,68a	0,82b	1,33b	2,93a	65,78	0,0003
Al Cmolec kg <sup>-1</sup> *	1	0,54b	0,05b	0,08b	0,81a	118,02	<0,0001
	2	0,97b	0,09c	0,62bc	2,23a	98,73	<0,0001
	3	1,29b	0,18c	0,60c	2,21a	72,51	<0,0001
CIC cmolec kg <sup>-1</sup> *	1	22,24a	9,80b	10,39b	9,00b	36,17	<0,0001
	2	13,88a	9,50b	9,35b	9,14b	24,40	<0,0001
	3	11,85a	10,57a	8,50b	8,94b	18,01	<0,0001

**pH:** pH en KCl, **CO:** carbono orgánico, **N:** nitrógeno total, **P:** fósforo extractable, **K:** potasio; **Ca:** calcio, **Mg:** magnesio; **H:** acidez intercambiable; **Al:** aluminio intercambiable; **CIC:** capacidad de intercambio catiónico.

Fuente: Proyecto "Dinámica del fósforo en Oxisoles bajo distintos sistemas de uso". Cátedra de Edafología. Universidad Nacional del Nordeste. Tabla de datos publicada en Dalurzo et al., 2006.



**Construcción de índices de calidad**

El tercer paso consiste en desarrollar índices de calidad a partir del CMD conformado.

Es importante destacar que existen indicadores simples e índices sintéticos, los primeros están constituidos por la combinación de dos o más datos, mientras que los índices son funciones matemáticas sintetizadoras (EEA, 2002) utilizadas para resumir información compleja sobre un fenómeno en estudio, con el objeto de detectar rápidamente cambios dentro de un sistema (Torres et al., 2006). Entre las técnicas más usadas se destacan la ponderación y transformación de los indicadores y su combinación dentro de un índice (Andrews et al., 2002; Bastida et al., 2006); la obtención de una variable sintética o combinación lineal de las variables originales que resume información, y es interpretada como un índice (Godshalk & Timothy, 1988; Almenara-Barrios et al., 2002; Tusell, 2008; Santana Rodríguez et al., 2010); o la aplicación de regresiones lineales múltiples, donde una variable es calculada por la combinación lineal de otras (Trasar-Cepeda et al., 1998; Zornoza et al., 2008).

Esta propuesta metodológica incluye desarrollar índices de calidad a partir de funciones matemáticas sintetizadoras, que resuman información compleja sobre el estado del sistema suelo, y cuantificar así la calidad de los suelos y monitorear su dinámica bajo distintos sistemas de uso.

Así, a partir del CMD obtenido para la categoría de orden químico, se procede al desarrollo de índices de calidad mediante la aplicación de ACP.

La técnica permite concentrar toda la variación presente en la matriz de datos originales en unos pocos ejes o componentes principales (CP). Cada componente es entonces el resultado de una combinación lineal de las variables originales, en donde cada una tiene una ponderación diferente, en proporción a las magnitudes de cada elemento que conforma el autovector respectivo. El significado de cada CP depende de la magnitud de tales ponderaciones y de su signo, y es necesario encontrarle sentido desde un punto de vista técnico (Quevedo, 1991). La contribución de los indicadores en cada CP, se expresa en autovalores y autovectores (Franco & Hidalgo, 2003).

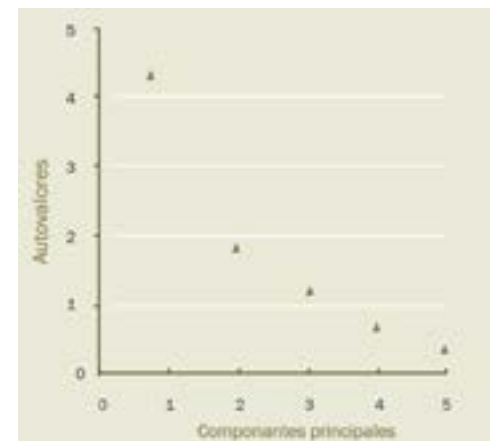
**Selección del número de componentes y de atributos dentro de cada componente**

A partir del CMD y considerando las 3 profundidades juntas (0,30 m), se efectúa un análisis de componentes principales normado (Tabla 2) a partir de la matriz de correlación. Trabajando con los datos estandarizados (media=0 y variancia=1) a fin de que todas las variables originales tengan igual importancia, ya que las mismas no fueron medidas en iguales unidades (Manly, 1997; Husson et al., 2011).

CP	1	2	3	4	5
Autovalor	4,395	1,718	1,258	0,600	0,395
Diferencia	2,676	0,460	0,657	0,205	0,060
Proporción	0,488	0,190	0,139	0,066	0,043
Acumulada	0,488	0,679	0,819	0,885	0,929

**Tabla 2:** Primeras 5 componentes de las 9 componentes principales obtenidas para las 9 variables químicas evaluadas en los 0,30 m del perfil de suelo, sus autovalores, proporción de variancia explicada y variancia acumulada.

Las CP's son seleccionadas luego en base a la contribución de los autovalores (>1) respecto a la variancia total (Fig.1).



**Figura 1:** Gráfico de codo o Scree plot de las propiedades químicas de 0-0,30m.

Conforme al Scree plot, seleccionamos entonces las 3 primeras componentes principales para la construcción de los índices, las cuales como puede observarse en la Tabla 2, explican un 82% de la variabilidad total.

Cuando se presenten casos en los que una misma variable tiene alta carga en 2 componentes a la vez (CO, N, H y Al), se sugiere proceder a consultar la tabla de correlaciones de las variables con las componentes, conservando la variable en aquella componente con la cual presentó mayor correlación positiva.

Así, para la primera dimensión, las variables seleccionadas son: pH, carbono orgánico, nitrógeno total, potasio, calcio y magnesio intercambiables. Cabe destacar que si bien CO y N, son variables que presentan una alta correlación entre ellas, se conservaron ambas en el CMD debido a que, en sistemas que reciben fertilizaciones nitrogenadas (tabaco, citrus) el N proviene no solamente de la mineralización de los compuestos orgánicos sino

A continuación se procede a considerar con contribución significativa a cada componente principal, a aquellas variables cuyos autovectores presentan cargas >2/3 de la carga máxima y una alta correlación con las componentes (Tabla 3).

Variable	CP1	CP2	CP3
pH	-0,35*	-0,24	-0,25
CO	0,32*	0,50	0,02
N	0,35*	0,46*	-0,09
P	0,14	0,18	0,75
K	0,30*	-0,11	0,47
Ca	0,43	0,04	-0,23
Mg	0,32*	0,16	-0,25
H	-0,32*	0,47*	-0,06
Al	0,36*	0,41*	-0,07

**Tabla 3:** Autovectores de las 3 componentes seleccionadas para las variables químicas. Se señalan con negrita a la carga máxima y con \*, a aquellas variables cuyos autovectores presentaron cargas >2/3 de la carga máxima.

también de los minerales nitrogenados aportados; y a su vez la materia orgánica es considerada un indicador universal debido a su gran influencia en las funciones del suelo, en su calidad, y en la productividad (Shukla et al., 2004; Galantini & Rosell, 2006). En sistemas sin fertilizaciones nitrogenadas entonces el N podría no ser considerado incluido, ya que el 98 % del N proviene de la materia orgánica, a menos que tenga un interés especial que lo justifique.

A continuación, para la segunda dimensión, las variables seleccionadas son: H y Al intercambiables, en tanto que para la tercera dimensión la única variable que presentó una alta carga fue el fósforo disponible.

**Desarrollo de índices de calidad**

En base a las formulaciones matemáticas provenientes del ACP, teniendo en cuenta las 3 primeras componentes y las variables seleccionadas, se obtuvieron 3 índices de calidad química del suelo.

A partir de la CP1, el índice obtenido se denominó IQ-30-1, su formulación se observa a continuación:

$$IQ-30-1 = Ca * 0,43 + CO * 0,32 + N * 0,35 + pH * 0,35 + K * 0,30 + Mg * 0,32$$

Corresponde a un índice de calidad relacionado a la "fertilidad química" del suelo. Como se puede interpretar el índice tomará mayores valores, cuanto mayor sea el contenido de CO, de macronutrientes y el pH del suelo. Es decir que valores altos del índice IQ-30-1, se asociarían a suelos de alta calidad.

A partir de la CP2, el índice desarrollado se denominó IQ-30-2, su formulación fue:

$$IQ-30-2 = Al * 0,36 + H * 0,32$$

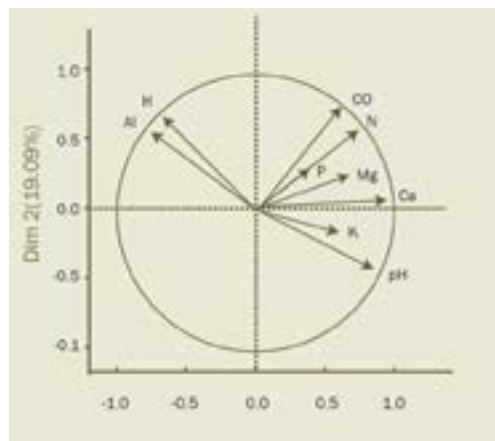
y corresponde a un índice de calidad relacionado a la "acidez potencial". El mismo será mayor cuando mayores sean los contenidos de aluminio e hidrógeno intercambiables, y estaría asociado a una menor calidad de suelo.

A partir de la CP3, el índice desarrollado se denominó IQ-30-3, su formulación fue:

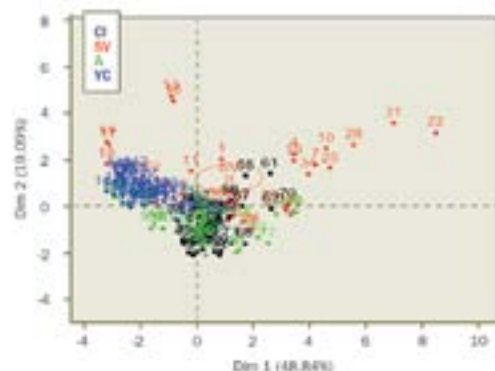
$$IQ-30-3 = P * 0,75$$

y corresponde a un índice de calidad relacionado a la "disponibilidad de fósforo" para los vegetales. El mismo sólo depende del contenido de fósforo disponible, por cuanto valores altos estarían asociados a suelos de alta calidad.

El cuarto paso consiste en la aplicación del paquete FactoMineR (R-Project) mediante el cual se logra obtener el círculo de correlaciones (Fig 2) y el bi-plot de individuos y elipses de confianza al 95 % (Fig. 3). Obteniendo así más información acerca de las relaciones entre indicadores y la distribución de los individuos en el plano.



**Figura 2.** Círculo de correlaciones con la representación de las variables químicas respecto a las componentes o dimensiones (Dim) 1 y 2



**Figura 3:** Gráfico bi-plot correspondiente al ACP de las variables químicas de 0-0,30 m: elipses de confianza al 95% rodeando las categorías de uso del suelo, sobre el plano principal producido por las componentes o dimensiones 1 y 2.

Superponiendo la información otorgada por las Figuras 2 y 3, se puede observar para este ejemplo que los suelos prístinos, tomados como referencia de alta calidad de suelos, se ubicaron con los mayores contenidos de CO, N, P y de bases cambiables, y con menor acidez. Los suelos bajo Yerba mate (no recibieron enmiendas) se ubicaron a la izquierda con los menores contenidos de CO, N, y de bases cambiables, con la mayor acidez intercambiable; en tanto que los suelos bajo Tabaco y Citrus que recibieron fertilizaciones y enclado lo hicieron en una posición intermedia. Una mayor descripción de los tratamientos presentados puede encontrarse en Toledo et al., 2013.

Puntuaciones de los índices de calidad para los distintos usos de suelo

El quinto y último paso propuesto es obtener, a partir de la aplicación de las formulaciones desarrolladas, y de los valores de las variables previamente estandarizados, las puntuaciones de los índices para las distintas situaciones que se quieren cuantificar. Se recomienda también la aplicación de ANOVA y Prueba de LSD (P<0,05) para establecer diferencias entre tratamientos.

Cabe destacar que a posteriori, es muy importante efectuar la validación de los índices, considerando las características de clima y suelo en los que fueron desarrollados, a fin de comprobar su efectividad y su sensibilidad.

**Conclusiones**

La metodología propuesta permite la selección de indicadores, el desarrollo y obtención de índices de calidad, los cuales constituyen una herramienta útil para la determinación y evaluación de la calidad de los suelos, su monitoreo y el impacto del uso de las tierras.

**Agradecimientos:** A la Ms Sc. J. M. Rojas (EEA-INTA Saenz Peña) por introducirme en el uso del Software R. Al Dr. H. C. Dalurzo y a la Ing. Agr. Arminda Pagliera por la determinación de variables en Yerba mate y Tabaco. A los integrantes de la Cátedra de Edafología, y a la Secretaría General de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional del Nordeste.

## Bibliografía

Almenara-Barrios, J; C García-Ortega; JL González-Caballero & MJ Abellán-Hervás. 2002. Creación de índices de gestión hospitalaria mediante análisis de componentes principales. *Salud pública de México*, 44 (6): 533-540.

Andrews, SS; DL Karlen & JP Mitchell. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 90: 25-45.

Andrews, SS; DL Karlen & CA Cambardella. 2004. The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 68: 1945-1962.

Bastida, F; JL Moreno; T Hernández and C García. 2006. Microbiological degradation index of soils in a semiarid climate, *Soil Biol. Biochem.* 38: 3463-3473.

Bredja, JJ; TB Moorman; DL Karlen & TH Dao. 2000. Identification of regional soil quality factors and indicators: I. Central and southern high plains. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 2115-2124.

Cardoso Niero, LA; SC Falci Dechen; R Marques Coelho & I Clerici De Maria. 2010. Avaliações visuais como índice de qualidade do solo e sua validação por análises físicas e químicas em um Latossolo vermelho distroférrico com usos e manejos distintos. *R. Bras. Ci. Solo*, 34: 1271-1282.

Cruz, AB; J Etchevers Barra; RF del Castillo & C Gutiérrez. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*, 13(2): 90-97. <http://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/572>. Fecha último acceso: 17/12/13.

Dalurzo, HC; Toledo DM & S Vazquez. 2006. Calidad de Suelos en Agroecosistemas de Misiones. En: Bases para la conservación de suelos y aguas en la Cuenca del río Paraná. Ed. Antonio Paz González. Compilado por Díaz, E. et al. Xunta de Galicia-Universidad Nacional de Entre Ríos. 1º edición. Santa Fe. 161p.

De la Rosa, D. 2008. Evaluación agro-ecológica de los suelos para un desarrollo rural sostenible. Ediciones Mundi-Prensa. 404 p.

Di Rienzo, JA; F Casanoves; MG Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & CW Robledo. 2011. InfoStat, Versión 2011. Grupo InfoStat. FCA, UNC, Córdoba, Argentina.

Doran, JW & A Jones. 1996. Methods for assessing soil quality. *SSSA Special Publ.* 49. Soil Science Society of America Inc. Madison, WI.

Doran, JW & TB Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. In: Defining soil quality for sustainable environment. J.W. Doran et al. (Eds.) *SSSA Spec. Publ.* 35. SSSA and ASA, Madison, WI, pp 3-21.

Doran, JW & MR Zeiss. 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology* 15: 3-11.

EEA (European Environment Agency). 2002. Toward and urban atlas. Assessment of spatial data on 25 European cities and urban areas. Copenhagen. Environmental Report N° 30. 185 p.

Etchevers, J; C Hidalgo; M Vergara; M Bautista & J Padilla. 2009. Calidad de suelo: Conceptos, indicadores y aplicación en agricultura. En: López-Blanco, J & M de L Rodríguez Gamiño. Desarrollo de indicadores ambientales y de sustentabilidad en México. Ed. Universidad Nacional Autónoma de México UNAM Colección Geografía para el siglo XXI. Serie Libros de Investigación, n° 3. 196 p.

FAO. 1995. Planning for sustainable use of land resources: towards a new approach. In: WG Sombroek & D Sims (Eds.), *Land and Water Bulletin* n° 2. Publications division. Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO, Rome.

Franco, TL & R Hidalgo. 2003. Análisis estadístico de datos de caracterización morfológica de recursos fitogenéticos. *Boletín técnico IPGRI* n° 8. Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos, Cali, Colombia. 89 p.

Jenny, H. 1941. Factors of soil formation. Mc Graw-Hill Publishers, New York, NY.

Galantini, JA & R Rosell. 2006. Long-term fertilization effects on soil organic matter quality and dynamics under different production systems in semiarid Pampean soils. *Soil Till. Res.*: 87: 72-79.

Giuffré, L; R Romaniuk; ME Conti & N Bartoloni. 2006. Multivariate evaluation of no-tillage system quality indicators in Argiudolls of Rolling Pampa (Argentina). *Biol Fert Soils* 42: 556-560.

Godshalk, BE & HD Timothy. 1988. Factor and principal component analysis as alternative to index selection. *Theor. Appl. Genet.* 76: 352-360.

Husson, F; S Lê & J Pagès. 2011. Exploratory multivariate analysis by example using R. Computer science & data analysis series. Taylor & Francis Group/CRC Press. Boca Raton, 228 pp.

Karlen, DL; MJ Mausbach; JW Doran; RG Cline; RF Harris; & GE Schuman. 1997. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 4-10.

Larson, WE & FJ Pierce. 1991. Conservation and enhancement of soil quality. p 175-203. In Evaluation of sustainable management in the developing world. Vol 2. IBSRAM Proc. 121 (2). Thailand Int. Board for soil Res. and Management, Bangkok.

Manly, BFJ. 1997. Multivariate statistical methods: A primer. Second Ed. Chapman & Hall, London. 216 pp.

Mariscal Sancho, I de L. 2008. Recuperación de la calidad de Ultisoles mediterráneos degradados, mediante la aplicación de enmiendas y formas alternativas de uso. Tesis Doctoral. 296p. Universidad Politécnica de Madrid. España. [http://oa.upm.es/1597/1/IGNACIO\\_DE\\_LOYOLA\\_MARISCAL\\_SANCHO.pdf](http://oa.upm.es/1597/1/IGNACIO_DE_LOYOLA_MARISCAL_SANCHO.pdf) Fecha acceso: 18/12/2013.

Nortcliff, S. 2002. Standardisation of soil quality attributes. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 88: 161-168.

NRCS-USDA. 1996. Indicators for Soil Quality Evaluation. Soil quality information sheet. United States Department of Agriculture, NRCS. [http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/](http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/)

nrcs142p2\_053149.pdf Fecha último acceso: 4/03/2014.

Palm, R. 1998. L'analyse en composantes principales: principe et application. Notes de statistique et d'informatique. Gembloux, Belgique. Fecha último acceso: 20/12/2013. [http://www.gembloux.ulg.ac.be/si/Note98\\_1/analyse.pdf](http://www.gembloux.ulg.ac.be/si/Note98_1/analyse.pdf).

Parr, JF; RI Papendick; SB Hornick & RE Meyer. 1992. Soil quality: Attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture. *American Journal of Alternative Agriculture*, Vol 7, Issue 1-2: 5-11.

Pierce, FJ & WE Larson. 1993. Developing criteria to evaluate sustainable land management's. Pp 7-14. In: JM Kimble (ed.). *Proceedings of the Eighth International Soil Management Workshop: Utilization of soil survey information for sustainable land use*. USDA Soil Conservation Service, National Soil Survey Center.

Pennock, D; T Yates & J Braidek. 2008. Soil Sampling Designs. In: Carter, MR & EG Gregorich, (Eds.). 2008. *Soil Sampling and methods of analysis*. 2nd Ed. Taylor & Francis Group LLC. Pp 25-39.

Qi, Y; JL Darilek; B Huang; Y Zhao; W Sun & Z Gu. 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma* 149: 325-334.

Quevedo, RL. 1991. Una metodología para un estudio de las fincas de producción lechera en el estado Yaracuy. Universidad Central de Venezuela, UCV. Facultad de Agronomía. Maracay-Venezuela. 340 pp.

Rojas, JM. 2012. Indicadores de calidad de suelos desmontados y destinados a la producción agrícola en el área piloto de la Ecorregión chaqueña. Maestría en Ciencias Agrarias, Orientación: Producción Sustentable. Facultad de Agronomía y Zootecnia. Universidad Nacional de Tucumán. 152 pp.

R- Project. Versión 2.15.0. 2012. Disponible en [www.R-project.org](http://cran.r-project.org) or <http://cran.r-project.org/bin/windows/base/old/2.15.0/>. Fecha último acceso: 06/12/2013.

Sánchez, PA; CA Palm & SW Buol. 2003. Fertility capability soil classification: a tool to help assess soil quality in the tropics. In: Sposito, G & A Zabel (eds). The assessment of soil quality. International Journal of Soil Science 114: 157-186.

Sánchez-Marañón, M; M Oriano; G Delgado & R Delgado. 2002. Soil quality in mediterranean mountain environments: effects of land use change. Soil Sci Soc. Am. J. 66: 948-958.

Santana Rodríguez, LM; LA Escobar Jaramillo & PA Capote. 2010. Estimación de un índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite. Revista de Geografía Norte Grande 45: 77-95. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022010000100006>. Fecha último acceso: 02/09/2013.

Shukla, MK; R Lal & M Ebinger. 2004. Soil quality indicators for reclaimed minesoils in southeastern Ohio. Soil Science 169(2) 133-142.

Toledo, DM, JA Galantini, HC Dalurzo, S Vazquez & G Bollero. 2013. Methods for assessing the effects of land-use changes on carbon stocks of subtropical Oxisols. Soil Science Society of America Journal (SSSAJ), 77: 1542-1552.

Toledo, DM. & S Vazquez. 2016. Obtención de indicadores e índices de calidad biológica en suelos rojos bajo distintos cultivos agrícolas. Actas XXV Congreso Argentino de la Ciencia del suelo, p. 121. Río Cuarto, Córdoba. Argentina. 548p.

Toledo DM; JA Galantini; Contreras Leiva SM & S Vazquez. 2015. Stock de carbono y relaciones de estratificación como índices de calidad en Oxisoles subtropicales. En: El impacto de los sistemas actuales de cultivo sobre las propiedades químicas del suelo y sus efectos sobre los balances de carbono. Ed. Sá Pereira, Eduardo de. 1º Edición. Ediciones INTA. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Coronel Suarez, Buenos Aires. Argentina. Pp. 139-144.

Torres, D; A Florentino & M López. 2006. Indicadores e índices de calidad del suelo en un Ultisol bajo diferentes prácticas de manejo conservacionista

en Guárico, Venezuela. Bioagro 18(2): 83-91.

Trasar-Cepeda, C; C Leirós, F Gil-Sotres & S Seoane. 1998. Towards a biochemical quality index for soils: an expression relating several biological and biochemical properties. Biology and Fertility of Soils, 26: 100-106.

Trasar-Cepeda, C; F Camiña; MC Leirós & F Gil-Sotres. 1999. An improved method for measurement of catalase activity in soils. Soil Biol. Biochem. 31: 483-485.

Tusell, F. 2008. Análisis Multivariante. Notas para alumnos de Estadística: Análisis Multivariante. Bilbao, España. 165 pp.

Villamil, MB; FE Miguez & GA Bollero 2008. Multivariate Analysis and Visualization of Soil Quality Data for No-Till Systems. J. Environ. Qual. 37: 2063-2069.

Wander, MM & GA Bollero. 1999. Soil Quality Assessment of Tillage Impacts in Illinois. Soil Sci. Soc. Am. J. 63: 961-971.

Warkentin, BP. 1995. The changing concept of soil quality. J. Soil Water Conserv. 50: 226-228.

Zornoza, R; J Mataix-Solera; C Guerrero; V Arce-negui; J Mataix-Beneyto and I Gómez. 2008 Validating the effectiveness and sensitivity of two soil quality indices based on natural forest soils under Mediterranean conditions, Soil Biol. Biochem., 40, 2079-2087.

## Evaluación de índices de uso de la tierra para predecir cambios en las propiedades del suelo

Leonardo E. Novelli<sup>1</sup> y Octavio P. Caviglia<sup>1,2y3</sup>

### Introducción

Como resultado de la creciente demanda de productos agrícolas para la producción de alimentos, fibras y energía, se han producido importantes cambios en el uso de la tierra en muchas áreas del mundo. Particularmente, en diversas áreas de Sudamérica los sistemas de cultivos extensivos han incrementado la proporción del área cultivada con soja (*Glycine max* [L.] Merr.), principalmente como único cultivo anual (Caviglia y Andrade, 2010; FAOSTAT, 2011). Además, se ha producido una progresiva expansión de la agricultura hacia ambientes frágiles, los cuales tradicionalmente se

encontraban ocupados con ganadería o montes nativos (Baldi y Paruelo, 2008). Los cambios en el uso de la tierra pueden afectar en gran medida las propiedades del suelo y, en consecuencia, la productividad y sustentabilidad de los sistemas (Cambardella y Elliot, 1993). Como respuesta al impacto antrópico se generan modificaciones en la cobertura vegetal del suelo las cuales pueden alterar muchos factores involucrados en los ciclos biogeoquímicos de elementos críticos para la nutrición de las plantas y la funcionalidad del suelo como el C, N y P (Viglizzo et

1-Universidad Nacional de Entre Ríos, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Oro Verde 3101, Entre Ríos, Argentina.

2-INTA, Estación Experimental Paraná. Oro Verde 3101, Entre Ríos, Argentina.

3-CONICET

al., 2011). El monitoreo de las tendencias en las propiedades del suelo es, por lo tanto, una cuestión básica para el mantenimiento de la sustentabilidad de los sistemas, debido a los constantes y crecientes cambios en el uso de la tierra. El objetivo de este trabajo es presentar y discutir la utilidad de la selección de índices de uso de la tierra que permitan predecir cambios en las propiedades del suelo de una manera continua.

**Índices para evaluar los cambios en el uso de la tierra**

El uso de la tierra puede ser caracterizado de diversas formas, siendo las más comunes aquellas que comparan un cambio de acuerdo a un uso corriente (e.g. agrícola, agrícola-ganadera, forestal, etc.) utilizando un pastizal natural o una situación no cultivada como sistema de referencia (Cambardella y Elliot, 1993; Chenu et al., 2000). Ha habido intentos para cuantificar el cambio en el uso de la tierra y correlacionarlo con las propiedades del suelo, utilizando el tiempo transcurrido desde que surgió un cambio (e.g. años bajo agricultura, pastura, siembra directa, etc.) en relación a un pastizal natural o una tierra no cultivada (Studdert et al., 1997; Wilson, 2008). Sin embargo, este tipo de evaluaciones no considera la transición entre los diferentes tratamientos ya que, en general, se comparan tratamientos muy contrastantes (e.g. agricultura vs. pastizal natural). La selección de variables de tipo continuas que permitan predecir cambios en las propiedades del suelo debidas al uso de la tierra, puede ser de gran utilidad para detectar tendencias tempranas de cambios en las propiedades del suelo y para facilitar la detección de umbrales de acción. Índices que incluyan la fracción de tiempo anual con cobertura vegetal viva o la frecuencia de un cultivo particular en la secuencia de cultivos pueden ayudar a caracterizar sistemas con diferente intensidad en el uso de la tierra (Franzlubbers et al., 1994; Farahani et al., 1998; Caviglia y An-

drade, 2010; Novelli et al., 2011, 2013). En este sentido, los pastizales naturales o tierras bajo rotaciones agrícolas-ganaderas que incluyen pasturas cultivadas pueden ser caracterizadas por una elevada fracción de tiempo anual con cobertura viva en comparación con secuencias de cultivos con elevada frecuencia de barbechos, basadas en cultivos anuales (Sasal et al., 2010).

La selección de índices que permitan analizar los cambios en el uso de la tierra utilizando una variable continua surge como una herramienta clave para el desarrollo de sistemas agrícolas sustentables así como también para el diseño de potenciales sistemas de monitoreo, los cuales pueden ser de mucha utilidad para el desarrollo de políticas oficiales (Viglizzo et al., 2012).

**Evaluación de índices de uso de la tierra y su relación con algunas propiedades del suelo**

A modo de ejemplo se presentan algunos resultados que permiten demostrar la utilidad de la selección de índices de uso de la tierra para detectar cambios en algunas propiedades de los suelos.

En un estudio llevado a cabo sobre un Molisol y un Vertisol de Entre Ríos en lotes de producción (considerando secuencias agrícolas y agrícolas-ganaderas) y sitios con pastizal natural (Novelli et al., 2013), se evaluó la utilidad de diferentes índices de uso de la tierra para predecir los cambios en la estabilidad de agregados de suelo por diferentes metodologías: tamizado en húmedo (TH), tamizado en seco (TS), y Le Bissonnais (1996) (LB).

Los índices de uso de la tierra tuvieron en cuenta el tiempo con cobertura vegetal viva (IISm) y la frecuencia de algún cultivo en particular (i.e. soja-FCS; trigo-FCT; cereales, incluyendo trigo, maíz y sorgo-FCC; y pasturas-FCP) en la secuencia de cultivos durante un periodo de 6 años previos al muestreo de suelos (Tabla 1).

**Tabla 1.** Coeficientes de correlación (r) de la relación entre los índices de uso de la tierra y los diámetros medios ponderados de tres métodos de estabilidad estructural (tamizado en seco, tamizado en húmedo, Le Bissonnais) a 0-5 y 5-15 cm de profundidad para once sitios agrícolas y un sitio inalterado, en un Molisol y un Vertisol de Entre Ríos, Argentina.

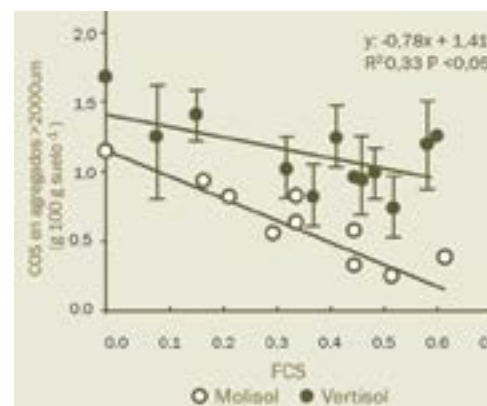
Suelo	Profundidad	DMP (mm)	Índices de uso de la tierra				
			IISm	FCS	FCT	FCC	FCP
Molisol	0-5 cm	TS	0,78 **	-0,87 ***	-0,51 NS	-0,34 NS	0,70 *
		TH	0,76 **	-0,87 ***	-0,52 NS	-0,42 NS	0,72 **
		LB	0,77 **	-0,84 ***	-0,59 *	-0,45 NS	0,78 **
	5-15 cm	TS	0,48 NS	-0,69 *	-0,32 NS	-0,03 NS	0,42 NS
		TH	0,52 NS	-0,52 NS	-0,37 NS	-0,38 NS	0,54 NS
		LB	0,80 **	-0,75 **	-0,65 *	-0,56 NS	0,83 ***
Vertisol	0-5 cm	TS	-0,56 NS	0,71 **	0,47 NS	0,49 NS	-0,57 NS
		TH	-0,08 NS	0,09 NS	-0,32 NS	-0,16 NS	0,09 NS
		LB	0,35 NS	-0,44 NS	-0,45 NS	-0,36 NS	0,43 NS
	5-15 cm	TS	-0,58 *	0,54 NS	0,32 NS	0,46 NS	-0,53 NS
		TH	0,21 NS	-0,39 NS	-0,06 NS	-0,08 NS	0,20 NS
		LB	0,38 NS	-0,20 NS	-0,34 NS	-0,29 NS	0,40 NS

NS, \*, \*\*, \*\*\* indica no significativo, P<0,05; P<0,01; P<0,001; respectivamente. DMP= diámetro medio ponderado. TS, TH y LB indican tamizado seco, tamizado húmedo y método Le Bissonnais, respectivamente. IISm= índice de intensificación de la secuencia (meses con cultivos en relación a los meses de la secuencia); FCS= frecuencia del cultivo de soja; FCT= frecuencia del cultivo de trigo; FCC= frecuencia de cultivos cereales; FCP= frecuencia de pasturas. Los índices fueron calculados utilizando la fracción de tiempo anual con cobertura vegetal viva en un periodo de 6 años previos al periodo del muestreo de suelos (2002-2008).

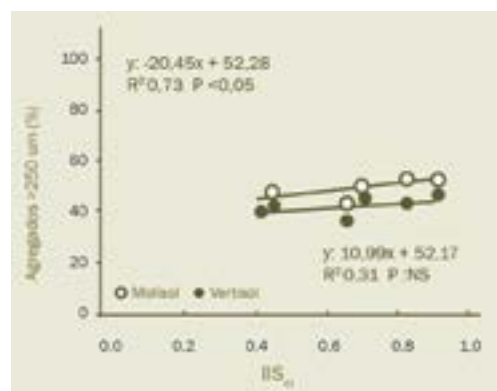
Los índices de uso de la tierra basados en el periodo de tiempo con cobertura vegetal viva (i.e. IISm) y la frecuencia del cultivo de soja (FCS) y pasturas (FCP) fueron los más sensibles para predecir el cambio en la estabilidad de agregados en el Molisol, principalmente a 0-5 cm de profundidad (Tabla 1). En el Vertisol, los cambios en la estabilidad de los agregados fueron menos evidentes que en el Molisol (Tabla 1), detectándose diferencias sólo entre las situaciones inalteradas o en rotación con pasturas frente a las agrícolas.

Al igual que para el caso de la estabilidad de los agregados, el índice que contempló la frecuencia del cultivo de soja (FCS) fue sensible para detectar en lotes de producción, cambios en el carbono orgánico del suelo almacenado en agregados >2000 µm en un Molisol y un Vertisol de Entre Ríos (Figura 1) (Novelli et al., 2011).

**Figura 1.** Almacenaje de COS en grandes macroagregados afectados por la frecuencia del cultivo de soja (FCS) en 0-5 cm de profundidad. Círculos vacíos representan el suelo Molisol. Círculos llenos representan el suelo Vertisol. Las barras verticales representan el desvío estándar de cada media. FCS indica el número de meses ocupados con cultivo de soja en relación con el número de meses ocupados con cultivos en un periodo de 6 años previo al periodo de muestreo de suelos (2002-2008).

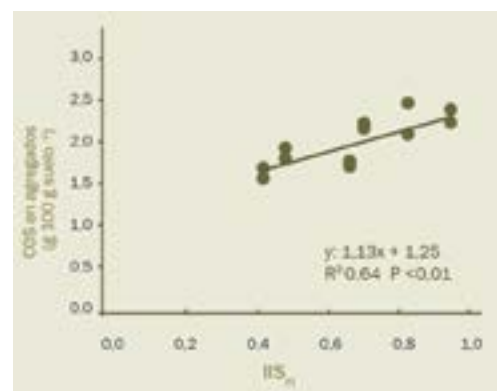


Por otra parte, en un ensayo de campo llevado a cabo sobre un Molisol y un Vertisol de Entre Ríos, la utilización del índice de intensificación de las secuencias (IISm), calculado como el número de meses con cultivos en un período de 2 años, permitió detectar una asociación positiva entre el tiempo de ocupación con cobertura vegetal viva y la cantidad de macroagregados, aunque fue más dependiente del tipo de suelo (Figura 2).



**Figura 2.** Relación entre el índice de intensificación de las secuencias (IISm) y el porcentaje de macroagregados de 0-5 cm de profundidad luego de dos años de un experimento de secuencias de cultivos (2008-2010). Círculos vacíos indican suelo Molisol. Círculos llenos indican suelo Vertisol. IISm indica el número de meses con cultivos en un período de 2 años (2008-2010).

Además, la utilización del índice IISm en el ensayo de campo comentado anteriormente fue útil para demostrar una asociación entre el tiempo de ocupación con cobertura vegetal viva y el COS almacenado en macroagregados de un Molisol y un Vertisol (Novelli et al., 2017) (Figura 3).



**Figura 3.** Relación entre el índice de intensificación de las secuencias (IISm) y el stock de carbono orgánico del suelo asociado a macroagregados de 0-5 cm de profundidad ( $Mg^{ha^{-1}}$ ) luego de dos años de un experimento de secuencias de cultivos (2008-2010). El conjunto de los datos incluyen un suelo Molisol y un Vertisol de Entre Ríos. IISm indica el número de meses con cultivos en un período de 2 años (2008-2010).

### Consideraciones Finales

La selección de índices simples e intuitivos como el IISm, FCP o FCS fueron útiles para detectar el impacto del uso de la tierra sobre la agregación y el COS almacenado en los macroagregados, permitiendo evaluar las tendencias de los cambios en el uso de la tierra. Sin embargo, los índices mostraron diferente sensibilidad para predecir cambios en las propiedades evaluadas entre suelos. En efecto, los cambios en las propiedades del suelo afectados por el tiempo de ocupación con cultivos o la frecuencia de soja fueron más notorios en el Molisol en comparación con el Vertisol. Los índices que tuvieron en cuenta la frecuencia de trigo o cereales (incluidos trigo, maíz y sorgo) no fueron sensibles para detectar los cambios en las propiedades del suelo por el uso de la tierra.

### Bibliografía

- Baldi, G., Paruelo, J.M. 2008. Land-use and land cover dynamics in South American temperate grassland. *Ecol. Soc.* 13(2):6.
- Cambardella, C.A., Elliot, E.T. 1993. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:1071-1076.
- Caviglia, O.P., Andrade, F.H. 2010. Sustainable intensification of agriculture in the argentinean pampas: capture and use efficiency of environmental resources. *Americas J. Plant Sci. Biotech.* 3:1-8.
- Chenu, C., Le Bissonnais, Y., Arrouays, D. 2000. Organic matter influence on clay wettability
- FAOSTAT. 2011. FAOSTAT Agriculture Data. FAO, Rome, Italy. Available at <http://faostat.fao.org> (accessed August 23, 2011).
- Farahani, H.J., Peterson G.A. Westfall D.G. 1998. Dryland cropping intensification: a fundamental solution to efficient use of precipitation. *Adv. Agron.* 64:197-223.

Franzluebbers, A.J., Hons, F.M., Zuberer, D.A. 1994. Long-term changes in soil carbon and nitrogen pools in wheat management systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:1639-1645.

Le Bissonnais, Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodability. I. Theory and methodology. *Eur. J. Soil Sci.* 47:425-437.

Novelli, L.E., Caviglia, O.P., Melchiori, R.J.M. 2011. Impact of soybean cropping frequency on soil carbon storage in Mollisols and Vertisols. *Geoderma* 167-168:254-260.

Novelli, L.E., Caviglia, O.P., Wilson, M.G., Sasal, M.C. 2013. Land use intensity and cropping sequence effects on aggregate stability and C storage in a Vertisol and a Mollisol. *Geoderma* 195-196:260-267.

Novelli, L.E., Caviglia, O.P., Piñeiro, G. 2017. Increased cropping intensity improves crop residue inputs to the soil and aggregate-associated soil organic carbon stocks. *Soil Till. Res.* 165:128-136.

Sasal, M.C., Castiglioni, M.G., Wilson, M.G. 2010. Effect of crop sequences on soil properties and runoff on natural-rainfall erosion plots under no tillage. *Soil Till. Res.* 108:24-29.

Studdert, G.A., Echeverría, H.E., Casanovas, E.M. 1997. Crop-pasture rotation for sustaining the quality and productivity of a Typic argiudoll. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:1466-1472.

Viglizzo, E.F., Franck, F.C., Carreño, L.V., Jobbágy, E.G., Pereyra, H., Clatt, J., Pincén, D., Ricard, M.F. 2011. Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Glob. Change Biol.* 17:959-973.

Viglizzo, E.F., Paruelo, J.M., Litter, P., Jobbágy, E.G. 2012. Ecosystems service evaluation to support land-use policy. *Agr. Ecosyst. Environ.* 154:78-84.

Wilson, M.G. 2008. Uso de la Tierra en el área de bosques nativos de Entre Ríos, Argentina. Tesis Doctoral. Instituto Universitario de Geología. Universidad de La Coruña, España. 277 p.

## Protocolos de Monitoreo de la Calidad del Suelo

Natalia Mórtola<sup>1</sup>, Romina Romaniuk<sup>1</sup> y Marcelo G. Wilson<sup>2</sup>

Un protocolo puede definirse como una serie de pasos y normas que debemos ejecutar para un determinado fin. Este concepto también se aplica al protocolo de calidad de suelos. En muchos casos y temas diversos, existe mucha y variada información, que debido a las diferentes formas de presentarla o analizarla, dificulta su comparación. El beneficio de los protocolos es que nos ordenan y nos organizan, de manera que cualquiera que siga las pautas del protocolo, puede arribar a datos comparables. Es una manera de asegurarnos que todos procedemos de la misma forma, de manera tal que los resultados obtenidos son también comparables.

En tal sentido, surge la necesidad de protocolizar el monitoreo de la calidad del suelo para poder ser aplicados en diferentes sistemas productivos, como una herramienta que permita generar alertas tempranas de procesos de degradación y planificar los sistemas productivos. La información sobre indicadores de calidad de suelo contenida en este Manual requiere ser ordenada, editada y publicada, para poder ser transferida al sector productivo, con el fin de que sea útil para la evaluación de la calidad del suelo y el seguimiento de lotes en producción, la planificación del uso de la tierra y la evaluación de prácticas conservacionistas implementadas por técnicos asesores

<sup>1</sup>-Instituto de Suelos INTA Castelar, 1686, Hurlingham, Buenos Aires, Argentina.

<sup>2</sup>-INTA, Estación Experimental Paraná. Oro Verde 3101, Entre Ríos, Argentina.

y asociaciones de productores. Si esta información puede ser presentada en forma organizada y resumida, entonces las autoridades de aplicación de leyes conservacionistas en las diferentes ecorregiones del país, contarán con una herramienta de vital utilidad para la toma de decisiones.

Actualmente se están elaborando protocolos para los diferentes binomios (suelo: sistema productivo) representativos de las distintas ecorregiones de nuestro país con la información sobre conjuntos mínimos de indicadores (CMI) y sus correspondientes valores referenciales. Dicha información es obtenida en ensayos experimentales y bases de datos locales sistematizadas y homogeneizadas con que cuenta el INTA.

Los protocolos presentan un mismo formato y se pretende que sean sencillos y de fácil lectura y comprensión. Estas guías cuentan con una introducción donde se describen brevemente conceptos básicos sobre calidad de suelos y se explica cuál es la problemática del suelo y del sistema productivo en cuestión. En la segunda parte de esta guía se describe la metodología de evaluación de la calidad del suelo propiamente dicha. En los primeros puntos se detalla cómo seleccionar la zona homogénea de muestreo y cuándo debe realizarse la evaluación. Seguidamente, se presenta el CMI seleccionado para el binomio (suelo-sistema productivo) a evaluar, indicando metodologías de muestreo y de cuantificación a campo y/o laboratorio, frecuencia de medición y valores referenciales (umbrales, de referencia y de situación inalterada).

Posteriormente, debido a que los indicadores se expresan en diferentes unidades de acuerdo a la variable que cuantifican, es necesario unificarlos transformando sus valores a una misma unidad de medida (estandarización). Para su estandarización se construyen escalas que son independien-

tes de las unidades originales de cada indicador y permiten superar este inconveniente. En la Figura 1 se presentan ejemplos de tablas para la estandarización del carbono orgánico total (COT) y de la densidad aparente (Dap). De esta manera, todos los indicadores serán directos: a mayor valor estandarizado, mejor calidad del suelo.

**Figura 1.** Tablas para la estandarización del carbono orgánico total (COT) y de la densidad aparente (Dap) para la evaluación de la calidad de suelos de textura fina bajo agricultura en siembra directa en Chaco Subhúmedo.

COT(g.Kg <sup>-1</sup> )	Escala	Dap (g cm <sup>-3</sup> )	Escala
0-2.5	0	>1.80	0
2.6-5.2	1	1.71-1.80	1
5.3-8	2	1.61-1.70	2
8.1-12.6	3	1.47-1.60	3
12.7-17.1	4	1.34-1.46	4
17.2-21.7	5	1.21-1.33	5
21.8-26.2	6	1.19-1.20	6
26.3-30.8	7	1.17-1.18	7
>30.8	8	<1.17	8

Los colores de la escala tipo semáforo permiten inferir la condición que cada indicador le imprime al suelo. El color rojo representa un suelo en proceso de degradación que tiene comprometida su capacidad de recuperación. El color amarillo significa que con estos valores de los indicadores no puede garantizarse la sustentabilidad. El color verde representa un estado óptimo de los indicadores y por ende, de la calidad del suelo.

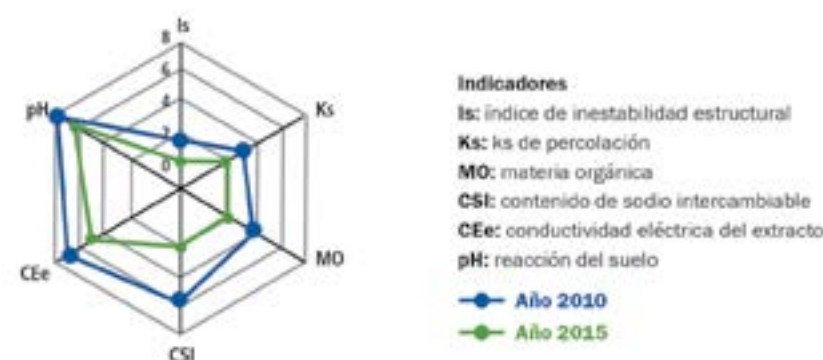
Luego, se presenta el análisis y la interpretación de los valores de los indicadores a través de gráficos de tipo estrella mostrando ejemplos de aplicación. Cada radio de la estrella representa a un indicador, de tal manera que se puede conocer el comportamiento individual de cada uno de ellos.

Con la utilización de los gráficos estrella se pueden hacer distintos tipos de evaluaciones a través de la realización de distintos tipos de comparaciones:

- a) con una escala construida con los valores referenciales y a través de gráficos de tipo estrella-semáforo (Figura 2);
- b) a través del tiempo para un mismo uso (Figura 3);
- c) entre distintos usos o manejos (Figura 4).



**Figura 2.** Evaluación de estado del suelo bajo un determinado manejo. Ej: Representación en un gráfico tipo estrella-semáforo del estado de los indicadores en un sistema con una participación de 80% de arroz en la rotación.



**Figura 3.** Comparación de un mismo manejo en el tiempo. Ej: Representación del estado de los indicadores en un sistema con participación del 40% de arroz en la rotación en el año 2010 y 2015.



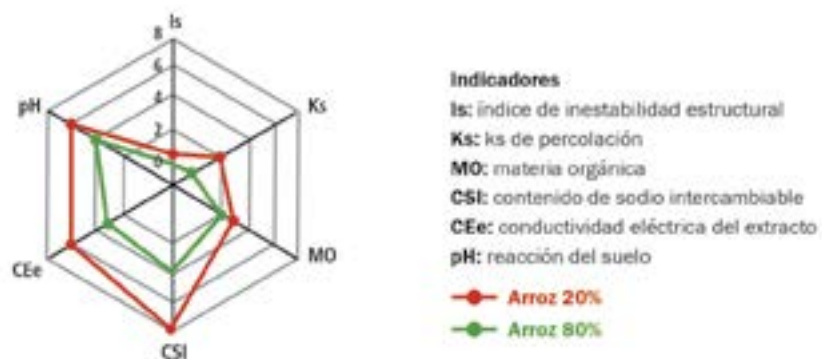


Figura 4. Comparación entre diferentes usos o manejos. Ej: Representación del estado de los indicadores con dos manejos distintos, 20 y 80% de participación del arroz en la rotación.

Con el objetivo de obtener un solo valor numérico que represente la calidad o estado actual del suelo, se calcula el índice de calidad de suelo (InCS) considerando todos los indicadores juntos. Debido a que no todos los indicadores poseen el mismo valor o peso para la sustentabilidad (algunos seguramente serán más importantes que otros) se procede a multiplicar el valor del indicador por un coeficiente (ponderación).

Para la interpretación del InCS se compara el valor obtenido con una escala tipo semáforo (Figura 5). En el caso de querer evaluar dos o más usos o manejos, se comparan los InCS obtenidos en cada uno de ellos. También puede calcularse el InCS en un mismo sitio en momentos distintos para evaluar la variación de la calidad del suelo a través del tiempo.

A manera de ejemplo a continuación se presenta el cálculo del InCS para la evaluación de la calidad de suelos de textura fina bajo agricultura en siembra directa en Chaco Subhúmedo:

$$InCS = (COT \times 0.21) + (COP \times 0.20) + (Nt \times 0.18) + (pH \times 0.15) + (Dap \times 0.15) + (FE \times 0.13)$$

Valor índice Calidad del Suelo (InCS)	Calidad del Suelo
0 - 2.04	Muy mala calidad de suelos
2.05 - 3.06	Baja calidad de suelos
3.07 - 5.10	Modesta calidad de suelos
5.11 - 6.12	Buena calidad de suelos
6.13 - 8.16	Muy alta calidad de suelos

Figura 5. Tabla para evaluación de la calidad del suelo según los valores de índice de calidad de suelos obtenidos.

Indicadores: COT: carbono orgánico total; COP: carbono orgánico particulado; Nt: nitrógeno total; pH: reacción del suelo; Dap: densidad aparente; FE: fracción erosionable.

Este análisis de los indicadores y del índice permitirá detectar aquellos puntos críticos del manejo del sistema que atentan o comprometen la sustentabilidad, constituyendo el diagnóstico y el alerta de procesos de degradación. En un punto final se indican las prácticas de ma-

nejo propuestas para detener dichos procesos de degradación con el fin de recuperar el sistema. En la figura 6 se presentan las secciones del Protocolo y los pasos a seguir para la evaluación de la calidad del suelo.



Figura 6. Secciones del Protocolo de Monitoreo de la Calidad del Suelo y pasos a seguir para su evaluación.

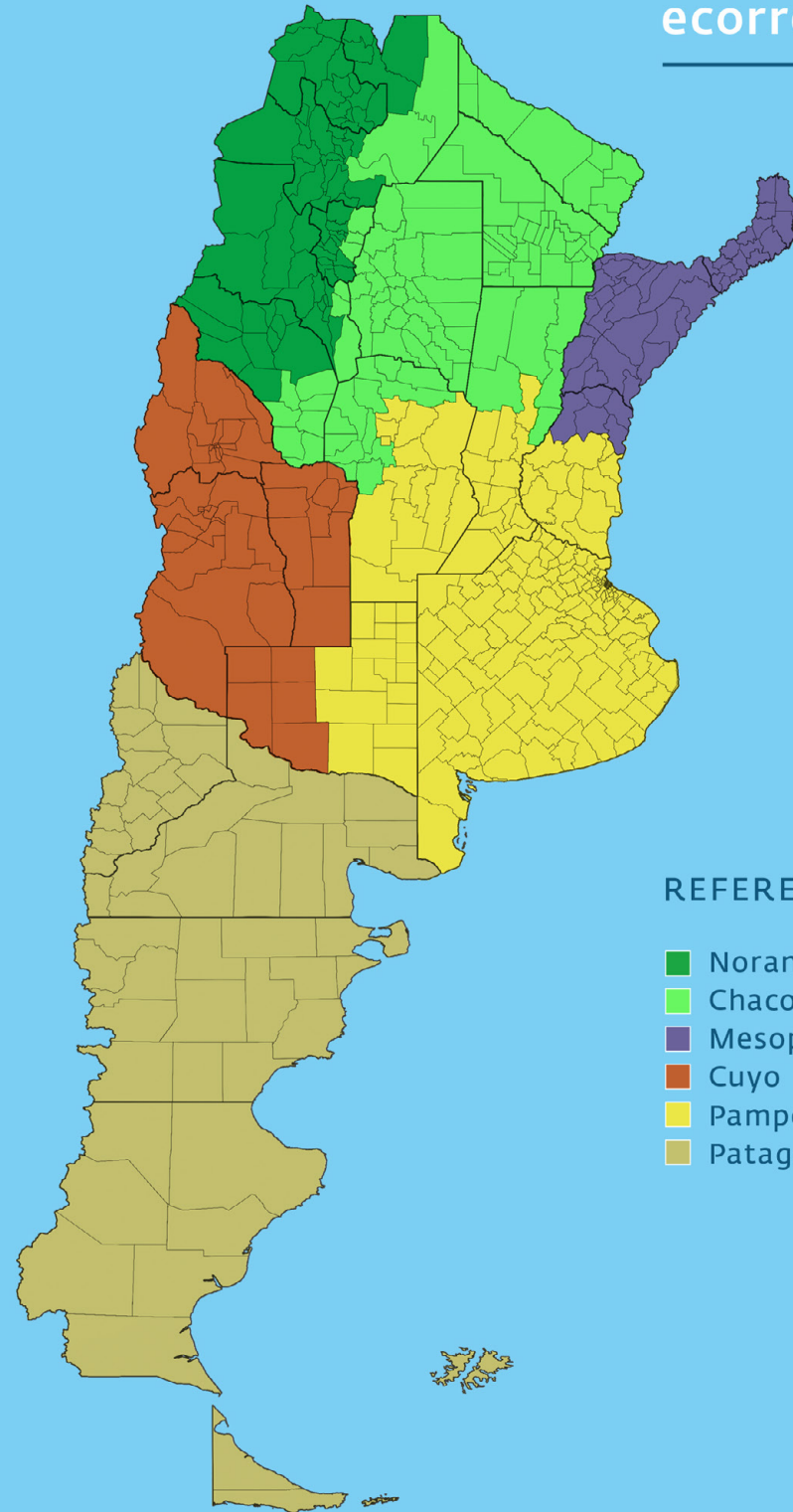
Otro producto que se espera obtener es un software simple y amigable que permita ingresar los valores de los indicadores medidos en los sistemas productivos a evaluar y que arroje como resultado los gráficos tipo estrella, el índice de calidad de suelo (InCS), el diagnóstico y las medidas correctivas a aplicar.

# Capítulo 2

---

INDICADORES DE CALIDAD  
DE SUELO PARA LOS SISTEMAS  
PRODUCTIVOS RELEVANTES  
POR ECORREGIÓN

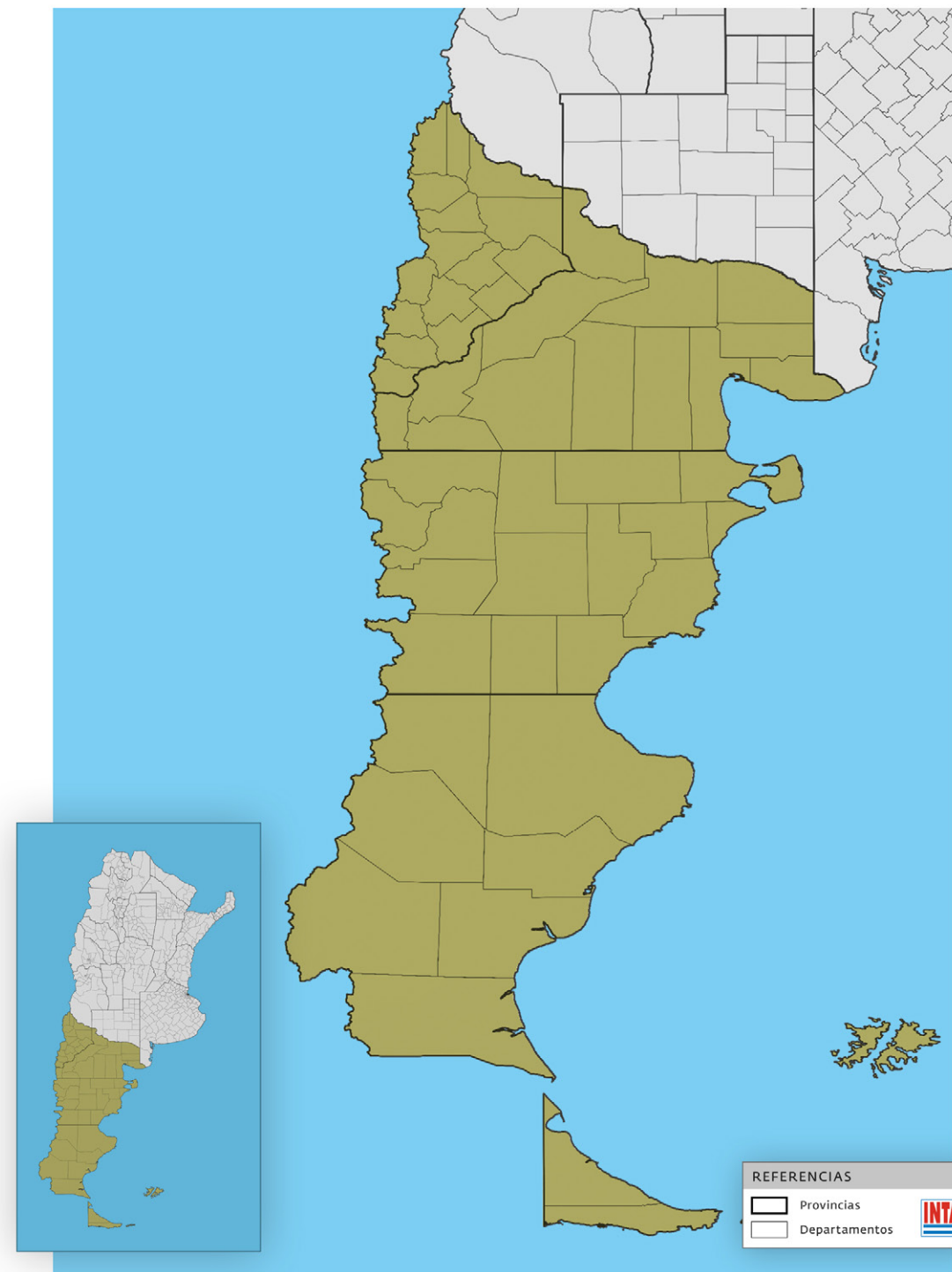
# ecorregiones



## REFERENCIAS

- Norandina
- Chaco
- Mesopotamia
- Cuyo
- Pampeana
- Patagonia

# Ecorregión Patagónica



## Ecorregión Patagónica Patagonia extrandina

**SISTEMA PRODUCTIVO:** Ganadería extensiva sobre pastizales naturales

Juan J. Gaitán<sup>1</sup>, Gabriel E. Oliva<sup>3</sup>, Donaldo E. Bran<sup>2</sup>, Gustavo G. Buono<sup>4</sup>, Daniela Ferrante<sup>3</sup>, Guillermo García-Martínez<sup>5</sup>, Virginia Massara<sup>4</sup>, Georgina Ciari<sup>5</sup>, Jorge M. Salomone<sup>4</sup>

### Caracterización de los sistemas productivos

La principal actividad agropecuaria en la región patagónica extrandina es el uso ganadero extensivo, donde los pastizales naturales son utilizados como fuente de forraje para el ganado doméstico. La actividad ganadera en esta región comenzó a fines del siglo XIX, luego de las campañas militares que sometieron a los pueblos originarios. Las tierras fueron redistribuidas a través de diferentes leyes y procedimientos, y finalmente ocupadas por distintos actores sociales, que incluyeron desde pobladores originarios relocalizados hasta grandes empresas latifundistas. Esta distribución original generó una estructura fundiaria que en gran parte permanece en

la actualidad, más heterogénea en el Norte de la Patagonia, que en el Sur. A pocos años de iniciada la actividad el stock de ganado ovino en la Patagonia alcanzó los 20 millones de cabezas (1912) y se mantuvo por encima de las 15 millones de cabezas hasta fines de los años 50 del siglo pasado. A partir de ese momento, el impacto de la desertificación en la región comenzó a expresarse en la disminución del número de cabezas. Además, a nivel internacional se redujo el precio de la lana y aumentó el precio de los insumos del sector, lo que provocó una fuerte disminución en la rentabilidad de los establecimientos ganaderos.

- 
1. INTA, Instituto de Suelos. Hurlingham 1686, Buenos Aires, Argentina.
  2. INTA, Estación Experimental Bariloche. Bariloche 8400, Río Negro, Argentina.
  3. INTA, Estación Experimental Santa Cruz. Río Gallegos 9400, Santa Cruz, Argentina.
  4. INTA, Estación Experimental Chubut. Trelew 9100, Chubut, Argentina.
  5. INTA, Estación Experimental Esquel. Esquel 9200, Chubut, Argentina.

A principios del siglo XX, la ganadería era la principal actividad económica de la región, pero en la actualidad representa poco más del 5% del PIB. Actualmente la región está escasamente poblada, con unos 2 millones de habitantes concentrados en las ciudades, y apenas 200.000 pobladores en áreas rurales. La tierra está dividida en unos 12.500 establecimientos rurales, existiendo una gran variación en el tamaño de los mismos, Teniendo en cuenta que la rentabilidad depende en gran medida del tamaño de las majadas, se considera que por debajo de 1000 ovinos, los establecimientos no son empresariales y corresponden a sistemas de economía familiar y de subsistencia.

Este tipo de establecimientos representa el 66% del total y están ubicados principalmente en Patagonia Norte. Los establecimientos de mayor tamaño (estancias) son importantes porque administran una gran parte de la tierra y de la hacienda; unos 600 establecimientos con más de 6000 animales manejan un 38% de las existencias totales. Actualmente las existencias ganaderas en la región son de aproximadamente unos 9 millones de ovinos, 0,8 millones de cabezas de bovinos, 0,8 millones de caprinos y 0,16 millones de equinos. A esto se debe sumar 1,5 millones de guanacos (un camélido silvestre, típico de la región).

El ganado bovino se concentra principalmente en el NE de Patagonia y en los valles cordilleranos y el caprino en el norte de la región. Las mayores densidades de herbívoros se dan en los extremos N (Neuquén) y S (Tierra del Fuego), con una carga animal equivalente a 0,6 y 0,8 ovinos por hectárea, respectivamente. La carga animal total es mínima (menos de 0,2 ovinos por hectárea) en la provincia de Santa Cruz, pero influye en este valor una gran extensión de campos abandonados.

### El problema de la desertificación

El avance de la desertificación es uno de los mayores problemas ambientales que afectan a la Patagonia extrandina (del Valle et al., 1998) con fuertes consecuencias económicas y sociales (Andrade, 2012). La excesiva presión de pastoreo es una de las principales causas de la desertificación de estas tierras (León y Aguiar, 1985). Los primeros colonos realizaron un manejo de los pastizales naturales basado en experiencias que carecían de una base científica y que habían sido generadas en ecosistemas muy diferentes a los cuales pretendieron aplicarse (Paruelo, 1993). Este manejo produjo profundos cambios en la cobertura, proporción de grupos funcionales y composición florística de la vegetación (ej. León y Aguiar, 1985; Soriano, 1988; Perelman et al., 1997; Bisigato y Bertiller, 1997; Bisigato et al., 2005; Gaitán et al., 2009). Estos cambios en la vegetación han acelerado los procesos de erosión hídrica y eólica (Rostagno, 1989; Parizek et al., 2002; Chartier et al., 2011) produciendo cambios en las propiedades edáficas (Rostagno y Degorgue, 2011) que pueden limitar o impedir la recuperación de la vegetación (Bertiller, 1996).

La degradación de los pastizales naturales ha afectado la producción en la Patagonia, al declinar la receptividad de los campos, especialmente en la Meseta Central Santacruceña, donde se ha llegado a abandonar la actividad en grandes áreas. Esta caída ha sido enmascarada por la variabilidad anual de la producción característica de los sistemas semiáridos. Cuando los pastizales naturales pierden la capacidad de transformar lluvia en forraje, el efecto es percibido por los productores a través de un descenso en los índices de producción animal y, muchas veces, ha sido atribuido a cambios en el clima. El desafío es controlar esta degradación a largo plazo antes de que se refleje en la producción animal, porque los procesos de degradación en su mayor parte son irreversibles.

### Monitoreo a largo plazo: el proyecto MARAS

La evaluación y ajuste de las prácticas de manejo en zonas áridas y semiáridas bajo uso pastoril, como los pastizales de la Patagonia, requiere de sistemas de monitoreo de la condición o funcionalidad de los ecosistemas (Pyke et al., 2002). La medición directa de la funcionalidad de los ecosistemas, por ejemplo mediante la cuantificación de la retención de agua y nutrientes dentro del paisaje es muy costosa en términos de tiempo y dinero (Valentin et al., 1999). Por lo tanto, en los últimos años se han desarrollado metodologías para el monitoreo de este tipo de ecosistemas basadas en la evaluación de indicadores de fácil y rápida valoración, tales como atributos de la vegetación y características físicas y biológicas de la superficie del suelo relacionados con procesos del ecosistema (Herrick et al., 2005; Tongway and Hindley, 2004).

En los primeros años de la década de 2000, un grupo de investigadores de distintas Estaciones

Experimentales del INTA en la Patagonia comenzaron a desarrollar el sistema MARAS (acrónimo de "Monitoreo Ambiental para Regiones Áridas y Semiáridas") con la finalidad de contar con un sistema regional de monitoreo a largo plazo que permita detectar la tendencia del proceso de desertificación y proporcione alertas tempranas que ayuden a tomar decisiones de manejo para frenar y revertir el problema. El sistema está basado en la metodología australiana LFA (Landscape Function Analysis, Tongway y Hindley, 2004). Hasta el presente se llevan instalados 311 monitores en toda la región, desde Neuquén hasta Tierra del Fuego, abarcando un amplio rango de condiciones climáticas (temperatura media anual entre 5 y 16°C, precipitación media anual entre 150 y 800 mm) y de tipos de ecosistemas (incluyendo semidesiertos y estepas gramíneas, arbustivas y arbustivo-gramíneas pertenecientes a dos provincias fitogeográficas: Patagonia y Monte) (Figura 1).

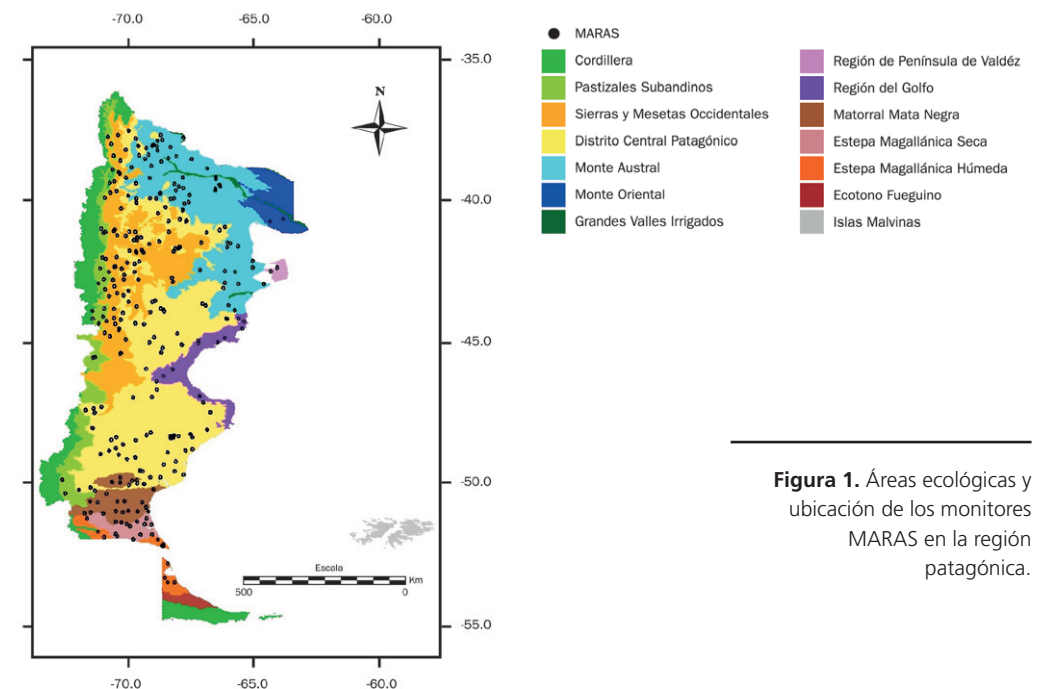


Figura 1. Áreas ecológicas y ubicación de los monitores MARAS en la región patagónica.

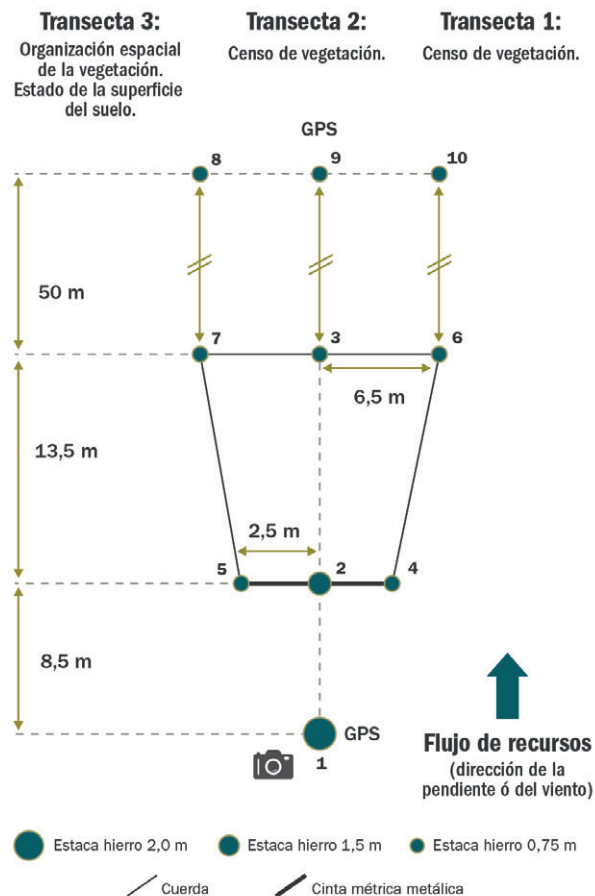
Valores de los principales indicadores e índices por Área Ecológica (promedio + desvío estándar)

ÁREA ECOLÓGICA	Número de Maras	Cobertura basal (%)	Largo parches (cm)	Ancho parches (cm)	Altura parches (cm)	Largo interparches (cm)
Cordillera	0	-	-	-	-	-
Pastizales Subandinos	24	40,5 ± 13,5	66,2 ± 35,7	108,2 ± 55,6	22,1 ± 10,9	105,3 ± 63,4
Sierras y Mesetas Occidentales	59	28,7 ± 12,8	57,7 ± 29,1	89,5 ± 41,6	27,5 ± 13,4	152,4 ± 77,3
Distrito Central Patagónico	111	28,5 ± 14,3	48,0 ± 26,1	65,0 ± 46,0	22,9 ± 18,9	149,2 ± 127,8
Monte Austral	56	17,1 ± 9,0	69,7 ± 37,9	99,5 ± 58,5	57,8 ± 26,1	351,6 ± 130,6
Monte Oriental	2	40,6	74,1	130,7	60,5	102,2
Grandes Valles Irrigados	0	-	-	-	-	-
Región Península Valdés	2	29,6	86,2	150,4	52,5	177,6
Región del Golfo	11	33,8 ± 10,8	67,0 ± 33,0	94,3 ± 57,4	31,1 ± 19,8	131,0 ± 54,9
Matorral Mata Negra	22	63,2 ± 11,4	77,6 ± 38,1	51,5 ± 19,1	15,5 ± 11,2	41,7 ± 13,0
Estepa Magallánica Húmeda	13	76,0 ± 17,8	153,7 ± 137,0	67,4 ± 35,3	8,8 ± 6,5	29,9 ± 11,7
Estepa Magallánica Seca	11	90,7 ± 20,5	-	83,1 ± 28,0	18,0 ± 11,8	22,9 ± 17,6
Ecotono Fueguino	0	-	-	-	-	-

Índice Estabilidad	Índice Infiltración	Índice reciclaje nutrientes	Riqueza (Nº especies perennes)	Cobertura Arbustos (%)	Cobertura pastos (%)	Cobertura hierbas (%)
-	-	-	-	-	-	-
48,7 ± 10,3	51,0 ± 6,8	38,9 ± 7,7	13,8 ± 5,6	14,5 ± 12,0	25,8 ± 15,4	4,8 ± 5,2
43,2 ± 9,1	45,8 ± 6,5	28,6 ± 7,8	11,9 ± 4,1	17,0 ± 8,0	15,6 ± 10,9	0,7 ± 1,1
43,4 ± 9,1	42,2 ± 5,9	27,2 ± 5,7	12,9 ± 4,3	20,7 ± 9,6	14,3 ± 10,3	1,6 ± 2,7
43,7 ± 12,1	40,8 ± 6,4	25,2 ± 6,0	11,5 ± 3,7	26,4 ± 8,7	4,5 ± 5,5	0,7 ± 1,4
57,2	46,4	36,3	16,5	27,3	33,9	1,1
-	-	-	-	-	-	-
52,5	43,4	32,8	16,0	41,9	17,9	2,1
43,9 ± 6,8	46,4 ± 5,7	32,1 ± 4,6	16,0 ± 4,62	31,9 ± 11,5	12,2 ± 10,9	0,9 ± 0,7
47,1 ± 7,3	47,6 ± 4,4	36,2 ± 2,3	19,0 ± 6,1	28,9 ± 14,3	30,6 ± 10,9	9,1 ± 10,3
55,7 ± 10,4	53,5 ± 5,2	40,4 ± 4,4	27,0 ± 4,8	12,7 ± 5,2	47,6 ± 12,6	11,6 ± 4,1
57,4 ± 22,3	65,5 ± 10,0	54,4 ± 14,6	34,2 ± 6,1	32,8 ± 26,8	61,2 ± 19,1	19,9 ± 9,0
-	-	-	-	-	-	-

El diseño del monitor MARAS consiste de un poste inicial, un trapecio de 5 x 13,5 x 13 metros de lado y tres transectas paralelas (distanciadas a 6,5 metros entre sí) de 50 metros de largo (Figura 2). Desde el poste inicial se toma una fotografía al trapecio, estas fotografías se usan para monitorear en forma cualitativa los cambios de la vegetación. Al estar tomadas desde puntos fijos y utilizando ópticas similares son útiles para ver cambios fisonómicos y complementan los indicadores de cambio de los métodos cuantitativos. Sobre dos de las transectas se realizan censos de vegetación de acuerdo al método de intercepción de puntos (Mueller-Dombois y

**Figura 2.** Diseño básico del monitor MARAS (Oliva et al. 2011).



Ellenberg 1974). En cada transecta se baja una aguja cada 20 cm y se registra el tipo de cobertura interceptada (especie vegetal, suelo desnudo u hojarasca). En la transecta restante se registra la longitud de los interparches (zonas abiertas sin vegetación vascular) y la longitud, ancho y altura de los parches vegetados. También sobre esta transecta se realizan evaluaciones de 11 indicadores del estado de la superficie del suelo, en los primeros 10 interparches de la transecta. Los 11 indicadores que definen el estado del suelo, se combinan entonces en tres índices de funcionamiento del suelo: (1) estabilidad o resistencia a la erosión, (2) infiltración o capacidad para almacenar agua y (3) reciclaje de nutrientes. Complementariamente se toman dos muestras compuestas de suelo (0-10 cm de profundidad) de dos micrositios: centro de parches vegetados y centro de interparches. En laboratorio se determina el contenido de carbono orgánico, nitrógeno total, pH, conductividad eléctrica y textura. Para más detalles sobre la metodología ver el "Manual para la instalación y lectura de monitores MARAS" (Oliva et al., 2011).

**Propuestas de manejo y monitoreo de procesos de degradación a nivel predial**

En la década del '90 el INTA comenzó a desarrollar una metodología aplicable a los establecimientos ganaderos de la Patagonia que permita optimizar la producción sin comprometer los recursos naturales a largo plazo. Esta metodología consiste básicamente en identificar los diferentes tipos de ambientes presentes en un establecimiento, para ello se realiza la interpretación y análisis de imágenes satelitales. Luego, se realiza el trabajo de campo que consiste en caracterizar estos ambientes en cuanto a su geomorfología, suelos, composición de la vegetación, estado de degradación y se estima la productividad forrajera del pastizal en base a la cobertura de especies

palatables y su estado. Con esta información se ajusta la carga animal de acuerdo al cálculo de la disponibilidad de forraje del campo (Borrelli, 2001, Elissalde et al. 2002, Siffredi et al. 2013).

Cuando se ajusta la carga animal a la oferta de forraje los animales consumen aproximadamente un 30% de la biomasa forrajera total, y no más del 50% de la biomasa de las especies más palatables para el ganado ovino. Este nivel residual es considerado necesario para la regeneración de acuerdo a una conocida regla práctica en el manejo de pastizales (Stoddart y Smith 1955). Algunas evidencias (Oliva et al. 1998) sugieren que la aplicación de la metodología de ajuste de carga permitiría detener la degradación de pastizales debido al sobrepastoreo. Sin embargo, las técnicas de evaluación de la disponibilidad forrajera no se emplean en toda la región en una base anual, y en el caso de aquellos establecimientos que la realizan, los datos que se obtienen son de biomasa forrajera consumible, una variable considerada "rápida" (sensu Reynolds et al. 2007) y que refleja la variabilidad anual de las precipitaciones más que los procesos de degradación o recuperación del ecosistema largo plazo. Estos procesos están más asociados a variables consideradas "lentas", tales como la estabilidad de la superficie del suelo y su contenido en materia orgánica. El empleo de la metodología MARAS a escala predial permitiría monitorear a largo plazo si los esfuerzos de manejo sustentable son efectivos, lo cual sería de gran utilidad para los productores que intentan valorizar sus productos a través de certificados de calidad o sustentabilidad ambiental.



## Bibliografía

ANDRADE, L. 2012. Producción y ambiente en la meseta central de Santa Cruz, Patagonia austral en Argentina: desencadenantes e impacto de la desertificación. *Ambiente y Desarrollo* 16: 73-92.

BERTILLER, M.B. 1996. Grazing effects on sustainable semiarid rangelands in Patagonia. The state and dynamics of the soil seed bank. *Environmental Management* 20: 123-132.

BISIGATO, A. J.; BERTILLER, M.B. 1997. Grazing effects on patchy dryland vegetation in northern Patagonia. *Journal of Arid Environments* 36: 639-653.

BISIGATO, A. J., BERTILLER, M.B., ARES, J.O. PAZOS, G.O. 2005. Effect of grazing on plant patterns in arid ecosystems of Patagonian Monte. *Ecography* 28: 561-572.

Borrelli, P. 2001. La Tecnología de Manejo Extensivo. pp. 9-16. En: *Ganadería Sustentable en la Patagonia Austral*. (Eds P. Borrelli and G. Oliva.). INTA. Regional Patagonia Sur. 269 p.

CHARTIER, M.P., ROSTAGNO, C.M., PAZOS, G.E., 2011. Effects of soil degradation on infiltration rates in grazed semiarid rangelands of northeastern Patagonia, Argentina. *Journal of Arid Environments* 75: 656-661.

DEL VALLE, H. F., ELISSALDE, N. O., GAGLIARDINI, D.A., MILOVICH, J., 1998. Status of desertification in the Patagonian region: Assessment and mapping from satellite imagery. *Arid Soil Res. Rehabil.* 12: 95-121.

ELISSALDE, N., ESCOBAR J.M., NAKAMATSU V. 2002. Inventario y evaluación de pastizales naturales de la zona árida y semiárida de la Patagonia. PAN - Programa de Acción Nacional de Lucha contra la Desertificación - Cooperación Técnica Argentino Alemana Convenio SAyDS - INTA - GTZ.

GAITÁN J., LÓPEZ, C., Bran, D.,. 2009. Efectos del pastoreo sobre el suelo y la vegetación en la estepa patagónica. *Ciencia del Suelo* 27: 261-270.

HERRICK, J.E., VAN ZEE, J.W., HAVSTAD, K.M.,

WHITFORD, W.G., 2005. Monitoring Manual for Grassland, Shrubland, and Savanna Ecosystems. Volume II: Design Supplementary Methods and Interpretation. USDA-ARS, Las Cruces.

LEON, R.J.C., AGUIAR, M.R., 1985. El deterioro por uso pasturil en estepas herbáceas patagónicas. *Phytocoen.* 13: 181-196.

OLIVA, G., GAITÁN, J., BRAN, D., NAKAMATSU, V., SALOMONE, J., BUONO, G., ESCOBAR, J., FRANK, F., FERRANTE, D., HUMANO, G., CIARI, G., SUAREZ, D., OPAZO, W., 2011. Manual para la Instalación y Lectura de Monitores MARAS. INTA, Santa Cruz.

OLIVA, G., CIBILS, A., BORRELLI, P., HUMANO, G. 1998. Stable states in relation to grazing in Patagonia: a 10-year experimental trial. *Journal of Arid Environments*, 40: 113-131.

PARIZEK, B.; ROSTAGNO C.; SOTTINI R. 2002. Soil erosion as affected by shrub encroachment in north eastern Patagonia. *J. Range. Manage.* 55: 43-48.

PARUELO, J.M., BERTILLER, M.B., SCHLICHTER, T.M., CORONATO, F.R., 1993. Secuencias de deterioro en distintos ambientes patagónicos. Su caracterización mediante el modelo de estados y transiciones. *Convenio Argentino Alemán. Cooperación Técnica INTA-GTZ.* 110 pp.

PERELMAN, S. B., LEÓN, R. J. C., BUSSACCA, J.P., 1997. Floristic changes related to grazing intensity in a Patagonian shrub steppe. *Ecography* 20: 400-406.

PYKE, D.A., HERRICK, J. E., SHAVER, P. L., PELLANT, M., 2002. Rangeland health attributes and indicators for qualitative assessment. *J. Range Manage.* 55: 584-597.

REYNOLDS, J.F., SMITH, D. M. S., LAMBIN, E. F., TURNER, B.L., et al. 2007. Global desertification: building a science for dryland development. *Science*, 316: 847-851.

ROSTAGNO, C. M., 1989. Infiltration and sediment production as affected by soil surface conditions in a shrubland of Patagonia, Argentina. *J. Range Manage.* 42: 382-385.

ROSTAGNO, C. M., DEGORGUE, G., 2011. Desert pavements as indicators of soil erosion on arid soils in north-east Patagonia (Argentina). *Geomorphology* 134: 224-231.

SIFFREDI, G., AYESA J. A., ALVAREZ J.M, GIORGETTI H., BOGGIO F. & KRÖPFL A. (2013). Guía para la evaluación de pastizales. Para las áreas ecológicas de Sierras y Mesetas Occidentales y de Monte de Patagonia Norte. INTA.

STODDART, L. A., & SMITH, A. D. 1955. Range management. *Range management*, (Ed. 2).

SORIANO, A., 1988. El pastoreo como disturbio: consecuencias estructurales y funcionales. *Ciencia e Investigación*, 42: 132-139.

TONGWAY, D.J., HINDLEY, N., 2004. *Landscape Function Analysis: Procedures for Monitoring and Assessing Landscapes with Special Reference to Minesites and Rangelands.* Sustainable Ecosystems, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Canberra, ACT, Australia.

VALENTIN, C., D'HERBES, J. M., POESEN, J., 1999. Soil and water components of banded vegetation patterns. *Catena* 37: 1-24.

## Ecorregión Patagónica Valles Irrigados Norpatagónicos

SISTEMA PRODUCTIVO: Frutícola

Rosa de Lima Holzmann<sup>1</sup>

SUELOS: Cambortides xerolicos y durixerolicos (Aridisoles)  
y Torrifluventes xericos (Entisoles)

### Caracterización del agroecosistema e identificación de sus puntos críticos.

El Alto Valle del Río Negro se encuentra inmerso en un ambiente caracterizado por muy bajas precipitaciones (media anual para la serie 1990-2004 de 243,7 mm) por lo que se genera un déficit hídrico que supera los 1.200 mm anuales con temperaturas extremas invernales de -10,2°C y estivales de 38,6°C, para la misma serie agrometeorológica. Gracias al riego a partir de aguas del río Neuquén, y a través de un gran sistema de canales y desagües que comprenden una superficie que ronda las 52.000 ha, es que se suple este déficit permitiendo el desarrollo de cultivos perennes, principalmente de pepita, peras y manzanas.

Los suelos son de origen reciente, producto de

la deposición de materiales glaciofluviales, por lo que muestran gran variabilidad espacial en la deposición de materiales de distintas granulometrías. A esta natural diversidad de perfiles resultantes se suman los movimientos de suelos requeridos para la nivelación.

La disposición del cultivo en filas paralelas con calles intermedias, genera un tránsito confinado para la realización de las tareas culturales. El cuidado en forma pasiva contra las heladas tardías durante la floración, ésto es, rastreado, compactación y riego que se da en la gran mayoría de los casos, produce la pérdida de materia orgánica, densificación subsuperficial y disminución de la infiltración, entre otras consecuencias (Figura 1). Además, durante el resto de la temporada, los riegos gravitacionales coinciden en el tiempo

1. INTA, Estación Experimental Alto Valle. Allen 8332, Río Negro, Argentina.

po con el tránsito asociado a las pulverizaciones sanitarias, desmalezado mecánico, aplicaciones foliares de raleadores o fertilizantes, y la cosecha. Por otro lado, se producen ascensos de la capa freática salina que en muchos casos llega a profundidades muy cercanas a la superficie.



**Figura 1:** Manejo convencional del suelo de un monte frutal.

Este conjunto de situaciones hacen prever que el recurso suelo probablemente recibe en la generalidad del valle, un manejo que no resulta ser sustentable. Se trabajó en un área de 47 km de largo por 6 km de ancho, en 11 pares de chacras,

cada uno conformado por una chacra con manejo orgánico del suelo (cobertura permanente y labranza vertical) y una convencional (movimientos superficiales del suelo) (Figura 2).

**Figura 2:** Situación geográfica del Alto Valle y detalle del área de trabajo, donde se indica la localización de los once pares de chacras.



Para tener control de las condiciones que hacen a la calidad del suelo y su modificación en el tiempo a través del manejo, se analizaron una serie de indicadores que, expuestos a la rigurosidad de varios criterios de selección, resultaron en un conjunto mínimo de ocho indicadores, cuatro físicos y cuatro químicos (Tabla 1). Tales criterios incluyen, para una primera selección, el criterio estadístico a través de componentes principales (CP), el agronómico y el de aquellas características de simplicidad, reproducibilidad, repetitividad, bajo costo y posibilidad de análisis en laboratorios disponibles en la zona. Los valores óptimos y limitantes se definieron en función de los requerimientos y tolerancias del cultivo, y máximos y mínimos encontrados (Tabla 2).

Los indicadores químicos surgirán de un muestreo de suelo en un sitio representativo del cuadro o chacra hasta los diez primeros centímetros (materia orgánica, pH, conductividad eléctrica y relación de adsorción de sodio), mientras que los físicos saldrán de determinaciones a campo de densidad aparente hasta los primeros 10 cm, infiltración, y penetromería fuera y sobre la huella hasta los 30 cm, tomando este último valor.

**Tabla 1:** Conjunto Mínimo de Indicadores (CMI) para suelos Aridisoles y Entisoles con sistema frutícola (frutales de pepita) de los Valles irrigados Norpatagónicos.

MO	Materia Orgánica
pH	Reacción del suelo
CE	Conductividad eléctrica
RAS	Relación de adsorción de sodio
Dap	Densidad aparente
Ib	Infiltración base
PFH	Penetrometría fuera de la huella

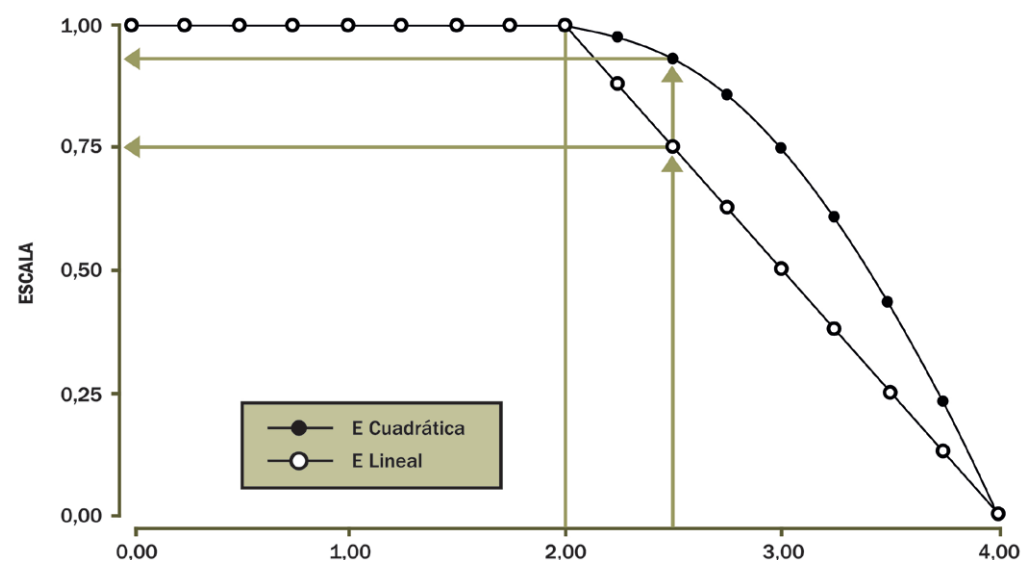
**Tabla 2:** Indicadores con sus valores óptimos, de transición y limitantes, y sus valores de indicador correspondiente bajo sistema frutícola (frutales de pepita). Valles irrigados Norpatagónicos.

Indicador	MO	pH	CE	RAS	Dap (texturas finas)	Dap (texturas gruesas)	Ib	PFH <sub>30</sub>	PSH <sub>30</sub>	
Valor	Valor Indicador	%	dS/m		g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	mm/h	Mpa	Mpa	
Óptimo	1	≥ 5	6 - 7,5	≤ 2	≤ 8	≤ 1,25	≤ 1,45	50 - 200	≤ 2	≤ 2
De transición	0 - 1	1 - 5	5 - 6 y 7,5 - 8,5	2 - 4	8 - 13	1,25 - 1,50	1,45 - 1,65	0 - 50 y 200 - 400	2 - 4	2 - 6
Limitante	0	≤ 1	6 - 7,5	≥ 4	≥ 3	≥ 1,50	≥ 1,65	≥ 50 y ≥ 200	≥ 4	≥ 6

Determinados los indicadores y sus valores umbrales, fueron transformados, a través de curvas, a unidades adimensionales con valores entre 0 y 1. Se ensayaron dos tipos de curvas,  $Y = a + bX$  e  $Y = aX^2 + bX + c$ , recta y cuadrática como indica

la Figura 3. Se optó (aquí se expresa otro criterio de selección) por la recta, dado que "castiga" situaciones cercanas a las límite más que la curva cuadrática, marcando con mayor magnitud estados próximos a los limitantes, alertando anticipa

damente así involuciones o deterioros en la calidad, y marcando a su vez una mayor diferencia entre la mejor y la peor condición o calidad.



**Figura 3:** Curvas utilizadas para la transformación a valor de indicador

En la Tabla 3 se exponen las ecuaciones resultantes para los distintos indicadores.

**Tabla 3:** Ecuaciones que transforman los valores de laboratorio y campo a valores de indicador que se encuentran entre 0 y 1, es decir, de transición.

Indicador	Ecuaciones para transformar valores de transición a la escala entre 0 y 1
MO	Valor indicador MO = $-0,25 + 0,25 * \% MO_{0-10}$
pH	Valor indicador pH = $-3,35 + 0,67 * pH_{0-10}$ y $pH = 6,03 - 0,67 * pH_{0-10}$
CE	Valor indicador CE = $2 - 0,5 * CE_{0-10}$
RAS	Valor indicador RAS = $2,6 - 0,2 * RAS_{0-10}$
Dap finas	Valor indicador Dap finas = $6 - 4 * Dap$
Dap gruesas	Valor indicador Dap gruesas = $8,25 - 5 * Dap$
Inf.bás.	Valor indicador Ib = $0,02 * Ib$ e $Ib = 2 - 0,005 * Ib$
PFH	Valor indicador PFH = $2 - 0,5 * PFH$
PSH	Valor indicador PSH = $1,5 - 0,28 * PSH$

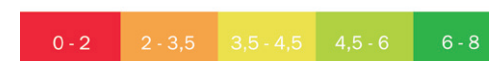
Los valores ya transformados a valores adimensionales, cuales quiera fueran sus rangos y unidades de expresión, pueden ser trabajados como si fueran equivalentes y, para este caso, sumados, generan un valor, el Índice de Calidad de Suelo (InCS), que representa al sitio.

$$InCS = (MO_{0-10} + pH_{0-10} + CE_{0-10} + RAS_{0-10} + Dap + Ib + PFH_{30} + PSH_{30})$$

$$InCS = 0 \rightarrow 8$$

Para categorizar la situación de una chacra, la escala resultante para el InCS que va de 0 a 8, se divide en cinco categorías o clases de calidad de suelos:

0 - 2	muy baja calidad de suelos
2 - 3,5	baja calidad de suelos
3,5 - 4,5	moderada calidad de suelos
4,5 - 6	alta calidad de suelos
6 - 8	muy alta calidad de suelos



### Alertas sobre procesos de degradación y propuestas de manejo

Se aconseja repetir cada 4 ó 5 años, las determinaciones correspondientes a cada indicador, para alertar sobre el impacto del manejo del sistema productivo sobre el suelo. Dada la experiencia que brinda este trabajo, se recomienda, de ser posible, mantener una cobertura permanente y realizar labranza vertical para romper capas compactadas subsuperficialmente. De esta manera se aumentará la cantidad de materia orgánica,

mejorando principalmente la infiltración, indicador de importancia vital para una zona bajo riego gravitacional. Se podrá también saber a través de estas mediciones en el tiempo, si se está produciendo un proceso de salinización, para lo cual se deberá replantear la práctica de riego, colocar freáticos que permitan conocer la "altura" de la napa y realizar enmienda, además del lavado de las sales.



Para transformar los valores de campo y laboratorio a valor indicador en forma más simple, el productor o técnico cuenta con tablas que surgen de las ecuaciones mencionadas anteriormente.

## Bibliografía

ANDREWS S. S., KARLEN D. L. and MITCHELL J. P. 2002. A comparison of soil quality indexing method for vegetable production systems in Northern California. Elsevier Science B. V.

ARSHAD, M. A. y. MARTIN, S. 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. Elsevier Science B.V.

ARUANI, M.C.; BEHMER, S. N.; SÁNCHEZ, E. E. y ALVAREZ, O. 2002. Coberturas verdes. Efecto sobre la compactación inducida por el tráfico agrícola. Congreso Argentino de Horticultura.

ARUANI, M. C.; SÁNCHEZ, E. E.; REEB, P. 2006. Cambios en las propiedades de un suelo franco bajo producción orgánica de manzano utilizando coberturas vegetales. *Ci. Suelo (Argentina)* 24 (2) 131-137

BOUMA, J. 2002. Land quality indicators of sustainable land management across scales. Elsevier Science B. V.

BURGER, J. A.; KELTING, D. L. 1999. Using soil quality indicators to assess forest stand management. *Forest Ecology and Management* 122, 155-166. Elsevier Science B. V.

CASAMIQUELA, C; NOLTING, J.; HORNE, F. REQUENA, A. 1984. Documento básico para el programa "Riego, salinidad, y drenaje". INTA Alto Valle.

CANTÚ, M. P.; BECKER, A.; BEDANO, J. C.; SCHIAVO, H. F. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ci. Suelo (Argentina)* 25(2): 173-178.

CARTER, M. R.; GREGORY, E. G.; ANDERSON, D. W.; DORAN, J. W.; JANSEN, H.H. and PIERCE, F. J. 1997. Concepts of soil quality and their significance. Elsevier Science B. V.

Censo Provincial de Agricultura bajo Riego. 2005. Río Negro, Argentina.

DI PRINZIO, A; JORAJURÍA, D.; BEHMER, B. AYALA, C. ARAGÓN, A. 1998. El tráfico en el monte frutal: el tapiz vegetal y la distribución de la compactación. *Agro-Ciencia* 14 (2): 283-288.

DORAN, J. W.; PARKIN T. 1994. Definign and assesing soil quality. Soil Science Society of America.

DORAN, J. W.; ZEISS, M. 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. Elsevier Science B. V.

DRAGHI, L; JORAJURÍA, D; CERRISOLA, C.; MÁRQUEZ DELGADO, L.; BOTTA, G. 2003. Reología del suelo de un monte frutal relacionada al manejo interfilas y a la intensidad de tráfico. VII Congreso Argentino de Ingeniería Rural. Balcarce. vol. 1 pág. 37.

DUMANSKI, J. 1997. Criteria and indicators for land quality and sustainable land management. *ITC Journal*. 3/4: 216-222.

GLOVER, J. D.; REGANOLD, J. P.; ANDREWS, P. 2000. Systematic method for rating soil quality of conventional, organic and integrated apple orchard in Washington State. Elsevier BV

GRANATSTEIN D., BEZDICEK D. F. 1992. The need for a soil quality index: local and regional perspectives. *American Journal of alternative Agriculture*.

INFOSTAT, 2009. Grupo InfoStat, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

LAL, R. 1994. Métodos y normas para evaluar el uso sostenible de los recursos suelo y agua en el trópico. (editor) CRC Press

MENDÍA, J. M.; IRISARRI, J. 1995. Las condiciones físicas del suelo asociadas al drenaje en el monte frutal. Curso internacional de suelo, Riego y Nutrición. Gral. Roca, RN, Argentina.

SOANE, B. D. 1990. The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. Elsevier Science Publishers B.V.

SOIL QUALITY INSTITUTE. 2001. Soil quality test kit guide. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service and Natural Resources Conservation Service.

RODRÍGUEZ A y MUÑOZ A. 2006. Síntesis Agrometeorológica para el período 1990-2004. EEA Alto Valle. Ed. INTA. Boletín Divulgación Técnica n° 53, 38 pp.

SÁNCHEZ, E. E. 1999. Nutrición mineral de fruta de pepita y carozo. INTA Alto Valle. RN. Argentina.

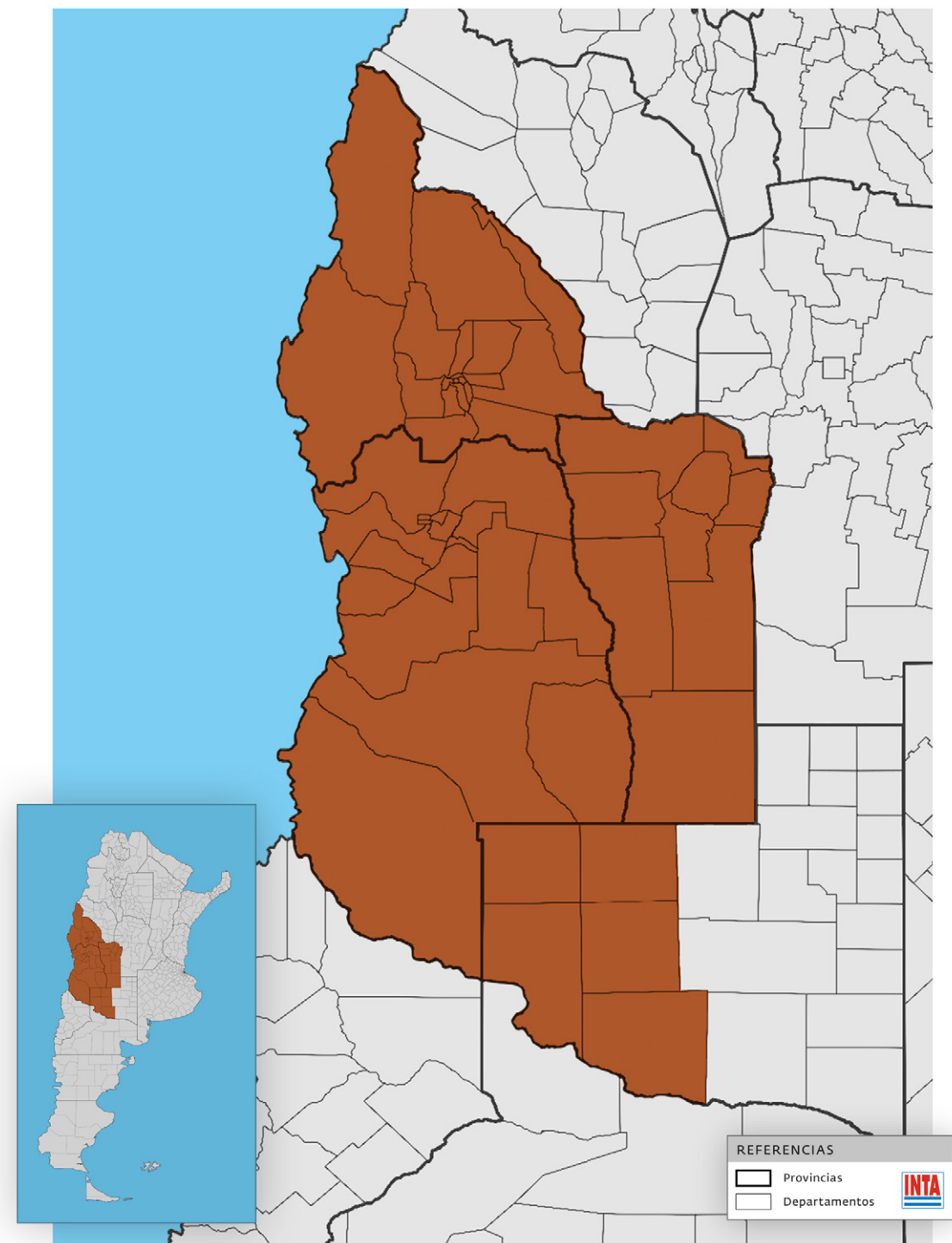
SÁNCHEZ, E. E. 2001. Manejo del suelo y la nutrición mineral en la producción orgánica. II Curso Internacional de Pera. General Roca, RN, Argentina.

TASSARA, M. 2007. Las heladas primaverales. Protección en frutales de clima templado-frío. INTA. EEA Alto Valle. Centro Regional Patagonia Norte.

VOGELER, I; CICHOTA, R.; SIVAKUMARAN, A.; DEURER, A. and MCIVOR, I. 2006. Soil assessment of apple orchard under conventional and organic management. *Australian Journal of soil Reserch* 44 (8) 745-752.

WOLKOWSKI, R.P. 1990. Relationship between wheel-traffic-induced soil compaction, nutrient availability, and crop growth: a review. *Journal of production agriculture*. Volume 3, nmo. 4, october-december 1990.

# Ecorregión Cuyo



## Ecorregión Cuyo Sureste de San Luis

SISTEMA PRODUCTIVO: Mixto (Agrícola - Ganadero) del SE de San Luis

Juan de Dios Herrero<sup>1</sup>, Juan Cruz Colazo<sup>1</sup> y Daniel Buschiazzo<sup>2</sup>

SUELOS: Haplustoles (Molisoles), Ustipsammentes y Torripsammentes (Entisoles)

### Caracterización del agroecosistema e identificación de sus puntos críticos.

La provincia de San Luis posee condiciones ambientales áridas y semiáridas, con suelos particularmente sensibles de sufrir procesos degradativos. El sur de la región está caracterizado por una planicie medanosa dominada por suelos del orden Entisol y por una planicie semiárida en la que se encuentran Entisoles y Molisoles. La vegetación natural está compuesta en el área medanosa por pastizales e isletas de chañar y por bosques de caldén (*Prosopis caldenia*). La región presenta una temperatura media anual de 16 °C y precipitaciones medias anuales entre 400 y 500 mm. Tradicionalmente los sistemas de producción han sido mixtos (ganadero-agrícola), y los cultivos de verano más comunes son

maíz (*Zea mays L.*) y soja (*Glycine max L.*).

Los suelos de estos ambientes son susceptibles de ser degradados por procesos tales como la erosión eólica, la hídrica y la compactación. El creciente aumento de la agricultura provoca la disminución de nutrientes y la oxidación de la materia orgánica, incrementando la susceptibilidad de los suelos a estos procesos y causando en algunos casos deterioro irreversible (Buschiazzo, 2006; Quiroga et al., 1998).

Los indicadores (Tabla 1) fueron seleccionados en función de su relación con los procesos y funciones de suelo predominantes, la posibilidad de

1. INTA, Estación Experimental San Luis. Villa Mercedes, 5730, San Luis, Argentina.

2. INTA, Estación Experimental Anguil. Anguil, 6326, La Pampa, Argentina.

emplear valores críticos y la sensibilidad al manejo. Para ello, por triplicado, se muestreó en 4 pares de suelos, un suelo agrícola y adyacente, un suelo sin cultivar; los sitios presentaron suelos con texturas correspondientes a arenoso franco y franco arenoso.

Los valores umbrales (Tabla 2) fueron identificados en función de la bibliografía y usando relaciones de estos parámetros con funciones de suelo. COT: Valores críticos en relaciones no li-

neales con FE y EES (Colazo & Buschiazzo, 2010). CR: Rango correspondiente a un volumen de macroporos necesarios para mantener una aireación adecuada (Carter, 1990). FE: Valores necesarios para mantener la erosión eólica por debajo de niveles tolerables (Leys et al. 1996), EES: Valor empírico (Colazo & Buschiazzo, 2010) y EEH: valor empírico (Buschiazzo & Aimar, 1993).

COT	Carbono orgánico total
CR	Compactación relativa
FE	Fracción erosionable por el viento
EES	Estabilidad estructural en seco
EEH	Estabilidad estructural en húmedo

**Tabla 1:** Conjunto Mínimo de Indicadores (CMI) para suelos Molisoles y Entisoles con sistema mixto (Agrícola – Ganadero). SE de San Luis.

**Tabla 2:** Valores umbrales (VU), de referencia (VR) y valores correspondientes a la situación inalterada (In), para el CMI de Molisoles y Entisoles con sistema mixto (Agrícola – Ganadero). SE de San Luis

Indicador	Unidad de medida	Método de determinación	In	VR	VU
COT	%	Walkley y Black	0,79	0,63	1,0 (min)
CR	-	Cilindro y Test de Proctor	0,88 (0,78 - 0,94)	0,93 (0,85 - 0,98)	0,84 - 0,89 (min - max)
FE	%	Tamiz rotativo	57 (38,2 - 78,6)	69 (47,3 - 83,2)	40 (max)
EES	%	Tamiz rotativo	52 (19,2 - 73,3)	40 (23,8 - 60,3)	85 (min)
EEH	mm	De Boodt & de Leehneer	0,4 (0,14 - 0,60)	0,56 (0,32 - 1,21)	1,0 (max)

Donde **min** y **max**, indican valores mínimos y máximos requeridos, respectivamente. Entre paréntesis valores mínimos y máximos promedio de cada sitio (n=3).

### Alertas de procesos de degradación y propuestas de manejo

Si se considera al contenido de COT del suelo sin cultivar como valor de referencia máximo, la disminución por efecto del manejo agrícola fue de 20,2%. Sin embargo, tanto la situación inalterada como el valor de referencia no alcanzaron al mínimo establecido para que se obtenga un máximo de estabilidad estructural en seco (Colazo & Buschiazzo, 2010).

La estabilidad estructural en seco es el indicador más apropiado para cuantificar la resistencia de los agregados a la abrasión producida por efecto del viento (Chepil & Woodruff, 1963). En estos suelos arenosos con un bajo contenido de COT, incluso en la situación inalterada, no se forman agregados estables. Asimismo, la fracción erosionable superó el umbral establecido en la bibliografía (FE = 40%), con lo cual también tienen una alta susceptibilidad de ser erosionados por el viento.

Se encontraron diferencias de compactación relativa entre manejos, en el suelo cultivado se superó el límite establecido de 89%, la disminución en la cantidad de macroporos por efecto de la compactación puede afectar el desarrollo de los cultivos a causa del impedimento que encuentran las raíces para explorar el suelo, y la disminución en la conductividad de aire y agua a través de los poros.

La estabilidad en húmedo se mantuvo por debajo del límite establecido, de todos modos se observó un aumento en el cambio del diámetro medio de agregados en el suelo cultivado frente a la situación inalterada.

En suelos arenosos, la falta de cementantes orgánicos e inorgánicos no favorece la formación

de agregados estables al efecto del viento. El acumulamiento de COT en suelos sin cultivar no es suficiente para formar agregados no erosionables. Frente a esto, en los sistemas agrícolas, el manejo de la cobertura es fundamental para impedir estos procesos degradativos irreversibles.



A) Suelo Cultivado



B) Suelo sin cultivar



## Ecorregión Norandina

### Bibliografía

BUSCHIAZZO, D.E. 2006. Management Systems in Southern South America. Pp. 395-425. In: Peterson, G.A., P.W. Unger & W.A. Payne (Eds.). Dryland Agriculture. 2nd Edition. Agron. Monogr. 23. ASA, CSSA & SSSA, Madison, USA. 1026 pp.

BUSCHIAZZO, D.E. & S.B. AIMAR. 1993. Procesos de degradación en Haplustoles y Ustipsammentes de la Región Semiárida Pampeana Central. XIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mendoza.

CARTER, M.R. 1990. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sand loams. Can. J. Soil Sci. 70: 425-433.

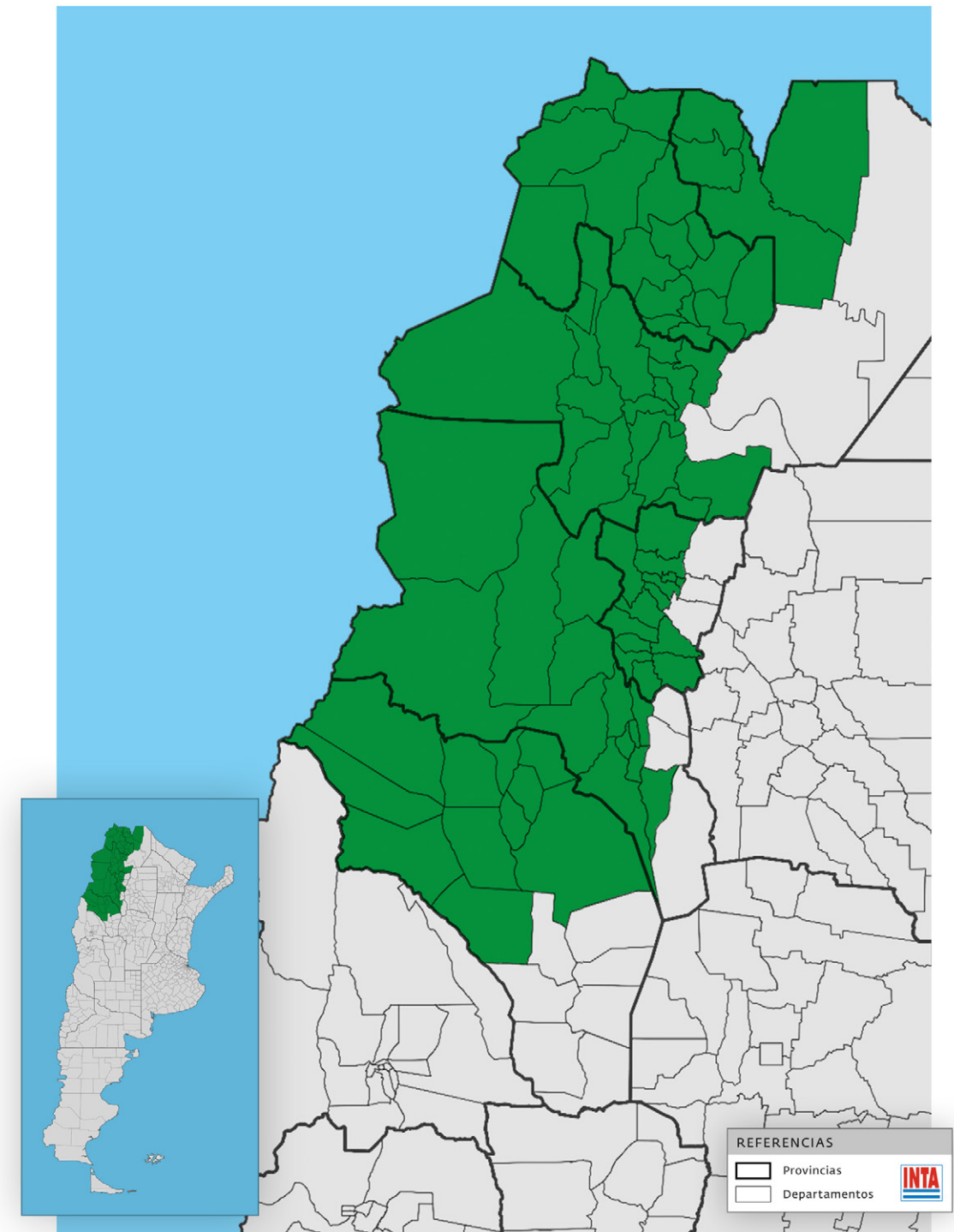
CHEPIL, W.S. & N.P. WOODRUFF. 1963. The Physics of wind erosion and its control. In Adv. in Agronomy 15:211-302.

COLAZO, J.C. & D.E. BUSCHIAZZO. 2010. Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of Argentina. Geoderma 159: 228-236.

DE BOODT, M. & M. DE LEENHEER. 1967. *West European methods for soil structure determination*. The State Faculty of Agric. Sci. Ghent. 7:60-62.

LEYS, J., T. KOEN T. G. McTAINSH, G., 1996. The effect of dry aggregation and percentage of clay on sediment flux and measured by a portable field wind tunnel. Aust. J. Soil Res. 34,849-861.

QUIROGA, A.R., D.E. BUSCHIAZZO & N. PEINEMANN. 1998. Management Discriminant properties in Semiarid Soils. Soil Sci. 163: 591-597.

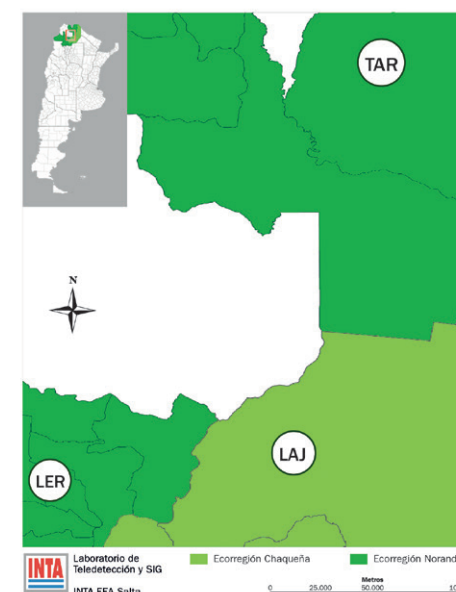


## Ecorregión Norandina Valles Templados de Salta y Jujuy

SISTEMA PRODUCTIVO: Intensivo Tabacalero, bajo riego

José Luis Arzeno<sup>1</sup>, Eduardo Corvalán<sup>1</sup>, Dina Jorgelina Huidobro<sup>1</sup>  
y T. Rodríguez<sup>1</sup>

SUELOS: Ustifluventes y Ustortentes (Entisoles), Ustocreptes (Inceptisoles)  
y Argiustoles (Molisoles)



### Ubicación geográfica zonas de estudio.

Ecorregión Chaqueña: Tartagal (TAR) y Las Lajitas (LAJ)  
Ecorregión Norandina: Valle de Lerma (LER)

#### Ecorregión Chaqueña:

Umbral al Chaco, Norte TAR 63° 31' 49.422" W  
22° 38' 34.931" S

#### Ecorregión Chaqueña:

Umbral al Chaco, Este LAJ 64° 14' 3.796" W  
24° 50' 46.085" S

#### Ecorregión Norandina:

Valles Templados, Centro LER 65° 30' 31.809" W  
24° 56' 31.348" S

1. INTA, Estación Experimental Salta. Cerrillos 4403, Salta, Argentina.

### Caracterización del agroecosistema e identificación de sus puntos críticos.

La Ecorregión Norandina incluye gran parte de las provincias de Jujuy, Salta, Catamarca, Tucumán y La Rioja. Su principal característica ambiental es la alta variabilidad de sus parámetros climáticos, que es una consecuencia del fuerte componente orográfico regional. En cuanto a los suelos, su origen fisiográfico y geomorfológico común en la región andina, le confiere identidad distintiva a toda la Ecorregión Norandina. Dentro de ella se pueden determinar 3 subregiones bien diferenciadas, especialmente por sus características de relieve, clima y biomas asociados: Valles y Bolsones Áridos, Puna, Yungas (Bianchi y Bravo, 2008). A su vez las Yungas se pueden dividir en 4 Agroecosistemas, siendo uno de ellos los Valles Templados.

En los valles de Lerma y Siancas (Salta) y en el valle de los Pericos (Jujuy), con clima templado por la altura y precipitaciones entre 500 y 1000 mm anuales, el cultivo de tabaco constituye la principal actividad productiva, realizándose bajo riego. Los suelos dominantes son Ustifluventes típicos, Ustocreptes údicos, Ustortentes típicos y Argiustoles údicos (Vargas Gil, 1999).

La degradación física, química y biológica de los suelos obedece a las particularidades de los

sistemas tabacaleros actuales, caracterizados por un exceso de labranzas, falta de rotaciones, aplicación de riego en lotes con pendientes altas y falta de sistematización, entre otras. Esto desencadena importantes procesos de degradación de los suelos, siendo los más frecuentes la erosión hídrica, por acción de las lluvias y el riego sobre suelos descubiertos, y la mineralización acelerada de la materia orgánica (MO). Según evaluaciones locales anteriores, la degradación es importante (Martínez Castillo et al, 2010 y Pérez et al, 2010).

Para la cuantificación de la degradación actual con indicadores de calidad de suelo (ICS), se aplicó la metodología de transectas de distancia variable en los departamentos de Rosario de Lerma, Cerrillos y General Güemes (Pcia. de Salta), seleccionando lotes donde se tomaron pares de muestras compuestas a una profundidad de 0-20 cm, una en lotes comerciales y otra en un área cercana sin disturbar o poco disturbada. Luego se calculó el porcentaje de caída de los valores de cada ICS entre el área sin disturbar y los lotes comerciales. El conjunto mínimo de indicadores quedó conformado por aquellos que demostraron mayor sensibilidad al uso (Tabla 1).

**Tabla 1.** Propuesta Conjunto Mínimo de Indicadores de Calidad de Suelo (CMI) para suelos bajo sistema de producción intensivo tabacalero. Valles Templados de Salta y Jujuy.

$\Delta$ EAS	% Variación Estabilidad Agregados 1-2 mm.
$\Delta$ MO	% Variación Materia Orgánica.
$\Delta$ N	% Variación Nitrógeno Orgánico.
P	Fósforo Extractable.

Indicador de calidad	Unidad de medida	Método de determinación	% de Caída en Lote (1)				
			Mínima	Ligera	Moderada	Alta	Muy alta
$\Delta$ EAS	%	Corvalán et al.2000	< 15	15-21	22-29	30-39	≥ 40
$\Delta$ MO	%	Walkley y Black	< 15	15-21	22-29	30-39	≥ 40
$\Delta$ N	%	Micro Kjeldhal	< 15	15-21	22-29	30-39	≥ 40

Donde  $\Delta$ : Variación; (1) Arzeno et al (2012).

Indicador de calidad	Unidad de medida	Método de determinación	Valores diagnóstico en los lotes (2)			
			Muy bueno	Bueno a regular	Regular a malo	Muy malo
P	ppm	Bruy-Kurtz Nº 1	> 20	20-12	11-8	< 8

Donde (2) Ortega y Corvalán 2010 "Diagnóstico de Suelos EEA Salta".

**Tabla 2.** Propuesta Valores umbrales del CMI. Suelos bajo sistema de producción intensivo tabacalero regado. Valles Templados de Salta y Jujuy.

En las áreas sin disturbar, la EAS arrojó valores 40% superiores respecto a los lotes comerciales, que presentaron valores muy bajos (10,4%), resultando una caída "muy alta", del orden del 74%, hecho que se explica especialmente por las excesivas labranzas que requiere el cultivo de tabaco (Tabla 2).

Ligado al punto anterior, en las áreas sin disturbar, los valores de MO resultaron más altos (2,52%) que en los lotes comerciales (1,55%), registrando una caída del 39 % (caída "alta"). Respecto al N, en áreas sin disturbar se registraron valores superiores (0,15%) que en los lotes (0,09%), presentando una caída "muy alta" (40%).

Se han observado resultados similares en estudios realizados en el observatorio ambiental de Perico (Jujuy) y en INTA EEA Salta (Martínez Castillo et al, 2010).

Los resultados presentados indican una importante degradación físico - química de los suelos tabacaleros.

Cabe destacar que, debido a la historia tabacalera de muchos años en los Valles Templados, resulta difícil encontrar lugares sin disturbar o poco disturbados para utilizar como situación de referencia, ocasionando una dificultad metodológica de importancia.

Los valores más altos de P se encontraron en los lotes comerciales (53 ppm), con un enriquecimiento del 59 %, debido a los constantes aportes de la fertilización de los cultivos de tabaco (Tabla 2).

### Alertas de procesos de degradación y propuestas de manejo

Los resultados expuestos evidencian una importante degradación físico-química de los suelos, asociada a las particularidades del cultivo de tabaco. Se requiere revertir estos procesos mediante la aplicación de un conjunto de Técnicas Conservacionistas interactuando.

Desde hace varios años, se viene trabajando en el ajuste del manejo conservacionista de suelos con tabaco, que incluye diversas técnicas conservacionistas tales como la disminución de labranzas y la aplicación de labranzas verticales, plantación sobre bordos con riego desde la parte superior y con cobertura vegetal, refuerzo de la fertilización nitrogenada, refuerzo de la sanidad, plantines más fuertes, ajuste del riego, etc. Este manejo conservacionista se encuentra en sus etapas iniciales de difusión local.

### Bibliografía

ARZENO J. L.; CORVALÁN E.; VIVAS F; HUIDOBRO D. J.; FERRARY LAGUZZI F. 2012. Indicadores de calidad de suelo en Fincas del Observatorio ambiental de Tartagal. En: XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata.

CORVALÁN, E. R.; A. FRANZONI; J. HUIDOBRO; J.L. ARZENO. 2000. Método de los microtamices para la determinación de la estabilidad de agregados de suelo de 1-2 mm. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. CD 4 pp.

BIANCHI A. R.; BRAVO G. C. 2008. Ecorregión Norandina. Descripción, subregiones, sistemas productivos y cartografía regional. INTA. Centro Regional Salta - Jujuy.

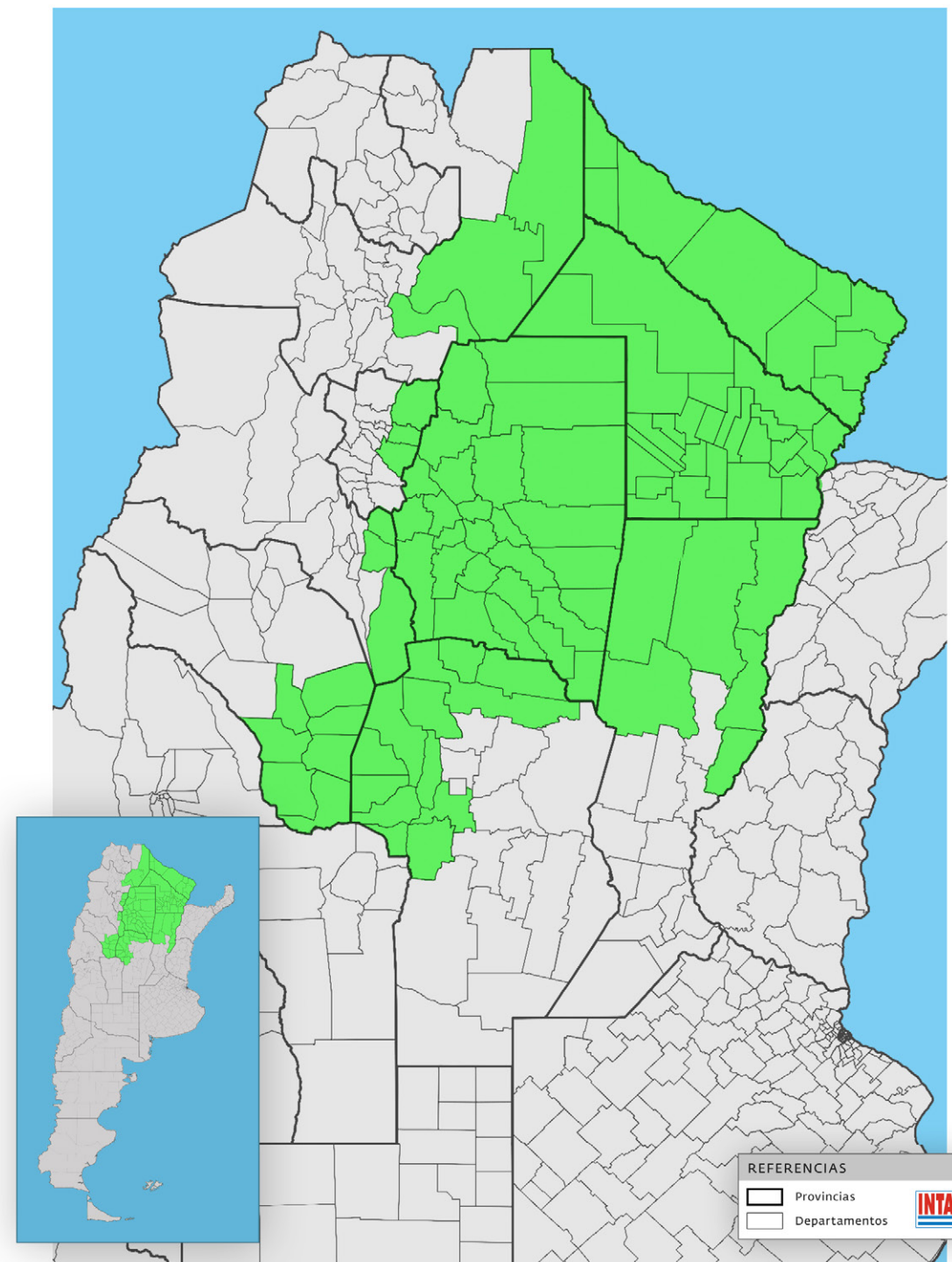
MARTÍNEZ CASTILLO M; R. OSINAGA y J. L. ARZENO 2010. Terrón Húmedo (TH5): como indicador de calidad de suelos. En: Resumen XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario. pág 212.

ORTEGA A.; CORVALÁN E. 2010. Diagnóstico de Suelos. EEA Salta INTA. 5 pag.

PÉREZ L; G. COLQUE; R. OSINAGA; E. CORVALÁN y J.L. ARZENO 2010. Características físico-químicas de los suelos del Valle de Lerma y su relación con el manejo. En: Resumen XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario. pág 226.

VARGAS GIL, R.1999. Carta de Suelos del Valle de Lerma. Pcia de Salta. EEA Salta INTA.

## Ecorregión Chaqueña



## Ecorregión Chaqueña Valle Central de Catamarca

SISTEMA PRODUCTIVO: Frutales intensivo bajo riego (OLIVÍCOLA)

María Eugenia de Bustos<sup>1</sup> y Rodrigo José Ahumada<sup>1</sup>

SUELO: Torrifluventes - Ustifluventes (Entisoles)

### Caracterización del agroecosistema e identificación de sus puntos críticos.

El Valle Central de Catamarca es una extensa depresión tectónica delimitada al oeste por la sierra de Ambato-Manchao y al este por la sierra El Alto-Ancasti, ubicado dentro de la región del Chaco árido (Cabrera, 1976; Morlans, 1995). La región presenta un clima seco y templado con precipitaciones que oscilan entre los 300 y 360 mm anuales, concentradas entre los meses de diciembre a febrero; la evapotranspiración es entre 1000 y 1200 mm anuales. La mayor probabilidad de ocurrencia de heladas coincide con la estación más seca del año y se presenta de mayo a septiembre (Karlin, 2013). La temperatura media anual máxima es 27,3°C y la mínima anual es 14,4°C, siendo enero el mes más cálido con promedios de temperaturas de 26°C, mientras que

el mes más frío, julio, presenta una media mensual de 10°C (Thorntwaite, 1948). Los vientos soplan del sector noroeste a una velocidad promedio anual de 12 km/h (Morlans, 1995).

La vegetación original corresponde a un bosque abierto dominado por especies de quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco*) y algarrobo (*Prosopis* spp), con un estrato arbustivo continuo y un estrato herbáceo compuesto por gramíneas perennes, anuales y por dicotiledóneas herbáceas (Morlans, 1995). Otra característica del bosque nativo del Chaco Árido del Valle Central de Catamarca es la evidencia de tala y pastoreo con diferentes grados de intensidad.

El sistema olivícola intensivo implantando sobre

1. INTA, Estación Experimental Catamarca. Sumalao 4705, Catamarca, Argentina.

un desmonte total, se caracteriza por ser un monte frutal univarietal, con marcos de plantación que varían entre 4 x 8 m y 4 x 7 m; generalmente con orientación este-oeste y con implantación de buffel grass (*Cenchrus ciliaris*) en el interfilar. En la línea de plantación se extiende una manguera de riego durante los primeros años de desarrollo, luego en años sucesivos se incorpora otra manguera, incrementando así el volumen de riego. La cantidad de agua suministrada al cultivo en pleno desarrollo es aproximadamente 900 mm/año/ha.

Los puntos críticos en el manejo del cultivo bajo riego por goteo, radican en que existen procesos de salinización y sodificación, específicamente en la periferia del bulbo húmedo asociados a la calidad del agua del riego (Alderetes Salas, 2011; Ahumada et al., 2014; de Bustos et al., 2014) compactación por el tránsito de maquinaria (de Bustos et al., 2014) y pérdida de materia orgánica en los primeros centímetros del suelo, específicamente durante los primeros años de implantación (Ahumada et al., 2014). Es importante destacar que en estos sistemas el aporte de agua con el tiempo genera un incremento de la materia orgánica y de algunos nutrientes (Alurralde et al., 2014; Ahumada et al., 2014; de Bustos et al., 2014). Por ello, se propuso determinar las variables que acusan cambios significativos en la calidad del suelo por el uso olivícola intensivo respecto al antecesor (bosque nativo).

Analizando olivares de diferentes edades de plantación y en diferentes posiciones dentro del cultivo, se obtuvo un conjunto mínimo de indicadores (Tabla 1) mediante un análisis de componentes principales, lo que se complementó con análisis de la varianza para detectar diferencias significativas de las variables en las diferentes situaciones. En la Tabla 2 se muestran los valores medios de las variables indicadoras para la situación inalterada, bosque nativo (In) y para el cultivo de olivo (Vc).

Profundidad 0-5 cm	
COT	Carbono orgánico total
COP	Carbono orgánico particulado
pH	Potencial hidrógeno
CE	Conductividad eléctrica
Profundidad 0-10 cm	
Ki <sup>+</sup>	Potasio intercambiable
Ks <sup>+</sup>	Potasio soluble
pH	Potencial hidrógeno
CE	Conductividad eléctrica
CO <sup>3-</sup>	Carbonato
RAS	Relación absorción sodio
IE	Índice de estructura
FE	Fracción erodible
Profundidad 10-30 cm	
COT	Carbono orgánico total
Ks <sup>+</sup>	Potasio soluble
CE	Conductividad eléctrica
CO <sup>3-</sup>	Carbonato
RAS	Relación absorción sodio
RM	Resistencia mecánica a la penetración

**Tabla 1:** Conjunto Mínimo de Indicadores (CMI) para suelos Entisoles con sistema olivícola intensivo bajo riego, a diferentes profundidades. Valle Central de Catamarca.

**Tabla 2 (página siguiente):** Valores correspondientes a la situación inalterada (In) y valores de referencia (Vc) para el CMI de suelos en olivicultura intensiva. Valle Central de Catamarca.

Indicador	Unidad de medida	Método de determinación	In	Vc <sup>1</sup> 5 años	Vc <sup>2</sup> 13 años
PROFUNDIDAD 0-5 CM					
COT	%	LECO	2,68	1,62	s/d
COP	%	LECO	1,40	0,36	s/d
COT	%	Walkley & Black	1,45	1,40	2,25
pH	adimensional	Potenciometría (1:2,5)	6,03	7,24	s/d
CE	dS/m	Conductimetría (extracto de pasta saturada)	1,02	3,64	s/d
PROFUNDIDAD 0-10 CM					
Ki <sup>+</sup>	meq/100 g suelo	Fotometría de llama (acetato de amonio)	0,14	s/d	1,22
Ks <sup>+</sup>	meq/l	Fotometría de llama (extracto de pasta saturada)	0,19	s/d	1,90
pH	adimensional	Potenciometría (1:2,5)	7,06	s/d	8,58
CE	dS/m	Conductimetría (extracto de pasta saturada)	0,60	s/d	1,38
CO <sup>3-</sup>	%	Gasometría (Collins)	0,34	s/d	0,68
RAS	adimensional	Allison et al (1973)	0,64	s/d	1,85
IE	adimensional	Ball et al. (2007) modificado	2,95	3,24	s/d
FE	%	Tamiz horizontal	65,35	58,69	s/d
PROFUNDIDAD 10-30 CM					
COT	%	Walkley & Black	0,26	s/d	0,80
Ks <sup>+</sup>	meq/l	Fotometría de llama (extracto de pasta saturada)	0,19	s/d	1,83
CE	dS/m	Conductimetría (extracto de pasta saturada)	0,58	s/d	1,70
CO <sup>3-</sup>	%	Gasometría (Collins)	0,36	s/d	0,90
RAS	adimensional	Allison et al (1973)	0,70	s/d	2,52
RM	MPa	Penetrómetro de impacto	4,00	s/d	9,35

<sup>1</sup> Valores medios tomados en la proyección media de la copa.

<sup>2</sup> Valores medios de diferentes posiciones en el cultivo. sid: valores no determinados

### Alertas de procesos de degradación y propuestas de manejo

Para lograr un manejo sustentable del sistema olivícola intensivo sería necesario definir valores umbrales de los indicadores de calidad de suelo, tomando como referencia a los valores de la situación inalterada (bosque nativo). Sin embargo, es posible sugerir criterios de manejo para disminuir el impacto del sistema olivícola intensivo, entre los que se mencionan:

- 1) Lavado de sales; estimando el volumen de agua necesaria para lixiviar las sales del suelo, con agua de buena calidad.
- 2) Enmiendas químicas; a través del agregado de sales solubles de calcio, ácidos y precursores de ácidos (ej.: yeso, ácido sulfúrico, azufre) para favorecer la sustitución del ión sodio del complejo de intercambio lo que ocasionará la reducción del pH del suelo y la RAS.
- 3) Enmiendas orgánicas; ésta práctica incrementará la materia orgánica del suelo aumentando el poder buffer del mismo. Por ejemplo, incorporando al suelo residuos de la industria aceitera del olivo (orujo, alperujo y alpechín), en estado crudo o compostado.
- 4) Mantenimiento de cubierta vegetal entre líneas del cultivo; está práctica favorecerá la agregación y estructuración del suelo, disminuyendo el efecto de compactación que se produce por el tránsito de maquinarias.
- 5) Labranza vertical profunda; mejorará las condiciones físicas de la trocha.



A) Monte natural



B) Cultivo de Olivo en el Valle Central de Catamarca

### Bibliografía

AHUMADA, R.J., CHOLAKY, C. y m, R. (2014) Uso de la tierra y calidad edáfica en el chaco árido catamarqueño, XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. II Reunión Nacional "Materia Orgánica y Sustancias Húmicas", 5 al 9 de Mayo.

ALDERETES SALAS, S. (2011) Producción de Olivos en el Valle Central de Catamarca, determinación y valoración económica sobre el recurso suelo, por efecto de las prácticas de producción, Tesis doctoral. Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Escuela para Graduados.

CABRERA, A.L. (1976) Regiones fitogeográficas argentinas, Enciclopedia argentina de agricultura y jardinería 2.

DE BUSTOS, M.E; ALLURRALDE, A; CURCHOD, C. 2014. Efecto del riego por goteo sobre las propiedades del suelo en olivo. *Biología en Agronomía* 4(2):68-76. ISSN1853-5216.

KARLIN, M.S. (2013) Clima, en KARLIN, M.S. (ed.) *El Chaco Árido*, Primera edición edition, Córdoba.

MORLANS, M.C. (1995) Regiones naturales de Catamarca: provincias geológicas y provincias fitogeográficas, *Revista Ciencia y Técnica UNCA.*, vol. 2.

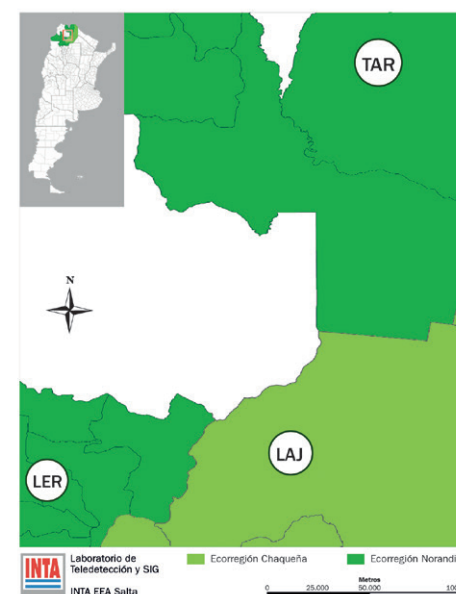
THORNTHWAITE, C.W. (1948) An approach toward a Rational Classification of Climate, *Geographical Review*, vol. 38, no. 1, pp. 55-94.

## Ecorregión Chaqueña Umbral al Chaco de Salta y Jujuy

SISTEMA PRODUCTIVO: Igrícola extensivo de granos a secano

José Luis Arzeno<sup>1</sup>, Eduardo Corvalán<sup>1</sup>, Dina Jorgelina Huidobro<sup>1</sup>  
y T. Rodríguez<sup>1</sup>

SUELOS: Argiustoles (Molisoles), Haplustalfes (Alfisoles) y Ustipsamentes (Entisoles)



### Ubicación geográfica zonas de estudio.

Ecorregión Chaqueña: Tartagal (TAR) y Las Lajitas (LAJ)  
Ecorregión Norandina: Valle de Lerma (LER)

#### Ecorregión Chaqueña:

Umbral al Chaco, Norte TAR 63° 31' 49.422" W  
22° 38' 34.931" S

#### Ecorregión Chaqueña:

Umbral al Chaco, Este LAJ 64° 14' 3.796" W  
24° 50' 46.085" S

#### Ecorregión Norandina:

Valles Templados, Centro LER 65° 30' 31.809" W  
24° 56' 31.348" S

1. INTA, Estación Experimental Salta. Cerrillos 4403, Salta, Argentina.



### Caracterización del agroecosistema e identificación de sus puntos críticos.

En la Ecorregión Chaqueña, en las provincias de Salta y Jujuy, se diferencian dos áreas: al oeste, el Umbral al Chaco, limitando con las estribaciones de las sierras subandinas de la Ecorregión Norandina, de clima subhúmedo y dedicado a la agricultura a secano; y al este, el Chaco Semiárido, de aptitud silvopastoril es una extensa llanura ubicada en el sector oriental de la provincia de Salta, cuyas actividades predominantes son la ganadería y la extracción forestal para postes, leña y carbón (Piccolo et al., 2008).

La franja del Umbral al Chaco continúa en expansión y en producción con sistemas extensivos de cultivos de grano a secano: soja, poroto, maíz, sorgo, trigo, cártamo. Aproximadamente un 95 % de la superficie destinada a la producción de granos, se encuentra bajo siembra directa (SD) desde hace 10 años, sin embargo, la rotación con maíz y/o sorgo es escasa. En las últimas campañas, según ProreNOA - INTA, ([www.inta.gov.ar/prorenea](http://www.inta.gov.ar/prorenea)), la rotación con sorgo y maíz en el NOA fue aproximadamente del 15 %. Es decir, conviven aspectos positivos y negativos de manejo.

La pérdida de materia orgánica (MO) en los sistemas productivos dominantes de la zona, constituye el principal proceso de degradación de los suelos. Ligado al aspecto anterior, se ha observado también merma en el contenido de nutrientes, especialmente N y P, condición que se agrava en los suelos de texturas gruesas, debido a su menor resiliencia intrínseca.

La elevación de las napas freáticas y la salinización, constituyen otros procesos de degradación de los suelos, habiéndose detectado estos en un área próxima a Anta.

Desde el punto de vista físico también se han evidenciado diversos estadios de degradación con planchado de la superficie, incremento de la densidad subsuperficial y pérdida de agua por escurrimiento superficial, esta última situación mediada particularmente por la longitud de la pendiente y la torrencialidad de las lluvias.

Para el monitoreo con Indicadores de Calidad de Suelos (ICS), se consideró la larga franja Norte - Sur, del Umbral al Chaco (Salta - Sgo del Estero), y se localizaron dos áreas de trabajo dentro de la Pcia de Salta: Norte Tartagal-Dpto. Gral. San Martín y Centro Lajitas-Dpto. Anta.

La metodología de muestreo de suelos consistió en extraer pares de muestras compuestas "Cortina-Lote"; cada muestra compuesta, conformada por 14 a 15 submuestras, de 0-20 cm de profundidad, a lo largo de transectas de 150-200 m. Así, una muestra compuesta es tomada en un sitio con agricultura (Lotes en producción) y la otra en un sitio natural cercano (Cortina de monte), para ser usada como valor de referencia (VR). Para algunos parámetros se calculó la variación porcentual dentro de los Pares de muestras: Cortina-Lote, considerando 100% al VR de la cortina.

### Norte Tartagal - Observatorio Ambiental (OA)

Se trabajó sobre lotes de seis fincas seleccionadas, cercanas a Tartagal (Dpto. San Martín). En el diseño de lotes a muestrear se consideraron tres variables: edad del desmonte, nivel de manejo y tres grupos de texturas, según el triángulo de FAO (fina, media y gruesa). De este modo, se extrajeron en total 36 muestras compuestas, de 0-20 cm de profundidad, en 13 cortinas y 23 lotes (Arzeno et al., 2012).

Particularmente en el Observatorio Ambiental (OA) Tartagal, se ha registrado una importante caída de MO, siendo del orden del 30,2 % (Arzeno et al, 2012) algo superior a la registrada en Anta, (caída del 26 %) (Romero et al., 2008).

### Centro Anta - Sistemas Productivos Extensivos

Para el monitoreo de suelo de estos sistemas, se trabajó en 11 fincas seleccionadas del Dpto. de Anta (Salta) y 2 del Noroeste de Santiago del Estero, que se agruparon en 4 zonas homogéneas (Romero et al, 2008), en total se tomaron 151 pares de muestras: cortina-lote. Se relacionó la textura con la MO en 174 cortinas de monte (Sánchez et al, 2008), estableciéndose los siguientes valores de referencia para los 3 grupos texturales (FAO):

Atributo	Grupo Textual		
	Fino	Medio	Grueso
Materia orgánica (%)	5,06	3,72	2,74

Tabla 1.

De la integración de los resultados de las dos zonas presentadas, y de otras experiencias ligadas al tema, se obtuvo a partir de las variables más sensibles, eficaces y eficientes, el Conjunto Mínimo de Indicadores (Tabla 2) y sus valores umbrales (Tabla 3).

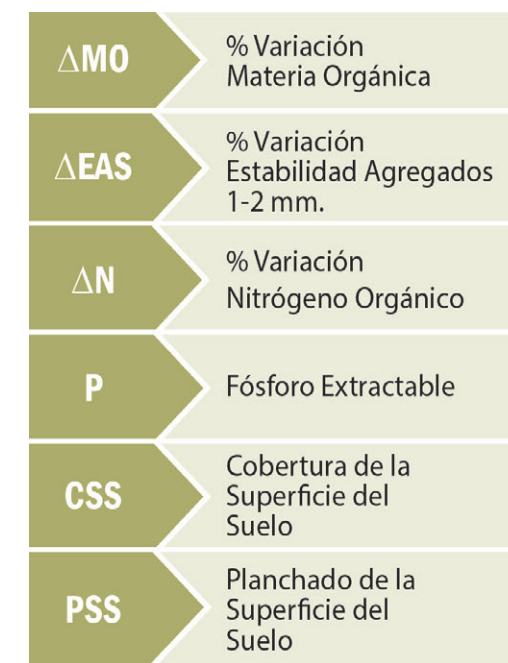


Tabla 2. Propuesta Conjunto Mínimo de Indicadores (CMI) para Sistemas agrícolas extensivos de granos a secano. Umbral al Chaco de Salta y Jujuy

**Tabla 3.** Propuesta de Valores umbrales del CMI para Sistemas agrícolas extensivos de granos a secano. Umbral al Chaco de Salta y Jujuy

Indicador de Calidad	Unidad de medida	Método de determinación	% de Caída en Lote (1)				
			Mínima	Ligera	Moderada	Alta	Muy Alta
$\Delta MO$	%	Walkley y Black	< 15	15-21	22-29	30-39	$\geq 40$
$\Delta EAS$	%	Corvalán et al 2000	< 15	15-21	22-29	30-39	$\geq 40$
$\Delta N$	%	Micro Kjeldhal	<15	15-21	22-29	30-39	$\geq 40$

Donde  $\Delta$ : Variación; (1) Romero et al. 2008 y Arzeno et al 2012.

Indicador de calidad	Unidad de medida	Método de determinación	Valores diagnóstico en los lotes (2)			
			Muy bueno	Bueno a regular	Regular a malo	Muy malo
P	ppm	Bruy-Kurtz Nº 1	> 20	20-12	11-8	< 8

Donde (2) Ortega y Corvalán 2010 "Diagnóstico de Suelos EEA Salta".

Indicador de Fertilidad	Unidad de medida	Método de determinación	Clasificación de los manejos en lotes		
			Mejorador	Conservacionista	Degradador
CSS	%	Arzeno 2010 a	$\geq 70$	69 - 30	< 30
PSS	%	Arzeno 2010 a	< 30	30 - 69	$\geq 70$

### Alertas de procesos de degradación y propuestas de manejo

Las Técnicas Conservacionistas tendientes a revertir los diversos procesos de degradación del suelo, deben ser analizadas con un enfoque integral, es decir, un conjunto de técnicas en interacción.

Así, si se incrementara la rotación con maíz o sorgo, se tendería a revertir todos los procesos de degradación mencionados. El efecto favorable dependería del estado del suelo, de su textura y del porcentaje de rotación (Arzeno, 2010 b).

### Bibliografía

ARZENO J. L. 2010 a – Evaluación de la superficie como indicador de calidad de suelo comparando los porcentajes de cobertura y planchado. CD Sistemas Productivos Sostenibles EEA Salta INTA.

ARZENO J. L. 2010 b – Sistemas Productivos Sostenibles. En: CD Sistemas Productivos Sostenibles EEA Salta INTA.

ARZENO J. L.; R.OSINAGA; F. FERRARY LAGUZZI; E. CORVALÁN y T. RODRIGUEZ . 2010 - Relación de la MO entre: 0-5 y 0-20 cm (% REMO 5/20), como indicador de calidad de suelos en parcelas de largo plazo de Salta. En: Resumen XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario. pag 224.

ARZENO J. L.; CORVALÁN E.; VIVAS F; HUIDOBRO D. J; FERRARY m F. 2012. Indicadores de calidad de suelo en Fincas del Observatorio ambiental de Tartagal. En: XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata.

CORVALÁN, E. R; A. FRANZONI; J. HUIDOBRO; J. L. ARZENO. 2000. Método de los microtamices para la determinación de la estabilidad de agregados de suelo de 1-2 mm. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. CD 4 pp.

FERRARY LAGUZZI F; R.OSINAGA; J. L. ARZENO y T. RODRÍGUEZ 2010 a – Fraccionamiento de la materia organica como indicador químico de la calidad del suelo en distintos sistemas de labranza. En XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario.

FERRARY LAGUZZI F; R. OSINAGA; J. L. ARZENO y T. RODRÍGUEZ 2010 b – Mineralización de la materia orgánica como indicador químico de la calidad del suelo en distintos sistemas de labranza. En XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario.

FERRARY LAGUZZI F; J. L. ARZENO; E. CORVALÁN y T. RODRÍGUEZ 2012 – Comparación de métodos de ensayo para la determinación de nitrógeno potencialmente mineralizable en diferentes manejos agrícolas. En XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata.

## Ecorregión Chaqueña

**SISTEMA PRODUCTIVO:** Agricultura de secano en siembra directa sobre suelos forestales sujetos a cambios en el uso del suelo

Julieta Mariana Rojas<sup>1</sup> y Juan José Zurita<sup>1</sup>

**SUELO:** Haplustept Údico (Inceptisol) Serie Tolosa

### **Caracterización del agroecosistema e identificación de sus puntos críticos.**

Durante el período 1956- 2005 en Argentina se estimó un incremento de más del 60% del área asignada a cultivos anuales, sucediendo los cambios más significativos en el Chaco Subhúmedo Occidental, donde las tasas de expansión agrícola y deforestación fueron las más altas del país, principalmente en las décadas del 90<sup>a</sup> y 2000 (Macchi et al., 2013; Viggliuzzo & Jobbágy, 2010). Los cambios en el uso del suelo (CUS) en el Chaco semiárido a partir de esta expansión ocurrieron principalmente por reemplazo de bosques nativos (BN). Esto tuvo como consecuencia la fragmentación del paisaje, con riesgo de degradación del suelo y pérdida de la biodiversidad de especies vegetales y animales para la región. En este contexto, en 2007 la Argentina fue zo-

nificada por la Ley Forestal 26.331 que clasifica el territorio en tres niveles de manejo forestal y transformación permitida (Ley de Presupuestos Mínimos de Protección Ambiental de los Bosques Nativos, 2007). Durante el año 2009, la Provincia del Chaco aprobó el Ordenamiento Territorial de los Bosques Nativos (Ley N° 6.409), de acuerdo con las Categorías de Conservación establecidas en la Ley 26.331. El INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) estableció un área de estudio denominada "Área Piloto de la Ecorregión Chaqueña" en los departamentos Almirante Brown y General Güemes dentro del área conocida como Impenetrable Chaqueño (Figura 1). En ésta "Área Piloto" la superficie no transformada disminuyó en el período 2000-2007 a

1. INTA, Estación Experimental Saenz Peña, Saenz Peña, Chaco, Argentina.

una tasa de reducción anual del 3,2% (Kees et al., 2009), representando una pérdida de 20000 ha de BN, destinadas a uso agrícola y agrícola ganadero. En ella se realizaron estudios sobre los recursos naturales, por sus altas tasas de CUS y por ser considerada zona susceptible a desmontarse por la ley forestal, con gran reemplazo de bosques y pastizales naturales y por lo tanto, riesgo de compromiso para los bienes y servicios ambientales (Rojas, 2012). En la zona, la agricultura es de secano y la producción agrícola se desarrolla generalmente en sistemas de siembra directa (SD).

Aunque el factor climático que limita principalmente la producción agropecuaria es el agua, en muchas áreas agrícolas la causa de las deficiencias hídricas no sólo son las bajas precipitaciones sino también el insuficiente almacenaje del agua en el suelo a causa de un manejo inadecuado (Panigatti et al., 2001).

Para este trabajo se seleccionaron 9 establecimientos dentro del departamento Almirante Brown, distribuidos en un gradiente NO-SE de aproximadamente 120 km a lo largo la RN 16. El patrón de muestreo estuvo basado en la elección de la misma región agroecológica, serie de suelo (Tolosa), y práctica de labranza posterior al desmonte (SD). El trabajo se realizó entre 2008 y 2011. Se muestrearon dos situaciones contrastantes: cortinas naturales de bosque nativo semideciduo (BN) y lotes desmontados adyacentes transformados a agricultura intensiva (A), con 4 a 23 años de deforestación y diferentes secuencias de cultivo. La serie Tolosa está clasificada como Haplustept Údico y se encuentra presente como suelo forestal en toda la provincia del Chaco. Los horizontes superficiales y subsuperficiales de esta serie son de textura fina con porcentaje de limo + arcilla promedio mayor a 700 g.kg<sup>-1</sup> de suelo.

Se tomaron muestras compuestas de las profundidades de 0-10 y 10-20 cm, incluyendo los dos primeros horizontes de la serie Tolosa, y se determinaron los siguientes parámetros: pH, conductividad eléctrica (CE), textura (T), humedad equivalente (HE), carbono orgánico total y particulado (COT y COP), nitrógeno total (N), fósforo extraíble (P), infiltración (Inf), densidad aparente (Da), resistencia mecánica a la penetración (RMP), humedad equivalente (HE), fracción erosionable (FE), y estabilidad estructural en seco (EES).

El conjunto mínimo de indicadores (CMI) se obtuvo a partir de dos instancias de análisis estadístico. Se comenzó con un análisis univariado basada en enfoque de modelos mixtos que sirvió para retener las variables que presentaron diferencias significativas entre BN y A y entre profundidades; y un análisis multivariado posterior por medio de análisis de componentes principales (ACP) con las variables seleccionadas. Los indi-

cadorese seleccionados fueron: COT, COP, Nt, pH, Da y FE; los cuales se sugiere sean incluidos en todo set de indicadores utilizado para evaluar el estado de suelos desmontados en esta región, en Haplustepts u otros suelos con características similares (Tabla 1). La alta correlación negativa o positiva entre algunos de ellos, como por ejemplo entre COT y COP ó Nt, posibilitaría incluso realizar una selección aún mayor en caso de ser operativamente necesario.

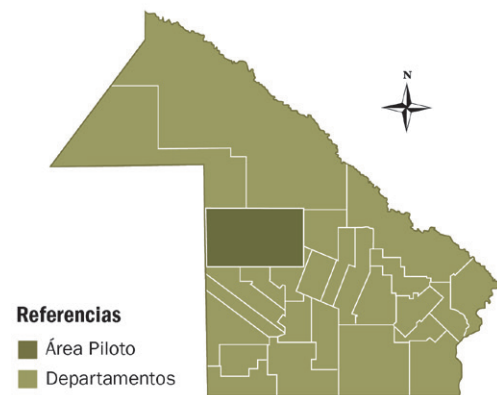
Los efectos del CUS sobre estos parámetros fueron mayores que el efecto inicial que generan las diferencias intrínsecas entre sitios seleccionados para el muestreo. Estos indicadores pudieron discriminar en el conjunto de datos la condición BN de la condición disturbada A y su comportamiento varió con la profundidad. El COT demostró ser el parámetro más influyente en las dos profundidades y se correlacionó altamente con Nt y COP.

El Nt fue la segunda variable de mayor peso en el ACP y se lo retuvo considerando que podría ser útil en monitoreo de suelos de lotes agrícolas fertilizados, y como complemento a la información dada por el COT. También se retuvo al COP por sensibilidad, alta proporción dentro del COT y por presentar las mayores caídas en A en el plazo estudiado. Aunque el pH no fue contundente en el ACP para separar las situaciones se consideró una variable útil para incorporar al CMD por presentar aumentos significativos en A y por su facilidad de medición. La Da fue un indicador altamente sensible, presentando tendencia a aumentar en A, principalmente en el horizonte superficial. La FE se presentó como una variable muy promisorio como indicador. Aunque actualmente es una medición que se realiza en zonas áridas y semiáridas para evaluar susceptibilidad a la erosión eólica, mostró sensibilidad, poca variabilidad y cambios estadísticamente significativos, características fundamentales de un indicador.

En la tabla 2 se presentan los valores para la condición inalterada o prístina (In), valores de referencia (VR) y umbrales (VU) determinados para cada indicador seleccionado para las dos profundidades estudiadas.

<b>COT</b>	Carbono Orgánico total
<b>COP</b>	Carbono Orgánico particulado
<b>Nt</b>	Nitrógeno total
<b>pH</b>	Reacción del suelo
<b>Da</b>	Densidad aparente
<b>FE</b>	Fracción erosionable

**Tabla 1.** Conjunto Mínimo de Indicadores (CMI) para suelos Inceptisoles con sistema agrícola de secano en SD sobre suelos forestales. Ecorregión Chaqueña.



**Figura 1.** Área Piloto Ecorregión Chaqueña (rojo) - Superficie: 721 900 Ha 26°5'56.38"S; 61°42'48.52"O- 26°42'13.51"S; 60°36'34.45"O

**Tabla 2:** Valores umbrales (VU), de referencia (VR) y valores correspondientes a la situación inalterada (In), para el CMI de Inceptisoles con sistema agrícola de secano en SD sobre suelos forestales. Ecorregión Chaqueña.

	Profundidad (cm)	Unidad	Método de determinación	In	VR	VU
COT	0 - 10	g kg <sup>-1</sup>	Walkley y Black	30,8	30,81	8(min)
	10 - 20			16,7	16,71	4(min)
COP	0 - 10	g kg <sup>-1</sup>	Cambardella y Elliot (modificado por Lorenz)	15,2	15,2	7(min) BN 4(min) A
	10 - 20			5,8	5,8	entre 1-3(min)
Nt	0 - 10	%	Kjeldahl (modificado)	0,25	0,25	0,2%(min)
	10 - 20			0,14	0,14	0,1%(min)
pH	0 - 10	adimensional	Potenciométrico en agua (solución 1:2:5)	6,5	7	5,5(min) - 8,2(max)
	10 - 20			6,7	6,7	5,5(min) - 8,2(max)
Da	0 - 10	g cm <sup>-3</sup>	Método del cilindro	1,18	1,2	1,6 (max)
	10 - 20			1,31	1,4	1,6 (max)
FE	0 - 2,5	%	Tamiz rotativo	29,2	29,2	40%(max)
	10 - 20					

Los valores de referencia para los cuatro indicadores se establecieron de acuerdo a los resultados del trabajo anteriormente descrito, opinión de expertos, descripción del perfil modal de la Serie Tolosa y bibliografía existente.

Como VR de COT se tomó el valor promedio de la BN para las dos profundidades. El VU mínimo de COT para la primer profundidad se estableció según los requerimientos de los cultivos principales de la zona (soja, algodón, girasol y sorgo) determinados por Sys et al. (1993), y se consideró la mitad

de este valor como umbral para la segunda profundidad a partir de la estratificación hallada en la situación inalterada, el perfil modal de la serie y los valores de lotes cultivados. Los valores de COP para In son las medias de los suelos de BN estudiado, valores altos para la zona pero que coinciden por lo informado por Albanesi et al. (2003) y Sanchez et al. (2006) para suelos de vegetación nativa de Santiago del Estero quienes informaron como valores máximos de COP 14.2 y 12.8 g.kg<sup>-1</sup> respectivamente para el horizonte superficial. Estos mismos se consideraron VR. Como VU se diferenció entre sue-

los BN y A, ya que el COP fue un indicador altamente sensible al CUS y presentó grandes caídas en los suelos sometidos a agricultura. Se definió el VU de 7 g.kg<sup>-1</sup> para horizonte superficial de BN basado en el valor mínimo medido y 4 g.kg<sup>-1</sup> para A basado en el valor medio del horizonte subsuperficial (3.97 g.kg<sup>-1</sup>), considerando que no debería caer por debajo del mismo dada la estratificación que presenta generalmente el COP. Para el horizonte subsuperficial se estableció un rango entre 1-3 g.kg<sup>-1</sup> para ambas condiciones. Aunque los valores mínimos hallados fueron cercanos a 0 (cero) y no se puede dar evidencia exacta de que en esa profundidad esto afecte significativamente la productividad de los cultivos, se establecen VU mayores a los mínimos basados en el COP potencial hallado como valores medios y máximos. Es importante resaltar que los VU aquí presentados corresponden a una serie de textura franca fina, siendo los valores para suelos de textura arenosa generalmente menores (Diovisalvi et al., 2014), lo que habría que tener en cuenta si se consideran estos umbrales para otras series de suelo.

Para el Nt, se tomó igual que para el CO como VR el promedio del BN, y los VU mínimos se calcularon en relación al contenido de CO asumiendo un contenido aproximado de 2.5 % de N total en el CO.

Como VR de pH para la primera profundidad se estableció el pH neutro y para la segunda se tomó el valor del perfil modal de la serie Tolosa, el cual coincide con promedios de valores medidos en BN, campo y descripción del perfil modal. Como VU mínimo y máximo se tomaron los citados por Sys et al. (1993) para los cultivos predominantes, tomando como precautorio el valor máximo de algodón y soja.

El VR para Da se determinó siguiendo el criterio de Reynolds et al. (2002), quien establece como

límite mínimo de densidad crítica entre 1.2 y 1.6 g.cm<sup>-3</sup> respectivamente para suelos con contenidos de limo más arcilla cercanos a 90%, teniendo en cuenta que los suelos bajo estudio coincidieron con la descripción del perfil modal de la serie (alrededor de 70 % de fracción fina), que posee textura franca en superficie y franco arcillosa en el horizonte subsuperficial. Los VU máximos también se basaron en el citado por este autor como límite para el crecimiento de las raíces en suelos francos.

Respecto de la FE, se tomó como VR el valor promedio de la situación inalterada BN, y como VU máximo un 40%, basándose en la clasificación de Shiyatyi (1965), citado en López et al. (2007) que clasifica a los suelos ligeramente erosionables aquellos con FE<40%, siendo moderada y altamente erosionables los que superan este valor. Información más detallada sobre los resultados de FE y EES en el presente estudio se pueden encontrar encuentra publicada en Rojas et al. (2013).

### Alertas de procesos de degradación y propuestas de manejo

Los CUS generaron degradación significativa en la calidad física y química de los suelos agrícolas en comparación con los suelos de la situación prístina en un plazo relativamente corto.

El COT y la Da fueron los indicadores de mayor potencial, imprescindibles para el estudio y monitoreo de suelos de esta región. Los resultados revelan pérdidas de COT, COP y Nt que significan pérdida de fertilidad en el horizonte superficial, valores de Da y FE que alertan sobre posibles procesos de compactación. Esto podría tener consecuencias negativas para la producción de cultivos en el mediano plazo. Para predecir y frenar procesos de degradación y erosión en suelos sometidos a CUS en la región, es indispensable utilizar estos indicadores para monitorear y evaluar si las tendencias de caída

o aumento se mantienen, agudizan o suavizan dependiendo de las prácticas de manejo realizadas, específicamente de las rotaciones.

El objetivo básico de toda práctica de manejo en la región debe ser proteger el horizonte superficial para detener la caída de la fertilidad natural y la calidad física de suelo, que afecta directamente la entrada y almacenaje del agua, factor clave para la producción en zonas semiáridas.

Es factible además recomendar este CMI como herramienta de diagnóstico del estado de salud del suelo, previo al otorgamiento de permisos para los planes de uso contemplados actualmente dentro del marco legal de bosques nativos.



### Bibliografía

ALBANESI, A.; ANRIQUEZ, A.; POLO SANCHEZ, A. 2003. Efectos de la agricultura convencional sobre algunas formas del C en una toposecuencia de la Región Chaqueña, Argentina. *Agriscientia* XX, 9-17.

DIOVISALVI, N.V., STUDDERT, G.A.; REUSSI CALVO, N.I.; DOMINGUEZ, G.F., BERARDO, A. 2014. Estimating soil particulate organic carbon through total soil organic carbon. *Ci.Suelo* 32(1), 85-94.

KEES, S.M., GOYTÍA, S.Y., DAGNINO, L.G. 2009. Avance de la Frontera Agropecuaria en el Chaco Semiárido en el período 2000-2007. XX Reunión de Comunicaciones Científicas y Técnicas. FCA. UNNE.

Ley N° 26331- De Presupuestos Mínimos de Protección Ambiental para los Bosques Nativos. 2007. Disponible en: <http://www.senado.gov.ar/prensa/5904/noticias>

LÓPEZ, M.V., DE DIOS HERRERO, J.M., HEVIA, G.G., GRACIA, R., BUSCHIAZZO, D.E., 2007. Determination of the wind-erodible fraction of soil using different methodology. *Geoderma* 139, 407-411.

MACCHI.L., H.R.GRAU, P.V., ZELAYA, S.MARINARO. 2013. Trade-offs between land use intensity and avian biodiversity in the dry Chaco of Argentina: A tale of two gradients. *Agric. Ecosyst. Environ.* 174, 11-20.

PANIGATTI, J.L.; BUSCHIAZZO, D.; MARELLI, H. (eds.). 2001. *Siembra Directa II*. Ediciones INTA. 377 p.

REYNOLDS, W.D; BOWMAN, B.T.; DRURY, C.F.; TAN, C.S.; LU, X. 2002. Indicators of good soil quality: density and storage parameters. *Geoderma* 110: 131-146

ROJAS, J.M., BUSCHIAZZO, D.E., ARCE, O.A.E. 2013. Parámetros edáficos relacionados con la erosión eólica en Inceptisoles del Chaco. *Ci.Suelo* 31(1), 133-142.

ROJAS, J.M. 2012. Indicadores de calidad de suelos desmontados y destinados a la producción agrícola en el Área Piloto de la Ecorregión Chaqueña. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Tucumán. Argentina. 151 pp.

SÁNCHEZ, M.C.; HEREDIA, O.S.; BARTOLONI, N.; GONZÁLEZ, C.; ARRIGO, N. 2006. Secuencias de cultivos y labranzas: efectos sobre las fracciones de carbono del suelo. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta-Jujuy, septiembre 2006. En CD.

SYS, I.C.; VAN RANST, E.; DEBAVEYE, J.; BEERNAERT, F. 1993. *Land Evaluation. Part III. Crop Requirements*. Agricultural Publications N° 7. General Administration for Development Cooperation. ITC.

VIGGLIZZO, E.F; JOBBÁGY E. (Eds.). 2010. *Expansión de la Frontera Agropecuaria en Argentina y su Impacto Ecológico - Ambiental*. Buenos Aires. Ediciones INTA. 102 p.

## Ecorregión Chaqueña Oeste de Santiago del Estero

SISTEMA PRODUCTIVO: Ganadero- agrícola sin riego

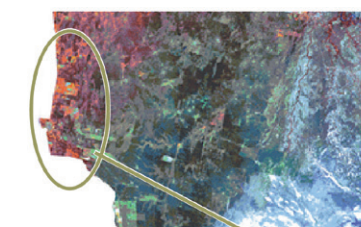
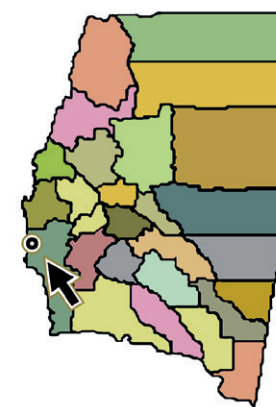
María Cristina Sanchez<sup>1</sup>, Abel Azar<sup>1</sup>, Roxana Ledesma<sup>1</sup>, Carlos Kunst<sup>1</sup>,  
Jose Salvatierra<sup>1</sup>, Pablo Tomsic<sup>1</sup> y Roberto Aragón<sup>1</sup>

SUELO: Haplustol típico (Molisoles)

### Caracterización del agroecosistema e identificación de sus puntos críticos.

La producción ganadera en el NOA se desarrolla principalmente en la zona denominada Chaco semiárido dentro de la Región Chaqueña. Santiago del Estero se ubica dentro de esta región natural. Los estudios se realizaron en la región Centro-Oeste, localidad de Frías, Departamento Guasayán. ((LS 28° 43'55,50"; LO 64° 57'13,18')

**Figura 1:** Ubicación geográfica del sitio bajo estudio y sus características ambientales (Fuente: SigSE V2.0- Angueira et.al., 2007).



#### Establecimiento Santa Teresita

- Limitaciones:**
- Déficit hídrico
  - Baja estabilidad estructural
  - Alto riesgo de erosión y pérdida de MOS

Clima Semiárido.

Zona Homogénea: Bajada Sierras Subandinas - Pampeanas

Ambiente de lomadas y ondulaciones (N.S). La superficie presenta sedimentos fluviales y eólicos que descansan sobre sedimentos arcillosos-yesíferos



Área geográfica donde se ubica el Establecimiento Santa Teresita

1. INTA, Santiago del Estero. Santiago del Estero, 4200, Santiago del Estero, Argentina.

La actividad ganadera en la región del Centro-Oeste de Santiago del Estero, ha crecido significativamente a partir de la década del '80. La mejora en el manejo del pastizal, del rodeo y la incorporación de pasturas megatérmicas (principalmente *Panicum maximun cv. Gatton panic*) fueron algunas de las causas del aumento de la producción ganadera bovina en esta área (Cornacchione, 2006). Como consecuencia de una intensa acción antrópica se generaron procesos de degradación, principalmente debido a la sobreexplotación forestal, mal manejo del pastoreo y del fuego, que potenciaron la modificación de la vegetación original de la región a través de los años. Así, uno de los problemas asociados a ello fue la aparición de grandes superficies degradadas, ocupadas por especies leñosas arbustivas (fachinal), que perjudican de forma directa e indirecta a la ganadería (Kunst et al, 1999).

El clima semiárido de la región chaqueña semiárida, está caracterizado por una marcada estación seca invernal y elevada tasa de evapotranspiración

(Minetti, 2005). Santiago del Estero registra una precipitación media anual que varía entre 950 mm en la zona Este a 550 mm en el Oeste. El potencial de evapotranspiración medio anual para la zona de influencia de la localidad de Frías es de 1250 mm resultando en un balance hídrico negativo durante la mayor parte del año (Figura 2) (Prieto et al., 2006). La temperatura media anual en la provincia es de 20.8 °C, mientras que en la zona Centro-Oeste es de 19,8°C (Acuña et al., 2002).

La vegetación (de tipo xerófilo y caducifolio) caracteriza a una fisonomía de monte degradado, con un importante estrato arbustivo. El estrato arbóreo esta compuesto principalmente por quebracho colorado (*Schinopsis quebracho colorado*), y en menor grado quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho blanco*); se presentan entre éstos, algarrobos (*Prosopis nigra* y *Prosopis alba*) y mistol (*Zizyphus mistol*). El estrato arbustivo se compone de tusca (*Acacia aroma*), chañar (*Geoffroea decorticans*), tala (*Celtis tala*), y garabatos (*Acacia praecox* y *A. furcatispina*), entre los

más relevantes. El estrato herbáceo está constituido principalmente por gramíneas de los géneros *Setaria*, *Digitaria*, *Trichoris*, *Chloris*, *Eragrostis* y *Elionorus*, entre otras (Cornacchione, 2006).

La información generada de indicadores de calidad de suelo se basa en un ensayo experimental ubicado en un Establecimiento ganadero de la localidad de Frías, Dpto. Guasayán, Santiago del Estero (LS 28° 43'55,50"; LO 64° 57'13,18") (Figura 2). El suelo pertenece a la Unidad Cartográfica Asociación Frías 80% y Tapso 20%, con Capacidad de Uso Ilíc (Angueira C y J.Vargas Gil, 1993). Esta Unidad se describe como lomas extendidas y planos altos de superficie irregular. Los suelos de Serie Frías ocupan los sectores de superficie uniforme y la serie Tapso, el microrelieve. La Serie Frías es un suelo oscuro, profundo, ligeramente ácido en superficie, bien drenado, desarrollado sobre sedimentos loésicos, ubicado en las lomas y planos altos. Son suelos fértiles, con buen contenido de materia orgánica y moderada retención de humedad, se los usa tanto para agricultura como para ganadería, aunque presentan alguna limitación climática. Por otro lado, los suelos de la Serie Tapso están limitados parcialmente en su aptitud por su poco desarrollo, débil estructuración, salinidad, calcáreo diseminado en la masa y la limitación climática (escasas precipitaciones y alta evapotranspiración) Por las condiciones ambientales generales de la zona, se la caracteriza por su alta luminosidad, altas temperaturas estivales, y con tendencia a la salinización, compactación y a la erosión.

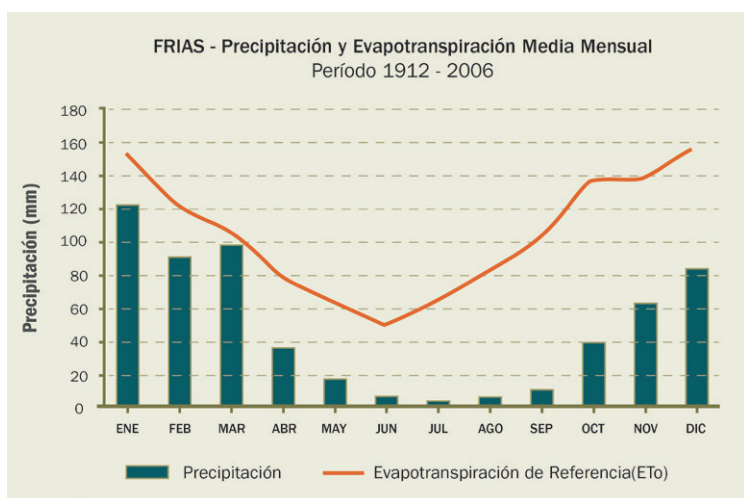
El conjunto mínimo de indicadores de calidad de suelo (CMI) se obtuvo a partir del análisis de características morfológicas del suelo en el sitio del ensayo experimental (Tabla 1). Por tratarse de un ambiente semiárido, de lomadas, con desmonte, pastoreo intensivo y escasa cobertura del suelo se propone como hipótesis del trabajo evaluar los

factores edáficos estrechamente relacionados con la estabilidad de los agregados (CO), fertilidad química (pérdida de nutrientes principales, riesgo de salinización), y física (compactación).

COT	Carbono orgánico total
Nt	Nitrógeno total
P ex	Fósforo extraíble
Da	Densidad aparente
CSS	Contenido de sales solubles
CE	Conductividad eléctrica
pH	Acidez / alcalinidad

**Tabla 1:** Conjunto Mínimo de Indicadores (CMI) para suelos Molisoles con sistema ganadero sin riego. Oeste de Santiago del Estero.

Para obtener los valores de referencia (VR), en el año 2007 se realizó un primer muestreo de observación y valoración de parámetros químicos en tres diferentes campos ganaderos del área de influencia de la AER Frías, donde se registraron valores promedio de materia orgánica del suelo (MOS) y Fósforo extraíble (Bray Kurtz) de 3,24 % y 16, 2 ppm respectivamente para los primeros 15 cm de profundidad. En el mismo orden, pero en la profundidad 15-30 cm, los valores descienden a 2,44 % y 8,8 ppm. En el año 2008, en un establecimiento ganadero de la localidad de Frías, se implementa un lote demostrativo de manejo de monte sustentable para la producción ganadera.



**Figura 2:** C: Precipitación y Evapotranspiración media mensual en la localidad de Frías (Fuente: Prieto et al., 2006 citado en SigSE V2.0 (Angueira et al., 2007)



Los objetivos de este trabajo fueron: evaluar la recuperación de la productividad y la diversidad del campo natural mediante el uso de prácticas difundidas en la región e identificar indicadores de la salud del ecosistema y su capacidad para generar productos y servicios: forraje, sombra, madera.

Los tratamientos rolado, rolo aereador y rastra fueron realizados en Julio de 2008, la quema se realizó en Octubre de 2008. Cada tratamiento tiene dos repeticiones distribuidas al azar en parcelas de 50 m x 300 m. las que se subdividen en 3 subparcelas obteniéndose 6 muestras compuestas por tratamiento.

Se procedió a clausurar el lote de 300 ha, con alambrado periférico, ejecución de tratamientos en el momento oportuno, y evaluación de la condición edáfica en los tratamientos (disturbios). Cada tratamiento representa una de las formas de manejar el fachinal y monte para ganadería. Los tratamientos implementados fueron: 1- Rolado; 2- Rastra; 3- Rolo aereador; 4- Fuego prescripto y 5- Clausura (descanso del pastoreo, representa nuestro testigo).

Las estrategias del manejo de los disturbios son: Intensidad (años de clausura); disturbios (1 por año); Severidad (comparación del tratamiento con el testigo) e Intervalo de retorno o frecuencia (anual).

El tratamiento Testigo (parcela Clausurada al momento de instalar el lote demostrativo) representa el estado de degradación del lote al momento de iniciar el ensayo. Esta parcela es mantenida sin intervención

2008	MOS (%)	Nt (%)	P (ppm)	pH ex	CE (dS/m)	
T1 (Fuego)	2,3	0,19	40,5	7,3	6,4	
T4 (Aereador)	2,4	0,17	45,9	7,3	4,7	
T5 (Clausura)	2,6	0,22	48,4	7,1	4	
T3 (Rastra)	2,3	0,17	35,3	7,2	7,1	
2009	MOS (%)	Nt (%)	P (ppm)	pH ex	CE (dS/m)	DAP (g/cm <sup>3</sup> )
T1 (Fuego)	2	0,13	58	7,1	6	1,3
T2 (Rolo)	2	0,14	60,3	7	7,5	1,02
T2 (Rolo)	1,9	0,14	63,1	6,9	7,1	1,16
T3 (Rastra)	1,8	0,14	64	7	3,2	1,1
T5 (Clausura)	1,6	0,13	52	6,8	7,3	1,2

MOS =  $COT \times 1,3$  (Walkley Black); Nt (Kjeldahl); P ext (Bray Kurtz); pH y CE del extracto de saturación y DAP (cilindro)

**Tabla 2:** Valores promedio para la profundidad (0-20 cm) de materia orgánica del suelo (MOS), nitrógeno total (Nt), fósforo extraíble (Pex), pH y salinidad (CE conductividad eléctrica en extracto de saturación) y Densidad aparente (DAP) para los años 2008 y 2009

alguna para estudiar su evolución respecto al resto de los tratamientos. Representa la línea de base con el cual se van a monitorear y comparar la evolución de los indicadores entre los tratamientos propuestos. Los datos registrados en 2008 y 2009 (solo en tratamientos ejecutados), se muestran en tabla 2.

### Alertas de procesos de degradación y propuestas de manejo

Los valores de conductividad eléctrica en el extracto de saturación (CE) denotan condición leve en salinidad hasta los 20 cm de profundidad. Por otro lado, la escasa cobertura vegetal y el grado de compactación superficial en el sitio con pendiente entre 2 y 6 % (clase 2; suavemente inclinado; FAO 1977), aspecto también descrito por Kunst et. al., (2006), favorecen los procesos de degradación como por ejemplo, compactación superficial y subsuperficial, pérdida de materia orgánica del suelo, erosión hídrica y eólica. Es posible observar que a un año de iniciado los tratamientos bajo clausura (sin ingreso de animales), las condiciones de fertilidad química mejoran, a excepción del testigo que no recibió ningún tratamiento de mejora para la restauración de variedad de arbustos y pasturas como ocurrieron en los tratamientos iniciados en 2008. Es posible que con el control de crecimiento del estrato arbóreo, la restauración de gramíneas autóctonas y de otras introducidas, se logre un manejo ganadero que minimice los factores de riesgo ambiental antes mencionados. Para ello es necesario monitorear en el tiempo la evolución de los componentes del sistema (suelo-vegetación-clima-producción ganadera) e incrementar el número de observaciones en campos ganaderos de la zona con situaciones contrastantes en cada sitio (unidad de muestreo).

En este ciclo de evaluaciones (2008-2011) se han observado cambios favorables en la recuperación de la productividad y diversidad natural en vegetación

del campo comenzando con la práctica de clausura (T5 Testigo) y mejorando en el resto de los tratamientos. Para el período 2008-2010, en los tratamientos de rolado y rastra se observó una disminución importante de la densidad de arbustivas (volumen promedio de arbustivas por hectárea  $m^3 \cdot ha^{-1}$ ) en los tratamientos respecto del testigo mejorando así la accesibilidad de los animales (Ledezma, 2011). A la vez, se incrementó la oferta y valor nutritivo de las leñosas en los tratamientos respecto del testigo (Gomez, 2011). En esta etapa de desarrollo del trabajo de investigación, no podemos determinar valores umbrales o categorizar los indicadores de calidad de suelos seleccionados pues nos encontramos en el primer ciclo del proyecto (2008-2011).

Prácticas de descanso y el uso adecuado de otras como las propuestas en este estudio (aún en temprana estado de evaluación), pueden mejorar las condiciones de oferta nutricional a la vez que aportan a la calidad del suelo. Es importante el manejo de cobertura vegetal con especies vegetales de diferentes estratos, particularmente en lotes con pendiente moderada a alta, intercalando barreras biológicas para mejorar la captación y almacenamiento de agua en el perfil, lo que a su vez disminuye la escorrentía superficial. En cuanto a este punto, se pueden establecer estudios a nivel de cuenca y finca para controlar y disminuir el efecto de la velocidad del agua en épocas de lluvias en lotes mixtos y ganaderos para lograr los objetivos antes mencionados.

Los cambios anuales en los indicadores de calidad de suelo pueden representar el rango de variación normal para la zona en un período climático determinado (por la gran variabilidad de precipitaciones y extremos de temperaturas críticas), por lo que es importante el monitoreo de los mismos en el mediano y largo plazo. Esto permitirá establecer valores de equilibrio respecto de una línea de base y los valores umbrales para cada ambiente.

Es así que el manejo sustentable del monte para producción ganadera involucra el estudio de cada componente biofísico (suelo, vegetación, relieve, clima, animal) con sus atributos de calidad, como también los recursos del productor para alcanzar este objetivo en el estudio de la sustentabilidad de sistemas productivos en el Chaco semiárido de Santiago del Estero.

**Agradecimientos y fuente de financiación:**

- INTA EEASE Proyecto Regional Oeste
- AER Frías
- Proyecto Incremento de la productividad y calidad de los pastizales - AEF 263051
- Proyecto PNECO 93012 – PNSUELOS 1134023
- Proyecto Utilización de pastizales - AEF 263061
- Colabora: Sociedad Rural de Frías

**Bibliografía**

ACUÑA L. et al, 2002. Mapa de Isotermas. Temperatura media. INTA EEASE-FCEyT. En Sistemas de Información Geográfica de Santiago del Estero SigSE V2.0 (Angueira et.al., 2007)

ANGUERIA C. y J. VARGAS GIL. 1993. Cartas de suelos de la República Argetnina: LAVALLE-TAPSO-FRIAS. INTA-EEASE Santiago del Estero.

ANGUEIRA C., D. PRIETO, J. LÓPEZ y G. BARRAZA. 2007. SIGSE V 2.0- Sistemas de Información Geográfica de Santiago del Estero. ISBN 987-521-170-2

CORNACCHIONE M. 2006. Diagnóstico e identificación de los sistemas productivos del área de influencia de la Agencia de Extensión Rural inta, Frías. Tesis para optar al Grado Académico de Magister en Desarrollo de Zonas Áridas y Semiáridas. Universidad Nacional de Santiago del Estero. Facultad de Agronomía y Agroindustrias.

FAO 1977. Guía para la descripción de perfiles de suelo.

GOMEZ, A.T. 2011. Jornada de campo: Conviviendo con las leñosas: "Manejo Integral de la vegetación y recuperación de pasturas para la producción ganadera". INTA EEA Sgo del Estero y Sociedad Rural de Frías. Boletín de divulgación.

KUNST C., R. RENOLFI, A. FUMAGALLI, F. MOSCOVICH, M. CORNACCHIONE, E. MONTI y M. CARRIZO. 1999. Habilidadación de tierras para uso agropecuario en el Chaco semiárido Santiagueño. En: 2da Jornada ganadera del NOA: Habilidadación de tierras para ganadería. Proyecto macroregional bovino del NOA. Org. INTA EEA Salta. pp 67-85.

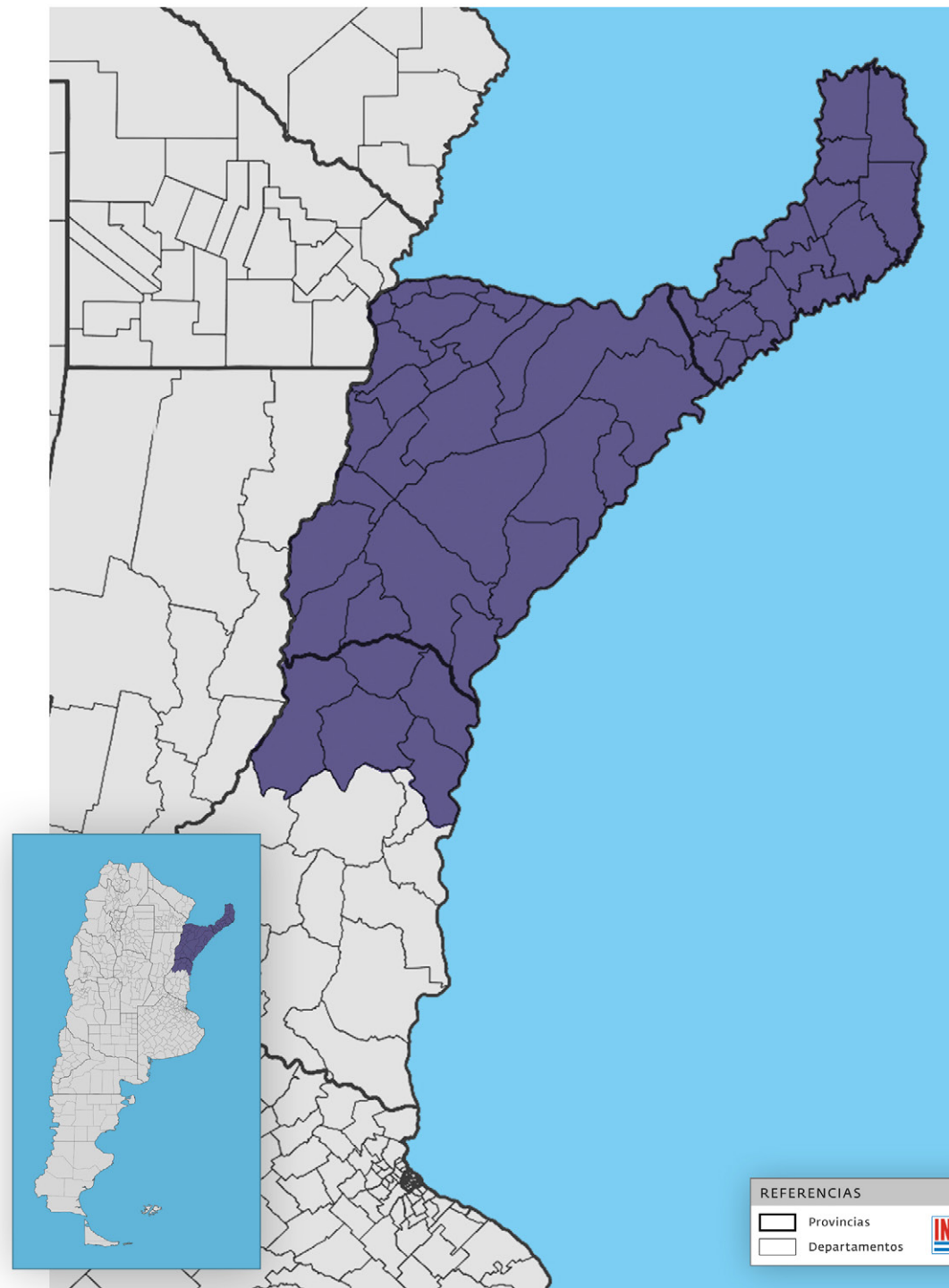
KUNST C., E. MONTI, H. PEREZ, y J. GODOY. 2006. Assessment of the rangelands of southwestern Santiago del Estero, Argentina, for grazing management and research. Journal of Environmental Management 80: 248–265.

LEDESMA, R. 2011. Jornada de campo: Conviviendo con las leñosas: "Manejo Integral de la vegetación y recuperación de pasturas para la producción ganadera". INTA EEA Sgo del Estero y Sociedad Rural de Frías. Boletín de divulgación.

MINETTI, J. 2005. Atlas Agroclimático del NOA. En: Clima del Noroeste Argentino. Ed. Laboratorio Climatológico Sudamericano. Tucumán. 449 pp.

Proyecto regional Oeste EEA Santiago del Estero. 2009

**Ecorregión Mesopotámica**



## Ecorregión Mesopotámica Centro y noroeste de Misiones

SISTEMA PRODUCTIVO: Forestal (Plantaciones de *Pinus taeda*)

Norberto M. Pahr<sup>1</sup>; Alejandra Von Wallis<sup>1</sup>

SUELO: Kandiuultes (Ultisoles)

### Caracterización del agroecosistema e identificación de sus puntos críticos.

Las primeras plantaciones con fines comerciales de *Pinus sp.* en la provincia de Misiones se realizaron en la década de los años '50, intensificándose su cultivo en las décadas siguientes. Los ciclos de producción abarcan un período de alrededor de 20 a 25 años, por lo que actualmente existen áreas que soportan un tercer ciclo de cultivo forestal. El primer ciclo, en la mayoría de los casos, se inició luego de la eliminación del bosque nativo preexistente, a partir del aprovechamiento de la madera y la eliminación de residuos con quema manual o en escolleras armadas con topadora. Las sucesivas labores que se ejecutan a lo largo de un ciclo de cultivo forestal, especialmente durante la preparación del terreno y la cosecha, ponen en riesgo la capacidad productiva de los suelos, en su mayor parte a causa del uso excesivo de maquinaria pesada (Goya et al, 2003; Froehlich, 1984

y Pritchett, 1986). A ello se suman las actividades de postcosecha tales como el apilado en escolleras y la quema de residuos que causan pérdida de materia orgánica y de nutrientes, en particular de nitrógeno (Fernández et al, 2000).

El uso forestal continuo puede reducir la calidad del suelo y disminuir su capacidad productiva, principalmente debido a la exportación de nutrientes provocada por el aprovechamiento en turnos de corte posiblemente menores a la rotación ecológica (Kimmins, 1974). El efecto de la cosecha de productos forestales sobre la productividad de los suelos en rotaciones sucesivas ha adquirido una singular atención en los últimos años (Gonçalves et al., 1997; Wei et al., 2000). Uno de los objetivos del manejo forestal sustentable es el mantenimiento de la productividad a

1. INTA, Estación Experimental Montecarlo. Montecarlo 3384, Misiones, Argentina.

lo largo de las rotaciones (Fernández, 2003). En este contexto, resulta de importancia establecer criterios e indicadores cuantitativos de impacto ambiental de distintos manejos de las reforestaciones y predecir las consecuencias sobre la productividad y el rendimiento de rotaciones futuras (Goya et al, 2003).

Con el objetivo de seleccionar los indicadores de calidad de suelo en plantaciones de Pinus taeda de tercer ciclo forestal, se relevaron diferentes variables de calidad de suelo (Tabla 1) en parcelas de plantaciones forestales y de bosque nativo primario en la región centro y noroeste de la provincia de Misiones, ubicadas sobre suelos rojos (Ultisoles).

Aún cuando no se dispone de un análisis estadístico que permita identificar el conjunto mínimo de indicadores para evaluar el impacto de las reforestaciones sobre la calidad del suelo, los valores obtenidos a partir del muestreo realizado, señalan algunas tendencias importantes (Tabla 2). Se observa un aumento de la densidad aparente

<b>Da</b>	Densidad aparente
<b>VI</b>	Velocidad de infiltración
<b>Is</b>	Índice de estabilidad estructural
<b>pH</b>	Reacción del suelo
<b>CO y MO</b>	Carbono y materia orgánica fácilmente oxidable
<b>Nt, P, K</b>	Nitrógeno total, fósforo y potasio total y disponible
<b>CIC</b>	Capacidad de intercambio catiónico

**Tabla 1:** Variables edáficas evaluadas para suelos Ultisoles bajo sistema forestal de Pinus taeda. Centro-noroeste de Misiones.

Variable	Unidad de medida	Método de determinación	Espesor 0 - 10 cm		Espesor 10 - 30 cm	
			Pt	BN	Pt	BN
DA	gr.cm <sup>3(-1)</sup>	Cilindro	1,03	0,86	1,30	1,02
VI	cm.min <sup>-1</sup>	USDA	15,58	27,47	1,52	8,11
CO f.ox.	%	Walkey - Black	2,13	2,40	1,25	1,41
Nt	%	Semim, Kjeldahl	0,14	0,31	0,11	0,21
P extract.	mg.kg <sup>-1</sup>	Bray-Kurtz 1	7,27	6,88	3,03	5,58
K extract.	cmol <sup>+</sup> .kg <sup>-1</sup>	Ac. Amonio 1.0 N	0,57	0,36	0,27	0,21
pGH	adimensional	Potenc. (1:2.5)	5,4	5,6	5,4	5,3
CIC	cmol <sup>+</sup> .kg <sup>-1</sup>	pH 7	15,7	17,6	14,0	13,7

**Tabla 2:** Valores promedios de variables de calidad de suelo relevadas para las situaciones de plantación con Pinus taeda (Pt) y Bosque Nativo (BN)

y una disminución acentuada de la velocidad de infiltración en ambos espesores de suelo estudiados en la situación de plantación con Pinus taeda. También se aprecia una pérdida de concentración de carbono orgánico y de nitrógeno total, lo que indica el efecto de las actividades de cosecha y preparación del terreno sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos rojos cultivados con un tercer ciclo de pino en Misiones.

### Alertas de procesos de degradación y propuestas de manejo

La estrategia de mantener los residuos de las cosechas y de aplicar el sistema de cosecha de fuste entero y no de árbol entero, aparecen como criterios de manejo forestal sustentable destinados a mantener la productividad a lo largo de las rotaciones.



Plantación de Pinus taeda (3 años de edad).



Bosque nativo tomado como línea de base.

### Bibliografía

FERNÁNDEZ, R. A.; LUPI, A. M.; PAHR, N. M.; REIS, H.; O' LERY, H. J. 2000. Técnicas de manejo de residuos de cosecha para el establecimiento forestal y su impacto sobre la condición química de los suelos rojos del noreste de Argentina. Pp. 243-248 en: Avances en Ingeniería Agrícola. Editorial Facultad Agronomía, UBA. Buenos Aires.

FERNÁNDEZ, R. A. 2003. Estrategias para minimizar los impactos de la cosecha forestal. Balance de nutrientes y condición física del suelo. Actas XVII Jornadas Forestales de Entre Ríos, Concordia.

FROEHLICH, H. A. 1984. Mechanical amelioration of adverse physical soil conditions in forestry. Proceeding of Symposium and productivity of fast growing plantations. IUFRO Pretoria. South Africa. 507-521 pp.

GONÇALVES, J. L. M.; BARROS, N. F.; NAMBIAR, E. K. S.; NOVAIS, R. F. 1997. Soil and stand management for short-rotation plantations. Pp. 379-417 en: EKS Nambiar & AG Brown (eds). Management of soil nutrients and water in tropical plantation forest. CSIRO. Canberra.

GOYA, J. F.; PÉREZ, C.; FRANGI, J. L.; FERNÁNDEZ, R. A. 2003. Impacto de la cosecha y destino de los residuos sobre la estabilidad del capital de nutrientes en plantaciones de Pinus taeda L. Ecología austral v.13 n.2. Versión On-line ISSN 1667-782X. Córdoba.

KIMMINS, J. P. 1974. Sustained yield, timber mining, and the concept of ecological rotation; a British Columbian view. Forest. Chron. 50:27-31.

PRITCHET, W. 1986. Suelos Forestales. Propiedades, Conservación y Mejoramiento. Editorial Limusa. 634 pg.

Wei, X.; Liu, W.; Waterhouse, J.; Armleder, M. 2000. Simulations on impacts of different management strategies on long-term site productivity in lodgepole pine forest of the central interior of British Columbia. Forest Ecol. Manag. 133:217-229.

## Ecorregión Mesopotámica

### Provincia de Misiones

SISTEMA PRODUCTIVO: yerbatero

Sebastian E. Barbaro<sup>1</sup>, Miguel A. Taboada<sup>2</sup>, Domingo A. Sosa<sup>1</sup>,  
Bárbara E. Iwasita<sup>1</sup> y Roxana P. Iglesia<sup>3</sup>

SUELOS: Ultisoles

#### Caracterización del agroecosistema e identificación de sus puntos críticos.

La Provincia de Misiones se encuentra ubicada en el extremo nordeste de la República Argentina, el clima es subtropical húmedo, sin estación seca definida. Las lluvias varían entre 1900 y 2000 mm. La temperatura media anual oscila en torno de los 20° C, disminuyendo hacia el este-noreste a causa de la mayor altitud (INTA, 1990). La vegetación nativa se caracteriza por ser una formación pluri-estratificada de selva húmeda, conformada por seis estratos que definen su estructura vertical. También se encuentra una fuerte presencia de Bambúceas, lianas y epífitas. Entre las especies arbóreas más abundantes y características se encuentran: Pino paraná (Araucaria angustifolia), Guatambú (Balfourodendron riedelianum), Cedro misionero (Cedrela fissilis), Loro negro o Peteribi (Cordia trichotoma), Laurel negro (Nectandra megapotamica), Laurel amarillo (Nectandra lanceolata), Caña fistula (Peltophorium dubium), Lapacho negro (Handroanthus heptaphyllus). El desarrollo que alcanza esta selva decrece desde el norte hacia el sur. En su región meridional se encuentra una zona de transición, con vegetación de pastos duros a semiduros asociados a bosques en galerías, que luego deja hacia el sur lugar a la zona de campos (Martínez Crovetto, 1963).

carica angustifolia), Guatambú (Balfourodendron riedelianum), Cedro misionero (Cedrela fissilis), Loro negro o Peteribi (Cordia trichotoma), Laurel negro (Nectandra megapotamica), Laurel amarillo (Nectandra lanceolata), Caña fistula (Peltophorium dubium), Lapacho negro (Handroanthus heptaphyllus). El desarrollo que alcanza esta selva decrece desde el norte hacia el sur. En su región meridional se encuentra una zona de transición, con vegetación de pastos duros a semiduros asociados a bosques en galerías, que luego deja hacia el sur lugar a la zona de campos (Martínez Crovetto, 1963).

1. INTA, Estación Experimental Cerro Azul. Cerro Azul, 3313, Misiones, Argentina.

2. INTA, Instituto de Suelos INTA Castelar, 1686, Hurlingham, Buenos Aires, Argentina.

3. INTA, Estación Experimental Paraná. Oro Verde 3101, Entre Ríos, Argentina.

La yerba mate (YM) es uno de los principales sistemas productivos de la provincia de Misiones. Debido a los requerimientos, la mayoría de las plantaciones están instaladas sobre suelos Ultisoles. Estos son suelos rojos profundos, condición necesaria para el crecimiento de éste tipo de planta. Estos suelos presentan en general buena estructura, un horizonte superficial bien provisto de materia orgánica seguido por un B textural muy profundo (Godagnone & De la Fuente, 2013). Presentan una baja saturación de bases en el perfil, debido principalmente a las condiciones climáticas en que han evolucionado. La mayor parte de la arcilla es caolinita (retículo 1:1), existiendo además un elevado tenor de sesquióxidos que permiten la formación de agregados estructurales muy estables.

YM puede modificar tanto la cobertura del suelo como la calidad del mismo, condicionando directamente los procesos de degradación.



Figura 1: Entre línea de una plantación de YM

La YM es una planta originaria de América del sur que abunda en estado silvestre y en plantaciones cultivadas. En estado silvestre es un árbol, sin embargo, en plantaciones comerciales la altura es mantenida hasta los 3 m aproximadamente con prácticas de podas y cosechas sucesivas. Las labores culturales para el control de las malezas, dependen del marco de plantación, y se realizan en las denominadas "calles" que equivalen a la entrelínea de la plantación (Fig. 1). Actualmente, en el sistema de producción de YM el control de malezas se realiza de la siguiente manera: a) con remoción de suelo, utilizando la rastra de discos común en plantaciones antiguas con marcos 4 x 4 y 4 x 3 m, pero también utilizado hasta el día de hoy en marcos de 3 x 2; b) sin remoción de suelo, ya sea mediante control químico con herbicida o utilizando una desmalezadora o machete. A su vez, dentro de éstos, otra práctica de menor adopción es el uso de abonos verdes (Erracaborde, 1973; Piccolo, 1996; Heredia et al. 2005). El tipo de manejo para el control de malezas que se realice en las plantaciones de

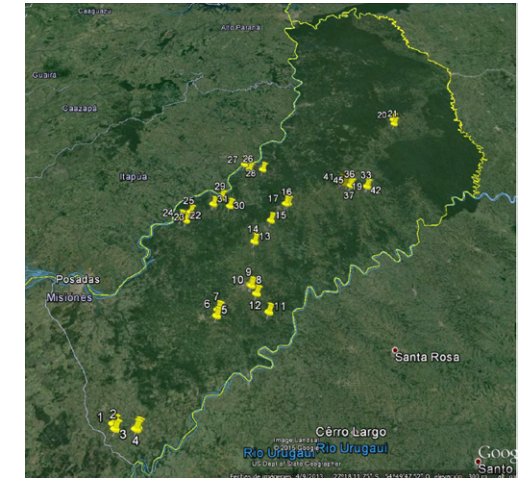
Los Ultisoles como los existentes en la Provincia de Misiones son muy frágiles, si bien pueden poseer adecuada fertilidad natural, las características agresivas del clima subtropical, de relieve con fuertes pendientes (Ligier et al., 1990), predisponen a importantes pérdidas de suelo por procesos erosivos (Erracaborde, 1973; Casas et al., 1983; Piccolo, 1996). El mantenimiento del suelo cubierto es muy importante como medida de protección ante el sobrecalentamiento, la evapotranspiración y la lluvia (Primavesi, 1980). En tal sentido se han señalado como prácticas favorables aquellas que tratan de evitar la remoción del suelo. En éste contexto, se intentó establecer un conjunto mínimo de indicadores (CMD) de calidad física de suelo, que sean suficientemente sensibles para distinguir entre diferentes manejos para el control de malezas en plantaciones de YM.

Se trabajó en 47 parcelas de YM distribuidas a lo largo de la provincia (Fig. 2) ubicadas sobre

Ultisoles, diferenciadas según el manejo para el control de maleza (con o sin remoción de suelos), además también se muestreo la situación prístina (selva). Los indicadores evaluados fueron: carbono orgánico de suelo (COS), densidad aparente (Dap), porosidad total (PT), cambio del diámetro medio ponderado de los agregados (CDMP), resistencia mecánica a la penetración (RM), porcentaje de cobertura (% cob), velocidad de infiltración (Vi). En éste último, se utilizó la metodología del anillo simple (USDA, 1999), sin embargo debido al rápido drenaje de éstos suelos, no se logró medir la infiltración básica, por lo que sólo se estimó la infiltración instantánea. En éste sentido, los datos utilizados fueron la velocidad de infiltración de una columna de agua de 25 mm. Se consideró a su vez como indicador, la calidad cualitativa de la parcela a partir del siguiente criterio de clasificación:

- **Mala:** se observa suelo desnudo, síntomas de escorrentía superficial, plantas de YM de pobre estructura, pocas hojas, color verde claro.
- **Regular:** suelo con algo de cobertura natural, los rasgos de erosión son localizados, el aspecto de la planta de YM es normal.

Figura 2. Distribución de las parcelas de muestreo en la provincia de Misiones.



- **Buena:** suelo con cobertura natural con diversidad de especies, no se observan rasgos de escorrentía de agua, las plantas de YM tienen buena estructura, muchas hojas y el color es verde oscuro.

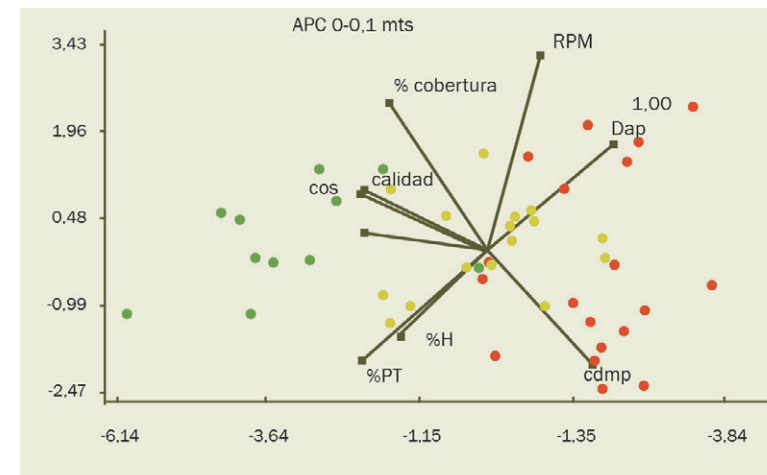


Figura 3. Bi-plot del ACP para los indicadores de calidad de suelo propuestos clasificados por el manejo de suelo para el control de malezas. Los puntos de color verde representan las parcelas de selva, los amarillos son parcelas sin remoción de suelo y los puntos rojos son parcelas con remoción de suelo.

La Fig.3 muestra cómo se correlacionan propiedades físicas como la RM, Dap y el CDMP con los manejos con remoción de suelo. Mientras que % Cob, Calidad cualitativa, COS, Vi y PT se asociaron a situaciones de selva y sin remoción de suelo. En la matriz de correlación (Tabla 1) se observaron las siguientes correlaciones: 70 al 80% se correlacionó la calidad cualitativa con el COS, el

% de cob, la Vi y además el COS y la Dap con la Vi. Con el 60% al 70% se correlacionó la calidad cualitativa con el CDMP y la Dap. El CDMP con el COS y % de cob. La Dap con el COS y el % PT con la Vi. Cada indicador, a su vez, está representado por un autovector que queda definido por la correlación que existe entre la propiedad del suelo y la CP considerada (Tabla 2).

	Calidad	CDMP	%H°	Dap	COS	%PT	RPM	%Cob	Vi
<b>Calidad</b>	1,00								
<b>CDMP</b>	-0,61	1,00							
<b>%H°</b>	0,39	-0,29	1,00						
<b>Dap</b>	-0,60	0,54	-0,55	1,00					
<b>COS</b>	0,76	-0,65	0,49	-0,61	1,00				
<b>%PT</b>	0,59	-0,53	0,55	-1,00	0,59	1,00			
<b>RPM</b>	-0,33	-0,02	-0,26	0,39	-0,14	-0,39	1,00		
<b>%Cob</b>	0,76	-0,60	0,32	-0,33	0,58	0,32	-0,07	1,00	
<b>Vi</b>	0,80	-0,53	0,38	-0,70	0,72	0,69	-0,22	0,54	1,00

**Tabla 2 (arriba):** Matriz de correlación entre los indicadores evaluados

**Tabla 3 (abajo):** Valores de los autovectores e1 y e2 de los indicadores en evaluación.

Variables	e1	e2
Calidad cualitativa	-0,39	0,18
CDMP mm	0,32	-0,34
% H° g/g	-0,27	-0,25
Dap Mg/ m3	0,38	0,32
COS g Kg-1	-0,37	0,18
% Poros Totales	-0,37	-0,33
RPM Mpa	0,15	0,59
% Cobertura	-0,30	0,44
Vi segundos	-0,38	0,06

Así, de acuerdo con los valores de los autovectores se preseleccionó: el COS, Vi, Dap, CDMP, Calidad cualitativa y % Cob. Luego se seleccionó una de las dos o más variables que presentaban alta correlación entre sí, eligiendo a la variable seleccionada de acuerdo a la objetividad de la medición y a la facilidad de la determinación. El CMD quedó, por lo tanto, integrado por el COS, CDMP y la Vi.

A su vez, se utilizó una escala con intervalos de referencia, de modo de clasificar la calidad física del suelo mediante los indicadores en: malo, re-

gular, bueno y muy bueno, similar a lo realizado por Sosa (1992), con propiedades químicas en YM. Se realizó una distribución de frecuencias de los valores obtenidos para cada variable y situación, de manera de ubicarlos dentro de los intervalos de referencia propuestos. En la tabla 4 se indican los valores de referencia y con un aste-

risko la clase más frecuente (Frecuencia relativa) de cada indicador. Los valores comprendidos en la clasificación "mala", generalmente fueron de parcelas manejadas con rastra y los valores dentro de la clasificación "muy buena" generalmente son de selva.

Indicador	Unidad	Método	Clasificación			
			Malo	Regular	Bueno	Muy Bueno
<b>COS</b>	g Kg-1	Walkley y Black	< 17*	17-24	24-32	> 32
<b>CDMP</b>	mm	De Boodt y De Leehneer	> 2	2-1,4	1,4-0,8*	< 0,8
<b>VI</b>	seg.	Anillo simple, USDA	>180	180-90*	90-45	< 45
<b>Dap</b>	Mg m-3	Cilindro	> 1,2	1,2-1	1-0,8*	< 0,8
<b>PT</b>	%	Cálculo	< 50	50-60	60-70*	> 70
<b>Cobertura</b>	%	Línea de Intercepción	< 30	30-50	50-75	> 75*
<b>RM</b>	MPa	Penetrometría	> 2	2-1,4	1,4-0,7	< 0,7*

**Tabla 4:** Valores de referencia en intervalos de los indicadores. Con fondo en "color" se señalan los indicadores seleccionados en el CMD.

### Alertas de procesos de degradación y propuestas de manejo

El deterioro físico estructural del suelo tiene implicancias directas en la funcionalidad del sistema "planta-ambiente-suelo". Algunos daños colaterales relacionados a estos tres elementos del paisaje agroecológico son: impactos en el rendimiento de los cultivos, contaminación ambiental y pérdida de suelo. Por ello, en ambientes tan agresivos como los de Misiones la decisión sobre el manejo del suelo y las malezas impacta directamente sobre la sustentabilidad del sistema.

tener el suelo sin laboreo y preferentemente con cobertura viva. En éste sentido, el uso de macheteadora o desmalezadora representa una de las prácticas recomendables para el control de malezas en las plantaciones de YM. De esta forma se mantiene el suelo con cobertura viva, evitando dejar el suelo descubierto y expuesto a la acción del clima, especialmente las lluvias y las altas temperaturas. A su vez, la presencia continua de raíces aporta agentes cementantes para la formación de agregados, mantienen la macroporosidad y el reciclaje de COS y nutrientes, entre otros beneficios.

En base al análisis realizado, se recomienda man-

## Bibliografía

CASAS, R.; MICHELENA, R & LACORTE, S. 1983. Relevamiento de propiedades físicas y químicas de suelos sometidos a distintos usos y manejos en el sur de Misiones y NE de Corrientes. INTA-EEA. Misiones Nota Técnica N° 35.18p.

ERRACABORDE, E.N. 1973. Abonos en Yerba Mate. INTA. Estación experimental agropecuaria Misiones. Informe Técnico N° 19.

GODAGNONE, R. E & DE LA FUENTE, J. C. (editores). 2013. Inventario del recurso suelo del Departamento de L.N. Alem. Buenos Aires, INTA. 160p.

HEREDIA, O.S; PICCOLO, G. A; GIUFFRÉ, L. & PASCALE, C. 2005. Evolución de la fertilidad del suelo en yerbales consociados con abonos verdes. Cerro Azul. Misiones. EEA Cerro Azul, N°89. p13

INTA. 1990. Atlas de Suelos de la República Argentina. Castelar, Buenos Aires.

LIGIER, H; MATTEIO, H; POLO, H & ROSSO, J. 1990. Provincia de Misiones. En Atlas de Suelos de la República Argentina, INTA 1990. 667p.

MARTINEZ CROVETTO, R. 1963. Esquema fitogeográfico de la provincia de Misiones. Bonplandia. T1 (3):171-223.

PÍCCOLO, G.A. 1996. Transformaciones de la materia orgánica en un suelo Laterítico (Misiones, Argentina): I. Distribución del carbono orgánico en fracciones de agregados. XV° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. La Pampa, Argentina.

PRIMAVESI, A. 1980. Manejo ecológico do solo. Nobel. Sao Paulo. 234 p.

SOSA, D. A, 1992. Evaluación de la productividad del cultivo de yerba mate en relación al estado nutricional suelo/planta. In: Curso de capacitación en cultivo de yerba mate. Cerro Azul INTA, p. 61-64.

USDA. 1999. Soil Quality Test Kit Guide. USDA-ARS. SCS.

# Ecorregión Mesopotámica Centro-Sur de Corrientes

SISTEMA PRODUCTIVO: Agrícola puro

María Cristina Sanabria<sup>1</sup> y Juan Pablo Matteio<sup>1</sup>

SUELO: ARGIUDOLES (MOLISOLES)

## Caracterización del agroecosistema e identificación de sus puntos críticos.

Si bien existen diferentes visiones sobre la sustentabilidad de los agroecosistemas, todas ellas coinciden que es necesario mantener o aumentar la productividad sin degradar los recursos naturales y sin comprometer el bienestar de la población. En este sentido, es necesario evaluar si las modificaciones que imprimen los sistemas productivos al funcionamiento edáfico e hídrico, son compatibles con su continuidad a largo plazo.

Se han identificado procesos vinculados al cambio en el uso de la tierra que estarían afectando al suelo y que comprometen la sustentabilidad de los sistemas de producción. Entre ellos, la mayor participación de cultivos agrícolas en las rotaciones.

Es interesante estudiar si la participación de cultivos agrícolas en las rotaciones afectan al suelo y si comprometen la sustentabilidad de los siste-

mas de producción. En el centro-sur de Corrientes, los suelos dominantes son los Argiudoles típicos, siendo la secuencia de cultivos agrícolas más frecuente, la rotación maíz/trigo/soja (M/T/S). Los estudios del efecto de las rotaciones sobre la fertilidad de los suelos en la provincia son escasos, siendo prioritario este conocimiento para establecer propuestas de medidas correctivas a ser aplicadas en los sistemas productivos, en áreas sujetas a cambios en el uso de la tierra.

La Serie de suelo, corresponde a Puesto Colonia, se ubica en relieve normal, posición de loma con pendientes de 0,5 a 1%, la cobertura vegetal está compuesta principalmente por *Paspalum* sp., *Andropogon* sp., *Eringium* y árboles dispersos de *Prosopis* algarroBILLA. El escurrimiento es medio a lento, la permeabilidad moderada-mente lenta y son moderadamente bien drenados. Presenta

1. INTA, Estación Experimental Corrientes 3400. Corrientes, Argentina.



un epipedón mólico, de unos 40 cm., gris muy oscuro a negro, franco arcilloso y de reacción débilmente ácida; a continuación y a través de un horizonte transicional AB, sin cambio textural abrupto se visualiza un horizonte argílico Bt, que se continúa en un horizonte BC, negro a pardo grisáceo oscuro, arcilloso, de reacción neutra. Las concreciones de hierro-manganeso, se observan desde los 38 cm. y la profundidad efectiva llega a cerca de 100 cm.

Son suelos moderadamente a bien provistos en bases de cambio a excepción del potasio, que incrementa entre los 75 y 100 cm. de profundidad. La materia orgánica es medianamente alta, solo en la parte superior del epipedón mólico. Induda-

blemente son suelos aptos para agricultura, aunque con ligeras limitaciones, por ser susceptibles a la erosión hídrica. El uso actual es la ganadería extensiva sobre campo natural y se ubican en la Clase IIe por Capacidad de Uso y el Índice de Productividad es de 44. Se inició la campaña en mayo de 2009 y se finalizó en el año 2011.

**Línea de base:** Se tomó como línea de base el suelo correspondiente al campo natural.

Se evaluaron las propiedades edáficas en 4 repeticiones y a 3 profundidades (0-5 cm, 0-10 cm y 10-20 cm), tomadas en 2 momentos al año (Marzo y Octubre). Se tomaron los datos promedios del monitoreo de tres años consecutivos.

**Tabla 1:** Conjunto mínimo de Indicadores (CMI) para suelos Molisoles bajo sistema agrícola puro (rotación M/T/S). Centro-sur de Corrientes.

pH	Reacción del suelo. Relación suelo-agua: 1:2.5
P	Fósforo disponible (Bray & Kurtz)
Ca	Complejometría con EDTA
M.O.	Materia Orgánica (Walkley y Black).
AU	Agua Útil Membranas de presión.

**Tabla 2 (página siguiente):** Valores umbrales (VU), de referencia (VR) y valores correspondientes a la situación inalterada (In), para el CMI de suelos Molisoles bajo sistema agrícola puro (rotación M/T/S). Centro-sur de Corrientes.

Indicador	Unidad de medida	Método de determinación	In	VR	VU
pH		Potenciométrico	> 5.5	5.1	4.8 (min)
P	Ppm	Bray & Kurtz	2.7	14.0	0.3 (min)
Ca	cmolc kg-1	Complejometría	4.4	4.6	3.1 (min)
M.O.	%	Walkley y Black	3.7	2.8	1.7 (min.)
AU	%	Membranas de presión	13.33	17.87	10.26 (min)

Donde *min* y *máx* indican valores mínimos y máximos requeridos, respectivamente.

### Alertas de procesos de degradación y propuestas de manejo

En líneas generales, se ha observado un efecto positivo de la rotación sobre los niveles de fertilidad del suelo, pero a causa de las aplicaciones de fertilizantes se ha registrado una leve acidificación del suelo, que fue más notable en los primeros 5 cm de profundidad, y un efecto residual de fósforo y leve aumento del contenido de calcio. Sin embargo se observó una disminución del contenido de materia orgánica en suelos sometidos a esta rotación, habiéndose determinado una pérdida de 0.9%

MO con respecto al campo natural, lo que representa 7.3 Tn/ha de Carbono (para una densidad de 1.4 g/cm<sup>3</sup>). Es por esto que se deberían incrementar los niveles de MO, incluyendo en el sistema de rotación, cultivos con mayor aporte de MO al suelo.

Con respecto a las condiciones físicas del suelo, el efecto de los rastrojos derivados de la rotación agrícola se tradujo en mejores niveles de agua útil con respecto a la situación inalterada.



Figura 1. Rastrojo de Maíz.



Figura 2. Soja.

## Bibliografía

CARTER, M.R., GREGORICH, E.G., ANDERSON, D.W., DORAN, J.W., JANZEN, H.H. Y PIERCE, F.J. 1997. Concepts of soil quality and their significance. En Soil quality for crop production and ecosystem health (eds. Gregorich, E.G. y Carter, M.). Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands.

DORAN, J.W. Y PARKIN, B.T. 1994. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Soil Science Society of America, Inc. Special Publication. Number 35. Madison, Wisconsin, USA.

HÜNNEMEYER, J.A., DE CAMINO, R. Y MÜLLER, S. 1997. Análisis del desarrollo sostenible en centroamérica: Indicadores para la agricultura y los recursos naturales. IICA/GTZ. San José, Costa Rica.

ROMIG, D.E., GARLYND, M.J., HARRIS, R.F. Y MCSWEENEY, K. 1995. How farmers assess soil health and quality. J. Soil Water Conservation 50: 229-236.

WILSON M.G., TASI H.A., SASAL M.C., J. CERANA A. E INDELÁNGELO, N. 2008. Condición de suelos en producción. Actualización Técnica Agricultura Sustentable. EEA Paraná. Ediciones INTA. Serie Extensión N° 51. 14-19.

ESCOBAR, E. H.; LIGIER, H. D.; MELGAR, R., MATTEIO, H. Y VALLEJOS, O. 1996. Mapa de suelos de la provincia de corrientes (1:500.000). Área de producción Vegetal y Recursos Naturales, EEA INTA Corrientes.

## Ecorregión Mesopotámica Centro-Sur de Corrientes

SISTEMA PRODUCTIVO: Agrícola específico arrocero bajo riego agua superficial

María Cristina Sanabria<sup>1</sup> y Juan Pablo Matteio<sup>1</sup>

SUELO: ARGIUDOLES VÉRTICOS (MOLISOLES). ARGIUDOLES TÍPICOS (MOLISOLES)

### Caracterización del agroecosistema e identificación de sus puntos críticos.

El arroz es el cultivo de mayor importancia en la provincia de Corrientes, con 87.020 ha cosechadas y una producción de 557.289 Tn, en la campaña 2015/2016. (Asociación Correntina de Plantadores de Arroz). La tecnología de producción y mecanización es comparable a la de los países más avanzados. La región centro sur, principalmente el departamento de Mercedes, concentra la mayor superficie sembrada.

En la Argentina la degradación de los suelos, en menor o mayor proporción, está presente en todas las zonas agrícolas. Las más importantes están vinculadas al riesgo de erosión, la pérdida de materia orgánica y la disminución de la fertilidad natural.

La materia orgánica del suelo es el principal deter-

minante de la actividad biológica, la diversidad, la actividad de la fauna, de los microorganismos, las propiedades químicas y físicas, la agregación, la estabilidad estructural, el incremento de la tasa de infiltración y la capacidad de agua disponible, así como la resistencia contra la erosión hídrica y eólica, mejorando la dinámica y la disponibilidad de los principales nutrientes para las plantas. Muchos investigadores consideran que la materia orgánica determina la fertilidad de los suelos y si se quiere lograr sustentabilidad de los sistemas agrícolas es imprescindible aplicar sistemas de tratamientos en los suelos que mantengan o aumenten la captura de carbono, mediante la formación de compuestos organominerales más o menos estables (Martínez et al. 2003, Ortega, 1985). En la práctica agrícola en algunos cultivos aún se aplican sistemas que provocan una disminución brusca de

1. INTA, Estación Experimental Corrientes. 3400. Corrientes, Argentina.

la captura de carbono en los suelos, provocando fuerte degradación, este es el caso del monocultivo del arroz en muchas áreas de cultivo.

Se ha demostrado que el monocultivo del arroz degrada la fertilidad física y química del suelo. Los suelos con muchos años de agricultura continua, como es el caso del cultivo de arroz, muestran una tendencia a la degradación, principalmente vinculada a las propiedades físicas del suelo, aumentando la densidad aparente y a las propiedades químicas, disminuyendo el contenido de carbono orgánico, y los cationes, especialmente en el horizonte superficial. Orellana, et al. (1994) detectaron que en suelos con actividad agrícola siempre hay una caída del carbono orgánico.

En la zona centro-sur de Corrientes, los suelos dominantes son Argiudoles típicos, de textura arcillosa fina y la principal actividad productiva es el cultivo de arroz bajo riego, siendo frecuente el monocultivo.

**Conjunto Mínimo de Indicadores (CMI) para un suelo Argiudol típico bajo monocultivo de arroz.**

En un establecimiento de la zona de estudio, se inició el monitoreo con un monocultivo de seis años de arroz, y se continuó por tres años consecutivos siguientes, desde el año 2009 al 2011, terminando con un monocultivo de 9 años de arroz, para la obtención del CMI.

El suelo es un Argiudol típico, arcillosa fina, correspondiente a la serie Puesto Colonia. Se tomaron muestras de suelos en dos momentos, antes de la siembra y después de la cosecha, a 0-10 y 10- 20 cm., con cuatro repeticiones. Esta Serie de suelo, cubre alrededor de 15.750 ha. y forma parte de la unidad 86 con 31.000 ha. Se ubica en

relieve normal, posición de loma con pendientes de 0,5 a 1%, la cobertura vegetal está compuesta principalmente por Paspalum sp., Andropogon sp., Eringium y árboles dispersos de Prosopis algarrobilla. El escurrimiento es medio a lento, la permeabilidad moderadamente lenta y son moderadamente bien drenados. Presenta un epipedón mólico, de unos 40 cm., gris muy oscuro a negro, franco arcilloso y de reacción debilmente ácida; a continuación y a través de un horizonte transicional AB, sin cambio textural abrupto se visualiza un horizonte argílico Bt, que se continúa en un horizonte BC, negro a pardo grisáceo oscuro, arcilloso, de reacción neutra. Las concreciones de hierro-manganeso, se observan desde los 38 cm. y la profundidad efectiva llega a cerca de 100 cm.

Son suelos moderadamente a bien provistos en bases de cambio a excepción del potasio, que incrementa entre los 75 y 100 cm. de profundidad. La materia orgánica es medianamente alta, solo en la parte superior del epipedón mólico.

Indudablemente son suelos aptos para agricultura, aunque con ligeras limitaciones, por ser susceptibles a la erosión hídrica. El uso actual es la ganadería extensiva sobre campo natural y se ubican en la Clase IIe por Capacidad de Uso y el Índice de Productividad es de 44.

Para establecer los valores umbrales de los indicadores de suelo, se analizó un suelo Argiudol típico (Serie Puesto Colonia) bajo monocultivo de nueve años de arroz (MC) y se tomó como línea de base a un campo natural ganadero (CN) correspondiente a la misma serie de suelo. Se realizaron las determinaciones químicas de fertilidad global (pH, conductividad, calcio, magnesio, potasio, sodio, fósforo extractable y materia orgánica) y determinaciones físicas como densidad aparente (Dap), estabilidad estructural

y constantes hídricas (Agua útil, Capacidad de campo, y Punto de marchitez permanente).

En la Tabla 1 se presenta el conjunto mínimo de indicadores de calidad de suelo (CMI)

Para cada variable, se tomaron los valores de los datos promedios de 3 años de monitoreos, con 4 repeticiones.

**Tabla 1:** Conjunto Mínimo de Indicadores (CMI) para suelos Molisoles bajo sistema arrocero bajo riego. Centro-Sur de Corrientes.

pH	Reacción del suelo (1:2,5)
Ca	Calcio
MO	Materia Orgánica
P	Aluminio
Dap	Densidad aparente

**Tabla 2:** Valores umbrales (VU), de referencia (VR) y valores correspondientes a la situación inalterada (In), para el CMI de suelos Molisoles bajo sistema arrocero regado. Centro-sur de Corrientes.

Indicador	Unidad de medida	Método de determinación	In	VR	VU
pH	Adimensional	Potenciómetro	> 5.4	4.7	4.5 (min)
P	Ppm	Bray y Kurtz	5.8	4.9	1.1 (max)
CA	cmolc kg-1	Complejometría	4.7	2.2	2.0 (min)
MO	%	Walkley & Black	5.2	2.4	1.2 (min)
Dap	g/cm3	cilindro	1.23	1.35	1.51 (max)

Donde *min* y *max*, indican valores mínimos y máximos requeridos, respectivamente.

### Alertas de procesos de degradación y propuestas de manejo

En líneas generales, en el monocultivo de arroz, se observó una disminución en los niveles de fertilidad del suelo, comparado con el campo natural.

Se obtuvieron diferencias significativas en pH en suelos bajo uso arrocero continuado, fue muy importante el aumento de la acidez, aproximadamente una unidad de pH frente al campo natural. El uso de fertilizantes, favoreció la acidificación de los suelos, acompañados por una fuerte disminución de los niveles de calcio en 2,54 Cmol.Kg<sup>-1</sup>, lo que equivale a 346,13 Kg.ha<sup>-1</sup> de Ca.

En el monocultivo de arroz hubo una disminución del 53.85 % de materia orgánica. El bajo aporte de residuos de este cultivo impactaría negativamente no solo en el balance de carbono del mismo, sino que lo haría aún más susceptible a la degradación. En consecuencia, la combinación de monocultivo de arroz con su bajo aporte de residuos y suelos susceptibles a la compactación generaría una situación que puede afectar la productividad del sistema y que debería ser tenida en cuenta al momento de planificar el manejo del mismo. Una alternativa al monocultivo sería la inclusión de gramíneas en la rotación que aporten una mayor masa de residuos.

Se observó un aumento de la densidad aparente en el monocultivo, en los primeros 10 cm., lo que aumentaría la resistencia mecánica del suelo a la penetración, con efectos adversos sobre el crecimiento radical y una disminución de la velocidad de infiltración del agua.

Para mejorar la calidad de estos suelos sometidos a monocultivo de arroz de forma sustentable, sería recomendable realizar rotaciones con pasturas.



Figura 1: Campo Natural como línea de base.



Figura 2: Residuos de cultivo de arroz.

### Bibliografía

AGOSTINI, M. A.; STUDDERT, G. A. y DOMINGUEZ, G. F. 2010. Cambios en algunas propiedades físicas de un suelo del sudeste Bonaerense asociados a distintos sistemas de cultivos. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario.

DE LEENHEER and DE BOODT. 1958. Determination of aggregate stability by the Change in mean weight diameter. Proceedings of the International Symposium Soil Structure Ghent. Belgique. Pag 290 - 300.

ESCOBAR, E. H.; LIGIER, H. D.; MELGAR, R., MATTEIO, H. y VALLEJOS, O. 1996. Mapa de suelos de la provincia de corrientes (1:500.000). Área de producción Vegetal y Recursos Naturales, EEA INTA Corrientes.

MON, R.; SANTANATOGLIA, O. y DE SARDI, M. E. B. 1986. Variaciones de las propiedades físicas de un suelo de Boedenave. Revista de la Ciencia del suelo. Vol N° 2.

ORELLANA, J. A.; M. A. PILATTI. 1994. La estabilidad de agregados como indicador edáfico de sostenibilidad. Ciencia del Suelo 12:75-80.

WILSON M. G.; TASI H. A.; SASAL, M. C.; J. CERANA A. y N. INDELÁNGELO. Condición de suelos en producción. INTA EEA Paraná. Agricultura Sustentable Serie Extensión 51: 14-19.

BACIGALUPPO, S., BODRERO, M. y SALVAGIOTTI. Producción de soja en rotación vs monocultivo en suelos con historia agrícola prolongada. F. EEA INTA Oliveros.

<http://www.acpaarrozcorrientes.org.ar/Paginas/INFORME-2015-16.pdf>

## Ecorregión Mesopotámica Corrientes

SISTEMA PRODUCTIVO: Mixto (Forestal– Ganadero)

María Cristina Sanabria y Juan Pablo Matteio<sup>1</sup>

SUELOS: Psamacuents spódicos (Entisoles)

### Caracterización del agroecosistema e identificación de sus puntos críticos.

La región mesopotámica posee un gran potencial forestal y es considerada como la principal zona de bosques cultivados del país. La provincia de Corrientes participa con un 35% de la superficie forestada del territorio argentino, alcanzando un total de 430.000 hectáreas, es la provincia argentina con mayor superficie de bosques implantados. La mayor parte de las tierras incorporadas a la actividad forestal estaban dedicadas al uso agrícola-ganadero. Las especies de mayor interés son: *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna*, *Pinus elliotti*, *Pinus taeda* y *Pinus caribea* var. *Hondurensis*.

El acelerado desarrollo forestal que se observa en la región, que incluye cultivos forestales inten-

sivos, exige la conservación y mejoramiento de la capacidad productiva de los sitios. Para ello, se debe tener en cuenta que el suelo y el clima son factores que determinan la productividad potencial natural del sitio, capacidad que puede ser parcialmente modificada utilizando prácticas de manejo de suelos, como métodos de labranza diferenciados y programas de nutrición forestal adecuados para cada sitio.

Los suelos corresponden a la serie Chavarría (Psamacuents spódicos), comprendido en la región de Lomadas Puelchenses. Gran Paisaje: Planicies, lomas arenosas y depresiones circulares y longitudinales, constituye una de las Series de suelos de mayor distribución y superficie dentro de la

1. INTA, Estación Experimental Corrientes 3400. Corrientes, Argentina.

provincia. Se ubica en relieve normal, en posición de media loma a media loma baja, con pendientes de 1 a 1,5%, en planicies arenosas pardo amarillentas. El tapiz vegetal está compuesto por pajonales de *Andropogon lateralis*, acompañado de *Axonopus* sp., *Schizachirium* sp., *Sporobolus* sp. y otros de hábitos húmedos como ciperáceas y centella. El escurrimiento es lento a medio, la permeabilidad moderadamente lenta y el drenaje es imperfecto a moderado.

Presenta un horizonte ócrico, arenoso-franco, seguido de un Eb, albico, de colores claros, arenoso, con abundantes moteados, sobrepuesto a un argílico, enterrado (Btbg), franco-arcillo-arenoso, de lenta permeabilidad. Se destaca un cambio textural abrupto entre ambos horizontes, que dificulta la entrada del agua, produciéndose una falsa napa de agua que fluctúa hasta cerca de la superficie, con movimientos laterales por el Ebg, ocasionando erosión subsuperficial. Esta napa freática generalmente está unida a numerosas lagunas circulares que existen en este ambiente. La profundidad efectiva generalmente

pH	Potencial Hidrógeno
Ca	Calcio
MO	Materia Orgánica
AL	Aluminio
Da	Densidad aparente
AU	Agua útil

**Tabla 1:** Conjunto Mínimo de Indicadores (CMI) para Entisoles bajo sistema mixto forestal - ganadero. Corrientes.

es coincidente con el techo de la napa colgante (50-60 cm.)

Son suelos de muy baja fertilidad, con escaso tenor de materia orgánica, bajo contenido de bases de cambio y C.I.C, debilmente ácidos y de pobre retención de humedad en los horizontes superiores. Presentan muy severas limitaciones que restringen la elección de plantas y requieren un manejo cuidadoso. Las principales limitantes se refieren al exceso de humedad con sobresaturación por tiempos prolongados, además de su baja fertilidad natural. El uso actual es la ganadería extensiva, no obstante es utilizado para forestación y agricultura, con los consiguientes riesgos, si no se mejoran las condiciones de drenaje y fertilidad. Se ubica en la Clase IVw y el Índice de Productividad es de 16.

Para la identificación de indicadores de calidad edáfica, se realizaron muestreos de suelos en la localidad de Concepción, provincia de Corrientes, pertenecientes a una empresa forestal, se evaluó una plantación de pinos (*Pinus taeda*) con fecha de plantación en el año 2001. Se tomaron muestras de suelos a tres profundidades: 0-10 cm, 10-20 cm y 20-50 cm, con 4 repeticiones. El monitoreo se inició en el año 2009 y terminó en el 2011.

El sistema productivo relevante de la empresa es la forestación con pinos y ganadería extensiva (cría) en áreas de campos naturales y en las forestaciones mismas.

Se evaluó una plantación de *Pinus taeda* de 8 años de antigüedad, con fecha de plantación en el año 2001.

**Tabla 2:** Valores umbrales (VU), de referencia (VR) y valores correspondientes a la situación inalterada (In), para el CMI de Entisoles bajo sistema mixto (forestal-ganadero). Corrientes.

Indicador	Unidad de medida	Método de determinación	In	VR	VU
pH	-	Potenciómetro (1:2,5)	5,7	4,7	4,5 (min)
Ca	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	Complejometría	0,6	0,4	0,20 (min)
M.O.	%	Walkley y Black	1,3	0,6	0,3 (min)
Al	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	Titulación (NaOH)	0,2	0,50	0,70 (max)
Da	gcm <sup>-3</sup>	Cilindro	1,33	1,33	1,5 (max)
AU	%	Membranas de presión	3,3	0,7	0,5 (min)

Donde *min* y *max*, indican valores mínimos y máximos requeridos, respectivamente.

### Alertas de procesos de degradación y propuestas de manejo

En plantaciones de *P. taeda* se observó en líneas generales una disminución de la fertilidad de los suelos con respecto a la línea de base.

Las variables más sensibles a estos cambios fueron: el pH, con un aumento de la acidez en las plantaciones, los cationes en líneas generales no expresaron cambios y el Aluminio, aumentó un 50% en las plantaciones de pinos. Se observó una tendencia a la disminución de materia orgánica del suelo en plantaciones de pino, frente al pastizal natural.

Durante las etapas de crecimiento de la forestación, los nutrientes del suelo son tomados de manera selectiva, por lo tanto se debería contemplar la fertilización de reposición para que en el

próximo ciclo forestal, la nutrición de base no sea limitante para la producción. Algo similar ocurre con el stock de carbono orgánico en el suelo, que disminuye a medida que la forestación crece, más allá de la captura de C en la biomasa vegetal. Dentro de las propiedades físicas se destaca una tendencia a la mayor densificación superficial en forestales, lo que parece ser influida por el desarrollo de raíces y la falta de cobertura vegetal de porte herbáceo.

El agua de fuentes naturales no presentó restricciones físico-químicas y se categorizaron como aptas tanto para consumo animal, como para riego. No se detectaron contaminantes provenientes de agrotóxicos en ningún caso.

## Bibliografía

JAMES A. BURGER AND DANIEL KELTING. 1999. Using soil quality indicators to assess forest stand management. *Forest Ecology and Management* 122 155-166.

S.H. SCHOENHOLTZA, H. VAN MIEGROETB, J.A. BURGERC. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities.

Department of Forestry, Mississippi State University, P.O. Box 9681, Mississippi State, MS 39762, USA.

ESCOBAR, E. H.; LIGIER, H. D.; MELGAR, R., MATTEIO, H. Y VALLEJOS, O. 1996. Mapa de suelos de la provincia de corrientes (1:500.000). Área de producción Vegetal y Recursos Naturales, EEA INTA Corrientes.

<http://neacorrientesforestal.blogspot.com.ar/p/informacion-tecnica.html>

<http://cfi.org.ar/wp-content/uploads/2015/02/informe-industria-forestal-pdf.pdf>

## Ecorregión Mesopotámica Centro-Norte de Entre Ríos

**SISTEMA PRODUCTIVO:** Ganadero agrícola del área de bosques nativos

Marcelo Germán Wilson<sup>1</sup>, María Carolina Sasal<sup>1</sup>, Emmanuel Gabioud<sup>1</sup>, Néstor Garcarena<sup>1</sup>, Silvana Sione<sup>2</sup>, José Oszust<sup>2</sup>, Dante Bedendo<sup>1</sup>, Hugo Tasi<sup>1</sup> y Antonio Paz González<sup>3</sup>

**SUELOS:** Peludertes - Hapludertes (Vertisoles), Argiudoles (Molisoles) y Ocracualfes (Alfisoles)

### Caracterización del agroecosistema e identificación de sus puntos críticos.

El área presenta un clima de tipo subhúmedo-húmedo, con un régimen pluviométrico de 1100 mm anuales, temperaturas medias anuales inferiores a 20° C y amplitudes térmicas entre 13° C y 14° C (Plan Mapa de Suelos, 1990). Pertenece a la provincia fitogeográfica del Espinal, distrito Ñandubay (Dominio Chaqueño). La vegetación está caracterizada por bosques semixerófilos dominados por ñandubay (*Prosopis affinis*) y espinillo (*Acacia caven*), acompañados por algarrobo negro (*Prosopis nigra*), quebracho blanco (*Aspidosperma quebra-*

cho-blanco) y tala (*Celtis ehrenbergiana*), entre otros (Cabrera, 1976). Son bosques abiertos, con un estrato arbóreo bajo, menor a 6 m. Los suelos son predominantemente Alfisoles, Vertisoles y Molisoles. Se encuentran tierras aptas para planteos productivos en rotación ganadero-agrícolas y agrícola-ganaderos. No obstante la mayor superficie presenta aptitud ganadera, considerando al uso agrícola con riesgos de erosión hídrica y serias limitaciones para un uso continuado. El sistema de uso predominante ha sido el ganadero de cría en base al campo natural bajo monte nativo. Los bos-

1. INTA, Estación Experimental Paraná. Oro Verde, 3101, Entre Ríos, Argentina.

2. UNIV. NACIONAL DE ENTRE RÍOS, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Oro Verde 3101, Entre Ríos, Argentina.

3. UDC Facultad de Ciencias, Universidade da Coruña, A Zapateira s/n. (15071) A Coruña, Spain

ques nativos constituyen la base productiva de los establecimientos agropecuarios ganaderos. Sin embargo, el área no escapa al fenómeno de cambio en el uso de la tierra que se ha registrado en los últimos años en la mayor parte de las regiones húmeda y subhúmeda, dado a través de la conversión de ecosistemas naturales a cultivados y la simplificación de los esquemas de rotaciones en tierras agrícolas, con tendencias al monocultivo de soja. En tal sentido, en los últimos años se ha incrementado la superficie destinada a la agricultura, recurriendo a la práctica del desmonte, en la mayoría de los casos sin planificación previa del uso y manejo del suelo (Wilson, 2007), lo que conlleva serios riesgos de erosión hídrica y encharcamiento en aquellas tierras incorporadas a la actividad agrícola, dado principalmen-

te por una reducción en la cobertura vegetal y por la degradación de la estructura del suelo. El conjunto mínimo de indicadores (Tabla 1) se obtuvo mediante la aplicación de análisis de componentes principales para 3 suelos diferentes a nivel de Gran Grupo (Argiudoles, Peludertes y Ocracualfes), mientras que los valores umbrales y de referencia fueron establecidos a partir del análisis de una base de datos conformada con información proveniente de 146 lotes de productores (58 Molisoles, 48 Vertisoles y 40 Alfisoles). Para detectar la sensibilidad de cada variable en relación al uso (Tabla 2), se priorizó el grado de ajuste entre la variable y los años (por medio del R2 y la significancia), además se tuvo en cuenta la pendiente relativa dado que la variable más sensible es la que mayor cambio presenta por cada año de uso agrícola.

**Tabla 1:** Conjunto Mínimo de Indicadores (CMI) para suelos Argiudoles, Peludertes y Ocracualfes con sistema agrícola – ganadero del área de bosques nativos de Entre Ríos (centro-norte).

ARGIUDOLES	PELUDERTES	OCRACUALFES
Carbono Orgánico total	Carbono Orgánico total	Carbono Orgánico total
Agregados estables al agua*	Agregados estables al agua*	Agregados estables al agua*
pH Reacción del suelo	pH Reacción del suelo	pH Reacción del suelo
Porosidad Total	Porosidad Total	Porosidad Total
Cap. Intercambio Catiónico	Cap. Intercambio Catiónico	Carbono Biom. Microbiana
		Nitrógeno Potencialmente mineralizable

\* en el caso de los agregados estables al agua, el indicador que se toma es relativo a la situación inalterada (Agregación relativa).

Se tomaron muestras superficiales de suelo (capa de 00-12 cm). En la Tabla 2 se presenta el valor de la situación inalterada (In): bosque nativo sin uso ganadero o con muy baja carga animal, mientras que los valores de referencia (VR) representan los límites necesarios para garantizar el mantenimiento de la productividad a largo plazo

y por ende la sustentabilidad del sistema. Por otra parte se establecieron los valores umbrales admisibles (VU), valor a partir del cual el recurso suelo puede verse comprometido en sus funciones y procesos si continua el uso en el largo plazo, por lo que se requiere una intervención de manejo, que restituya la calidad.

Los valores In, VR y VU fueron establecidos a partir del análisis de la base de datos. Los In representan los valores promedios para dicha si-

tuación, mientras que VU representa el valor del indicador cuando en la rotación, el componente agrícola es mayor al 60%.

**Tabla 2:** Valores umbrales (VU), de referencia (VR) y valores correspondientes a la situación inalterada (In), para el CMI de Argiudoles (a), Peludertes (b) y Ocracualfes (c) bajo sistema agrícola ganadero, área bosques nativos. Centro-norte de Entre Ríos.

ARGIUDOLES					
Indicador	Unidad de medida	Método de determinación	In	VR	VU
<b>COT</b>	%	Walkley y Black	> 3,5	2,9	1,9
<b>PT</b>	%	Cálculo	> 55,8	51,4	49,0
<b>Agr rel.</b>	%	Hénin Le Bissonnaiss	> 52,7% > 2,37 mm	81,0	55,0
<b>pH</b>	adimensional	Potenciométrico (solución 1:2.5)	6,06	5,60	5,63
<b>CIC</b>	cmolc kg-1	Acetato de amonio a pH 7	> 33,5	30,5	29,1

PELUDERTES					
Indicador	Unidad de medida	Método de determinación	In	VR	VU
<b>COT</b>	%	Walkley y Black	> 4,0	2,8	2,2
<b>PT</b>	%	Cálculo	> 55,0	50,5	47,4
<b>Agr rel.</b>	%	Hénin Le Bissonnaiss	> 73,9% > 2,72 mm	66,2	44,0
<b>pH</b>	adimensional	Potenciométrico (solución 1:2.5)	6,90	6,97	6,79
<b>CIC</b>	cmolc kg-1	Acetato de amonio a pH 7	> 35,0	31,6	28,4



OCRACUALFES					
Indicador	Unidad de medida	Método de determinación	In	VR	VU
<b>COT</b>	%	Walkley y Black	> 3,2	2,8	2,0
<b>PT</b>	%	Cálculo	> 52,0	50,4	47,4
<b>Agr rel.</b>	%	Hénin Le Bissonnaiss	> 45,6% > 1,86 mm	72,8	54,8
<b>pH</b>	adimensional	Potenciométrico (solución 1:2,5)	6,35	6,25	6,09
<b>CBM</b>	µg g <sup>-1</sup>	Jenkinson y Powlson	906,6	689,5	578,0
<b>NPM-IA</b>	µg g <sup>-1</sup>	Waring y Bremmer incub anaeróbica	89,1	48,5	28,6

Donde el indicador Agr rel (Agregación relativa) indica el valor de la situación inalterada obtenido por las metodologías de Hénin (pretratamiento al agua) y Le Bissonnaiss (pretratamiento capilaridad), respectivamente; VR y VU indican el valor relativo a la situación inalterada de Agr estables al agua, cualquiera sea el método.

### Alertas de procesos de degradación y propuestas de manejo

La pérdida de materia orgánica con la intensificación del uso condicionó la performance de los indicadores analizados. Otro aspecto a destacar fue la compactación del suelo, que se reflejó en el aumento de la densidad del suelo, observándose además la pérdida de porosidad total (especialmente en sistemas basados en la ganadería y agricultura de secano).

Los indicadores seleccionados, además de ser útiles para el monitoreo de la calidad del suelo, brindan información necesaria para el diseño de sistemas productivos sustentables. Rotaciones que incluyan pasturas en alta proporción son recomendables, especialmente en Alfisoles y Vertisoles. Los Alfisoles mostraron un impor-

tante deterioro del recurso al presentar desde la condición inalterada alta susceptibilidad. Estos suelos, que son condicionalmente aptos para la agricultura y presentan muy bajos índices de productividad, mostraron a través de los indicadores alta sensibilidad al deterioro.

La protección del suelo brindada por el bosque nativo es de fundamental importancia para mantener su capacidad productiva, permitiendo desarrollar un uso sustentable basado en la ganadería.

Según la Reglamentación vigente y considerando lo establecido por FAO (2006), se debe mantener como reserva de biodiversidad como mínimo el

25% de la superficie de los establecimientos agropecuarios. Con este criterio, y teniendo en cuenta la calidad de los suelos, la superficie con bosques nativos oscilará entre 25% y 100%. Además, se debería concretar la conectividad de los bosques nativos entre establecimientos para lograr su preservación a escala regional.

Por todo lo expuesto se considera al bosque nativo como la base de los sistemas productivos en planteos sustentables para el área de estudio, requiriéndose además que aquellos lotes ya desmontados o a desmontar contemplen un uso agrícola y/o ganadero de acuerdo a su capacidad productiva y a sus limitantes.

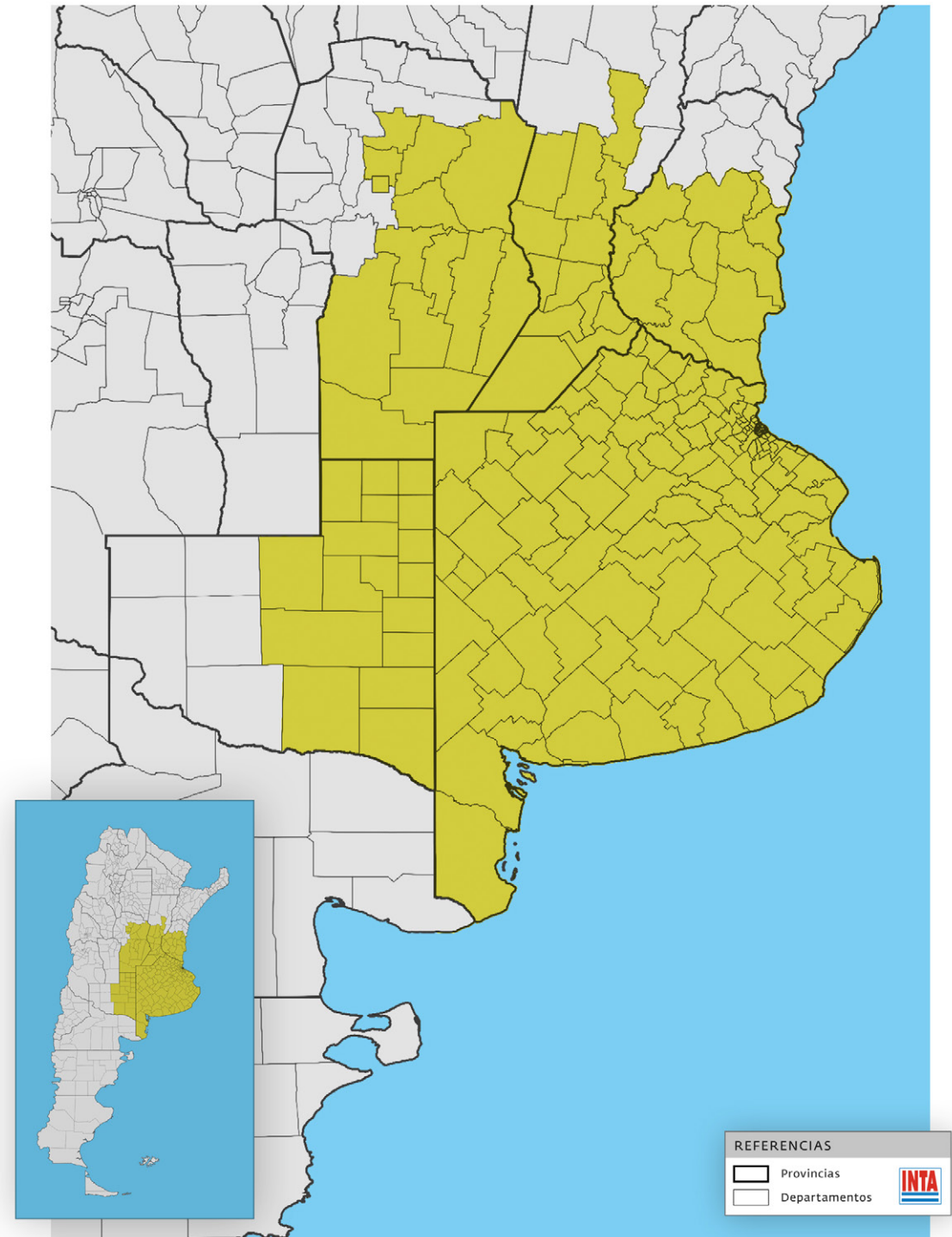
### Bibliografía

FAO (2006). Bosques y otras Tierras arboladas. Cumbre Mundial sobre la Alimentación. Roma, 13-17 de noviembre de 1996. p. 14.

PLAN MAPA DE SUELOS, CONVENIO INTA GOBIERNO DE ENTRE RÍOS. 1990. Carta de Suelos de la República Argentina, Departamento La Paz, Provincia de Entre Ríos. Tomos I y II. Memoria técnica y apéndice, con Mapa de suelos y vegetación natural a escala aprox. 1:100.000. EEA Paraná, Serie Relevamiento de Recursos Naturales N° 7 (ISSN 0325 9099), 321 pp.

WILSON MG. 2007. Uso de la Tierra en el área de bosques nativos de Entre Ríos, Argentina. Tesis Doctoral. Universidad de la Coruña, España. 277 p.

# Ecorregión Pampeana



## Ecorregión Pampeana Centro-Este de Entre Ríos

**SISTEMA PRODUCTIVO:** Agrícola específico arrocero regado con agua de origen subterráneo

Marcelo Germán Wilson<sup>1</sup>, Juan José De Battista<sup>2</sup>, Jorge Alberto Cerana<sup>3</sup>, Silvana Sione<sup>3</sup>

**SUELOS:** Peludertes - Hapludertes (Vertisoles)

### **Caracterización del agrosistema e identificación de sus puntos críticos.**

El sistema de producción de arroz regado con agua de origen subterráneo en Entre Ríos, se desarrolla en la Ecorregión Pampeana aunque involucre parte de Departamentos de la Ecorregión Mesopotámica. Se realiza especialmente sobre suelos Vertisoles, con alta proporción de arcillas expandibles y requiere de grandes volúmenes de agua para el mantenimiento de una lámina de riego permanente durante un período prolongado (Plan Mapa de Suelos, 2000). El arroz, dadas sus características de especie semiacuática, necesita de condiciones de suelo inundado durante gran parte de su desarrollo. El manejo tradicional del cultivo en la provincia consiste en

regar a los 25-30 días de la siembra utilizando el método de riego por inundación entre bordos de contención a niveles conocidos, como "taipas". Se aplica una lámina constante de agua que varía, de acuerdo al ciclo, entre 5 y 12 cm, por un período prolongado, a partir del cual se drena el lote previamente a la cosecha. Ello representa la incorporación de aproximadamente 1000 mm anuales de agua de riego, reportándose casos de reducciones de consumos que oscilan entre el 20 al 30%. El agua subterránea utilizada para el riego es bicarbonatada sódica, presentando a su vez, un desequilibrio entre la RAS (relación de adsorción de sodio) y la salinidad, lo que provoca

1. INTA, Estación Experimental Paraná. Oro Verde, 3101, Entre Ríos, Argentina.

2. INTA, Estación Experimental Concepción del Uruguay. Concepción del Uruguay, 3260, Entre Ríos, Argentina.

3. Universidad Nacional de Entre Ríos, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Oro Verde 3101, Entre Ríos, Argentina.

la dispersión de los coloides del suelo, hecho que se acentúa cuando predominan arcillas montmorillonitas, magnificándose los síntomas de sodificación (Cerana et al., 2006). El exceso de tránsito y laboreo, que tiene como finalidad buscar un tamaño reducido de agregados para facilitar las tareas de nivelación del lote y construcción de tapias, le otorga características distintivas al sistema de producción de arroz respecto de otros cultivos y que tienen efectos negativos para el uso sostenible del recurso. Asimismo, el suelo se ve afectado por las operaciones de cosecha al realizarse

bajo condiciones de saturación hídrica del perfil, utilizando maquinarias muy pesadas, lo que provoca el deterioro de la estructura del suelo.

El conjunto mínimo de indicadores (Tabla 1) se obtuvo mediante la aplicación de análisis de componentes principales, mientras que los valores umbrales y de referencia fueron establecidos a partir del análisis de una base de datos conformada con información proveniente de más de 80 lotes de productores (Wilson et al., 2006a).

**Tabla 1:** Conjunto Mínimo de Indicadores (CMI) para suelos Vertisoles bajo sistema arrocero regado con agua de origen subterránea. Centro-este de Entre Ríos.

<b>COT</b>	Carbono Orgánico total
<b>CSI</b>	Contenido de sodio de intercambio
<b>Agr</b>	Agregados estables al agua
<b>Ks</b>	K de Percolación
<b>pH</b>	Reacción del suelo
<b>CEE</b>	Conductividad eléctrica del extracto de saturación

**Tabla 2:** Valores umbrales (VU), de referencia (VR) y valores correspondientes a la situación inalterada (In), para el CMI de suelos Molisoles bajo sistema agrícola puro (rotación M/T/S). Centro-sur de Corrientes.

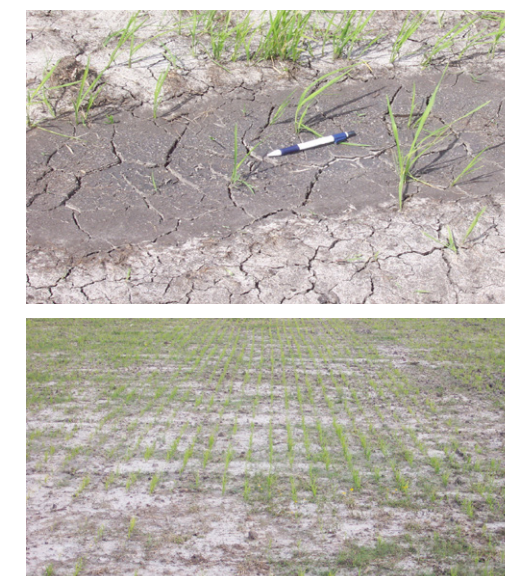
Indicador	Unidad de medida	Método de determinación	In	VR	VU
<b>COT</b>	%	Walkley y Black	> 4,0	2,3	1,6 (mín)
<b>CSI</b>	cmolc kg-1	Fotometría de llamas	< 0,5	0,5	1,4 (máx)
<b>Agr</b>	%	Hénin	62,0	45,0	38,0 (mín)
<b>Ks</b>	cm h-1	Hénin	> 25,0	16,5	6,0 (mín)
<b>pH</b>	adimensional	Potenciométrico (solución 1:2.5)	6,5	7,4	5,3 (mín)
<b>CEE</b>	µS cm-1	Conductímetro	< 600	1200	3000 (máx)

El mayor uso arrocero en suelos regados con agua de origen subterráneo se tradujo en frecuentes problemas de implantación de los cultivos por el encostramiento. Cuando el arroz participa en una alta proporción de las rotaciones, se observa en el suelo la disminución en el contenido de carbono orgánico total y de nitrógeno. Los índices de estabilidad estructural, reflejaron claramente dicho efecto. Estos índices dan cuenta de los dos procesos de degradación de la estructura. Por una parte, la pérdida de estabilidad de los agregados (debido a la oxidación y mineralización de la materia orgánica que contribuyen además al aumento de los gases de efecto invernadero) por los múltiples laboreos y de cosecha asociados al cultivo de arroz y por otro lado, la dispersión de los coloides provocada por el aumento del sodio intercambiable y originada por el agua de riego utilizada.

Estos índices fueron muy sensibles y mostraron que la participación del arroz en menos del 20% en la rotación, no produjo deterioros significativos en la calidad del suelo, respecto a lotes agrícolas sin arroz. En el mismo sentido, mediciones al cuarto año en un ensayo en que se compararon diferentes rotaciones agrícolas con arroz y con una pastura, la inestabilidad de agregados aumentó con el uso agrícola, y principalmente con la intensidad de uso arrocero, debido a las razones explicadas anteriormente (De Battista, 2004; De Battista et al., 2014). En ese ensayo, a los 8 años en las rotaciones agrícolas el contenido de MOS fue un 20 % inferior que en la rotación arroz-pastura lo que representa una pérdida de 8 tn de C/ha en el horizonte Ap efecto confirmado por los indicadores biológicos carbono y nitrógeno de la biomasa microbiana y nitrógeno mineralizable que mostraron diferencias significativas entre arroz-pastura y las rotaciones agrícolas (De Battista et al., 2008).

### Alertas de procesos de degradación y propuestas de manejo

El manejo del sistema arrocero en Peludertes con riego a partir de agua de origen subterráneo debería perseguir dos premisas básicas para lograr la sustentabilidad de este sistema: 1) incrementar los tenores de materia orgánica y 2) reducir los ingresos de sodio al complejo de cambio. Para ello, una rotación que incluya 50% a 60% de pasturas y 40 a 50% de agricultura con una participación del arroz inferior al 20 a 25%, sería lo más aconsejable. Considerar la posibilidad del manejo de la calidad del agua, tal como la utilización de agua de origen superficial (de ríos, arroyos o embalses) o mezcla de ésta con agua de origen subterráneo (Wilson et al., 2006b). En lotes degradados, la utilización de enmiendas químicas, como el uso del yeso agrícola en dosis medias a altas (más de 3000 kg ha-1) ha dado muy buenos resultados.



**Figura 1.** Problemas de implantación de los cultivos por el encostramiento a nivel superficial en lotes con alta participación del cultivo de arroz en la rotación, regado con agua de origen subterráneo

## Bibliografía

CERANA, J.; WILSON, M.; DE BATTISTA, J.J.; NOIR, J. Y C.E. QUINTERO. 2006. Estabilidad estructural de los Vertisoles en un sistema arrocerero regado con agua subterránea. Revista de Investigaciones Agropecuarias RIA. 35 (1): 87-106.

DE BATTISTA, J.J. 2004: Manejo de Vertisoles de Entre Ríos. Revista Científica Agropecuaria 8 (1): 37-43.

DE BATTISTA, J.J. ; BENINTENDE, M. ; BENINTENDE, S. ; ARIAS, N. ; WILSON, M. ; CERANA, J. ; RODRÍGUEZ, H. Y MULLER, H. 2008. Efecto de las rotaciones sobre la calidad de suelos arroceros de Entre Ríos. Agricultura Sustentable – Actualización Técnica. Serie Extensión n° 51 pp 31-35. Estación Experimental Agropecuaria Paraná ISSN 0325 – 8874.

DE BATTISTA, J.J. ; RODRÍGUEZ, H. Y N. ARIAS. 2014. Calidad de suelos en la zona arrocerera núcleo de Entre Ríos. Anales del XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca, Argentina. 5 p.

PLAN MAPA DE SUELOS, CONVENIO INTA GOBIERNO DE ENTRE RÍOS. 2000. Carta de Suelos de la República Argentina. Departamento Villaguay, Provincia de Entre Ríos. Memoria Técnica, un Mapa de suelos a escala aprox. 1:100.000 y 19 mapas temáticos a color. Acuerdo Complementario del Convenio INTA - Gobierno de Entre Ríos, EEA Paraná, Serie Relevamiento de Recursos Naturales N° 19, (ISSN-0325-9099), 242 pp.

WILSON, M.G. Y C. BANCHERO. 2006a. Calidad del suelo. Efectos del uso arrocerero. En El arroz. Su cultivo y sustentabilidad en Entre Ríos. Editorial Universidad Nacional de Entre Ríos y Ediciones de la Universidad Nacional del Litoral. Director de obra René Benavidez. Tomo II. 667-672. ISBN 950-698-167-1.

WILSON, M.G.; SIONE, S.M. Y R. BENAVIDEZ. 2006b. Introducción a los criterios de sustentabilidad del sistema de producción de arroz en Entre Ríos. En El arroz. Su cultivo y sustentabilidad en Entre Ríos. Editorial Universidad Nacional de Entre Ríos y Ediciones de la Universidad Nacional del Litoral. Director de obra René Benavidez. Tomo II. 653-665. ISBN 950-698-167-1.

## Ecorregión Pampeana Centro-Sur de Buenos Aires

SISTEMA PRODUCTIVO: Agrícola mixto y agrícola puro

Natalia Carrasco<sup>1</sup> y Martín Zamora<sup>1</sup>

SUELOS: Paleudoles y Hapludoles (Molisoles)

### Caracterización del agroecosistema e identificación de sus puntos críticos.

En la Ecorregión Pampeana, el centro sur de la provincia de Buenos Aires pertenece a la zona mixta cerealera, donde se desarrollan sistemas de producción predominantemente agrícola y agrícola-ganadero. Los principales cultivos son trigo, cebada, soja y girasol. La actividad ganadera más importante es la bovina de ciclo completo, siguiendo la cría e invernada. Los recursos forrajeros más utilizados son las pasturas base alfalfa, verdes de invierno y verano, reservas forrajeras derivadas de ellos y granos.

La zona se encuentra bajo un régimen hídrico sub-húmedo. La precipitación media anual es de 840 mm. La temperatura media anual es de 14,9°C; la temperatura media del mes más cál-

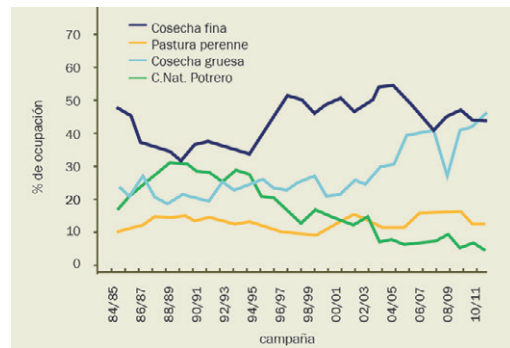
do, 22.8 °C (enero) y la del mes más frío, 7.6°C (julio).

Los suelos típicos de la zona son Paleudoles y Hapludoles, pertenecientes a las series Tres Arroyos, Azul y Ochandio, de textura franca en su capa arable, con niveles de materia orgánica entre 3 y 6%, ubicándose en los rangos de medio a alto contenido, con niveles bajos a muy bajos de contenido de P extractable (menos de 11 ppm), y con un pH subácido a neutro, es decir que solo excepcionalmente podría afectar el crecimiento de los cultivos.

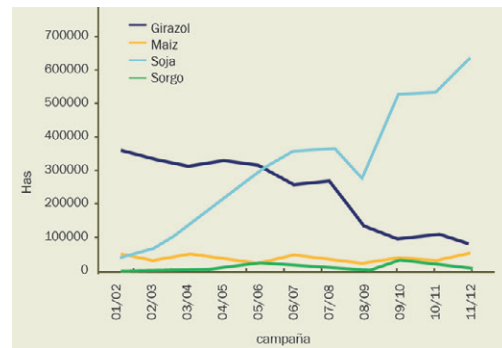
Los sistemas productivos de esta región han evolucionado en función de los cambios producidos en los últimos tiempos. La mayor productividad

1. INTA, Estación Experimental Barrow, 7500, Tres Arroyos, Buenos Aires, Argentina.

de los cultivos sumado a un mayor precio internacional de los granos fomentaron el avance de la agricultura por sobre la ganadería, la cual quedó confinada en corrales o en lotes de baja capacidad productiva del suelo, manteniéndose el número de cabezas o stock regional a través del tiempo.



**Figura 1:** Evolución de la superficie ocupada por campo natural, pasturas perennes y cultivos de cosecha fina y gruesa, y evolución de la superficie sembrada con los principales cultivos de cosecha gruesa (Forján, CEI Barrow, 2012)



La prolongación de los ciclos agrícolas en el tiempo modificó el tradicional esquema mixto agrícola-ganadero, descuidando en muchos casos las rotaciones planificadas y determinando secuencias poco armónicas para la sostenibilidad del sistema en el largo plazo.

En esta región se ha observado un notable avance de la soja por sobre el resto de los cultivos de verano, llegando a superar el 35% de la superficie en la campaña 2011/12. Este escenario es probablemente resultado de varios factores influyentes: su asociación con la siembra directa, mayores márgenes de rentabilidad dados por los menores costos de implantación de este cultivo con respecto a girasol y maíz, contratos de arrendamientos a corto plazo o accidentales que obligan a los arrendatarios a buscar la mayor renta posible para disminuir los riesgos de la actividad, entre otros.

El aumento de la proporción de la soja en las secuencias y, en muchos casos, la falta de aplicación de prácticas adecuadas de conservación de suelos, han desencadenado procesos de degradación física, química y biológica de los suelos, generando cambios sobre la calidad del mismo.

A partir de aquellas variables de mayor sensibilidad para detectar estos cambios en la calidad del suelo, se obtuvo un CMI mediante la aplicación del análisis de procedimiento mixto, con efectos fijos y aleatorios.

**Alertas de procesos de degradación y propuestas de manejo**

La rotación de cultivos constituye un factor clave para lograr la sustentabilidad del actual sistema de producción, ya que en lo inmediato favorece, entre otras cosas, el ciclado de nutrientes y su disponibilidad para las campañas siguientes, y en el largo plazo ejerce un efecto benéfico sobre la

dinámica de la materia orgánica del suelo. Una buena rotación lleva implícita la presencia del ganado en la secuencia, así como la diversificación de cultivos, ya que sus rastrojos difieren en el volumen y la calidad que será aportada al suelo. Es por ello que resulta necesario incluir cultivos que originen una abundante cantidad de rastrojos y de alta relación C/N, tal el caso de las gramíneas, para asegurar su lenta descomposición, con la consecuente formación de materia orgánica. Se recomienda además incluir leguminosas por su aporte de N al sistema, favoreciendo un adecuado balance de nutrientes. Asimismo resulta importante asegurar la presencia permanente de abundante materia seca cubriendo el suelo así como una buena distribución del bosteo de los animales, con el fin de restringir las pérdidas por erosión y/o planchado y la evaporación de agua del perfil. En contraposición, una alta frecuencia de soja dentro de la rotación genera un balance negativo de N y P, además la disminución de materia orgánica del suelo es más marcada por su escaso aporte de C al sistema.

<b>Agr</b>	Agregados estables al agua
<b>DAP</b>	Densidad aparente
<b>COT</b>	C orgánico total
<b>CIC</b>	Capacidad de intercambio de cationes
<b>P Bray</b>	P disponible
<b>Npot</b>	Nitrógeno potencialmente mineralizable

**Tabla 1:** Conjunto Mínimo de Indicadores (CMI) para suelos Molisoles bajo sistema agrícola mixto y agrícola puro. Centro-Sur de Buenos Aires.

**Bibliografía**

FORJÁN H Y L. MANSO. 2010. Cambios en las secuencias de cultivos de la región ¿Hacia dónde vamos?. En: AgroBarrow N° 46. ISSN 0328 1353. pp. 20-23.

FORJÁN, HORACIO. 2012. Evolución de la superficie sembrada en el territorio de la EEAI Barrow. En prensa.

CARRASCO, N. Y ZAMORA, M.S. 2012. Calidad del suelo en el centro sur bonaerense en función del manejo I: calidad química. En: XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina – 16 al 20 de abril de 2012.

ZAMORA, M.S Y CARRASCO, N. 2012. Calidad del suelo en el centro sur bonaerense en función del manejo I: calidad física. En: XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina – 16 al 20 de abril de 2012.

## Ecorregión Pampeana Norte de Buenos Aires

SISTEMA PRODUCTIVO: Agrícola continuo bajo siembra directa

Alicia Beatríz Irizar<sup>1</sup> y Adrián Enrique Andriulo<sup>1</sup>

SUELOS: Argiudoles (Molisoles)

### Caracterización del agroecosistema e identificación de sus puntos críticos.

En la Ecorregión Pampeana, en el norte de la provincia de Buenos Aires, el sistema de producción predominante es agricultura continua bajo siembra directa (SD) con especies de ciclo primavero-estival, fundamentalmente soja y secundariamente maíz (ocupando aproximadamente 70% y 15% de la superficie agrícola, respectivamente). El 80% del cultivo de soja, el 61% del cultivo de trigo y el 72% del cultivo de maíz se hacen bajo SD en esta región (SAGPyA, 2006).

El clima es templado húmedo, siendo la precipitación media anual de 946 mm y la temperatura media anual de 16,4 °C. Los suelos típicos de la zona corresponden a Argiudoles de textura franco limosa (INTA, 1972).

El cambio en prácticas de manejo se debe principalmente a la simplificación de los esquemas de rotación de cultivo en las tierras agrícolas. El cultivo de soja es el principal protagonista, desplazando a los cultivos de maíz y trigo, debido a su alta adaptabilidad a distintos ambientes, a su seguridad de cosecha, facilidad de manejo y fundamentalmente, a su elevada rentabilidad. Sin embargo, los efectos negativos de estos sistemas productivos con tendencia al monocultivo de soja son cada vez más evidentes:

- la masa de carbono (C) y nitrógeno (N) anualmente aportada por los residuos del cultivo de soja resulta insuficiente para compensar las pérdidas de éstos por mineralización de la materia orgánica del suelo (MOS)

1. INTA, Estación Experimental Pergamino. Pergamino, 2700, Buenos Aires, Argentina

(Díaz-Rosello, 2007; Irizar, 2010)

- las características bioquímicas del residuo de soja podrían aumentar las tasas de mineralización de la MOS (Huggins et al., 2007)
- existen prolongados períodos de barbechos sin raíces vivas que reduce la oportunidad de que las raíces estabilicen el C durante sus períodos de crecimiento (Puget & Drinkwater 2001; Deneff & Six 2006).
- existe una menor biomasa de residuos sobre la superficie del suelo (menor cobertura) por lo que los suelos son más susceptibles a la erosión hídrica, ya sea por el impacto de la gota de lluvia o por escurrimiento superficial (Sasal et al., 2008). Además el suelo descubierto alcanza altas temperaturas, aumentando el coeficiente de mineralización de la MOS y las pérdidas de agua por evaporación (Irizar, 2010).

Este proceso de intensificación agrícola compromete la sustentabilidad de los suelos en muy pocos años, siendo necesario identificar y evaluar un conjunto de indicadores que permitan predecir el estado de degradación del suelo bajo este sistema de cultivo.

El conjunto mínimo de indicadores se obtuvo a partir de la aplicación de análisis de componentes principales (Tabla 1).

<b>COT</b>	Carbono Orgánico total
<b>NOT</b>	Nitrógeno orgánico total
<b>COP</b>	Carbono orgánico particulado
<b>IEA</b>	Índice de estabilidad de agregados al agua
<b>pH</b>	Reacción del suelo

### Alertas de procesos de degradación y propuestas de manejo

Los cambios en el uso de la tierra ocurridos en esta región, sumado a cambios en las prácticas de manejo, tales como la pérdida de cultivos en las rotaciones, han desencadenado procesos de degradación de los suelos. Uno de los grandes desafíos agronómicos es encontrar sistemas de cultivos que mantengan o aumenten las reservas actuales de MOS en los agroecosistemas. Las rotaciones de cultivo de gramíneas bajo siembra directa con fertilización nitrogenada constituirían una alternativa posible para tal fin (Irizar, 2010). Éstas prestan un importante servicio ambiental al mantener más elevado el stock orgánico del suelo, haciendo que una mayor proporción de los nutrientes se recicle en el sistema suelo-planta.



**Tabla 1.** Conjunto mínimo de Indicadores (CMI) para suelos Molisoles bajo sistema agrícola continuo, en siembra directa. Norte de Buenos Aires.

### Bibliografía

DENEFF, K & J SIX. 2006. Contributions of incorporated residue and living roots to aggregate-associated and microbial carbon in two soils with different clay mineralogy. *Eur. J. Soil Sci.* 57: 774-786.

DÍAZ-ROSELLO, R. 2007. La intensificación agrícola en el Cono Sur y los desafíos a la sostenibilidad. En: Díaz-Rosello, R & C Rava (eds). *Aporte de la ciencia y la tecnología al manejo productivo y sustentable de los suelos del Cono Sur.* PROCISUR.

HUGGINS, DR; RR ALLMARAS; CE CLAPP ; JA LAMB & GW RANDALL. 2007. Corn soybean sequence and tillage effects on soil carbon dynamics and storage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71: 145-154.

INTA. 1972. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja Pergamino (3360-32). 106 pp. + anexos.

IRIZAR, A. 2010. Cambios en las reservas de material orgánica del suelo y sus fracciones granulométricas: efecto de la secuencia de cultivo, del sistema de labranza y de la fertilización nitrogenada. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Buenos Aires. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

PUGET, P & LE DRINKWATER. 2001. Short-term dynamics of root- and shoot-derived carbon from a leguminous green manure. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 771-779.

SAGPYA. 2006. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos. República Argentina. Disponible en: [www.sagpya.gov.ar](http://www.sagpya.gov.ar). Consultada el 06/08/2008.

SASAL M.C., M.G. m & N.A. Garciarena. 2008. Escurrimiento superficial y pérdidas de nutrientes y glifosato en secuencias de cultivo. En: *Agricultura Sustentable (Proyecto Regional Agrícola).* EEA Paraná. INTA Ediciones.



## Ecorregión Pampeana Área de la Cuenca de Mar Chiquita

SISTEMA PRODUCTIVO: Agrícola- ganadero

Silvia Rodríguez<sup>1</sup>, Nélica N. Pose<sup>1</sup>, Ester C. Zamuner<sup>1</sup>, Liliana Picone<sup>1</sup>, Cecilia Videla<sup>1</sup>, Néstor Maceira<sup>2</sup>.

SUELOS: Argiudoles y Hapludoles (Molisoles)

### Caracterización del agroecosistema e identificación de sus puntos críticos.

#### **Descripción del Establecimiento Cinco Cerros**

*Ubicación:*

Coordenadas geográficas (en grados decimales)

*West:* -58.291329

*East:* -58.182524

*North:* -37.691381

*South:* -37.776163.

Este establecimiento presenta características representativas del área de la cuenca de Mar Chiquita; presenta una topografía que incluye sierras (323 m de altura) con zonas de pendiente más pronunciada, generalmente destinadas a pastura o pastizal natural, y áreas bajo forestación de eu-

caliptos o acacias, con edades variables algunas de hasta 70 años. Predominan suelos Argiudoles típicos y Hapludoles líticos.

En áreas con menores pendientes, la principal actividad es la agricultura, la cual se realiza bajo siembra directa desde 1998, excepto las labores necesarias para el cultivo de papa, que integra ocasionalmente algunas rotaciones. La participación de pasturas de diferente longitud en las rotaciones permitió seleccionar lotes que representen una secuencia en la intensidad de uso agrícola y por ende un posible

1. Universidad Nacional de Mar del Plata. Balcarce, 7620, Balcarce, Argentina

2. INTA, Estación Experimental Balcarce. Balcarce, 7620, Balcarce, Argentina.

mayor impacto en los indicadores de calidad de suelo seleccionados.

**Tabla 1:** Secuencia de cultivos de los lotes del establecimiento "Cinco Cerros" (1997/2010)

Sitio **	Secuencia de cultivos*												
	97/98	98/99	99/00	00/01	01/02	02/03	03/04	04/05	05/06	06/07	07/08	08/09	08/09
PN	PN	PN	PN	PN	PN	PN	PN	PN	PN	PN	PN	PN	PN
A15	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	S1	S1
A60CC	M	T	S1	T/S2	T	G	P	P	P	P	S1	Col	Col
A60CL	P	P	P	P	P	M	Papa	S2	T/S2	G	Col	Av	Av
A80	T	S1	T	G	T	S1	T/S2	G	S1	G	P	P	P
A100	G	T	M	T	S1	T/S2	M	Papa	T/S2	M	T	M	M

\*\* **PN:** pastizal natural; **A15:** 15% del tiempo agricultura y 85% del tiempo pastura; **A60CC:** 60% del tiempo agricultura pero por periodos de tiempo corto, intercalando con pastura **A60CL:** 60% del tiempo agricultura y 40% del tiempo pastura; **A80:** 80% del tiempo agricultura y 20% del tiempo pastura; **A100:** 100% del tiempo agricultura.

\* **P:** pastura implantada; **S1:** soja de primera; **Ceb:** cebada; **M:** maíz; **T:** trigo; **G:** girasol; **Col:** colza; **S2:** soja de segunda; **Av:** avena.

El conjunto mínimo de indicadores seleccionado, resultó integrado por los indicadores que se exponen en la Tabla 2.

**Tabla 2:** Conjunto Mínimo de Indicadores (CMI) para suelos Molisoles bajo sistema agrícola-ganadero. Zona de Mar Chiquita.

<b>COT</b>	Carbono Orgánico Total (Nelson y Sommers, 1982)
<b>NAN</b>	Nitrógeno anaeróbico (Waring y Bremer, 1964)
<b>PE</b>	Fósforo extractable (Bray & Kurtz, 1945)
<b>ISP</b>	Índice de sorción de fósforo (Bache & Williams, 1971)
<b>GSP</b>	Grado de saturación de fósforo (Bache & Williams, 1971)
<b>PH</b>	Reacción del suelo, relación suelo:agua (1:2,5)

**Tabla 3:** Porcentaje de cambio de los Indicadores en relación a valores de referencia del Pastizal natural, de 0-5 cm de profundidad.

Manejo	COT (g kg <sup>-1</sup> )	pH	NAN (mg kg <sup>-1</sup> )	PE (mg P kg <sup>-1</sup> )	ISP (mg P kg <sup>-1</sup> )	GSP (%)
PN	54,42	6,02	235,06	43,41	171,45	24,35
<b>Cambio respecto a PN (%)</b>						
A15	-27,98	-1,68	-35,99	23,26	4,55	-10,05
A60CC	-27,71	4,52	-31,88	41,89	25,42	-10,78
A60CL	-31,34	7,27	-52,99	52,05	17,53	31,79
A80	-27,89	1,05	-45,46	32,21	3,73	5,86
A100	-41,47	-1,01	-65,34	ND	ND	ND

\*\* **PN:** pastizal natural; **A15:** 15% del tiempo agricultura y 85% del tiempo pastura; **A60CC:** 60% del tiempo agricultura pero por periodos de tiempo corto, intercalando con pastura **A60CL:** 60% del tiempo agricultura y 40% del tiempo pastura; **A80:** 80% del tiempo agricultura y 20% del tiempo pastura; **A100:** 100% del tiempo agricultura.

**Tabla 3:** Porcentaje de cambio de los Indicadores en relación a valores de referencia del Pastizal natural, de 5-20 cm de profundidad.

Manejo	COT (mg kg <sup>-1</sup> )	pH (g kg <sup>-1</sup> )	NAN
PN	35,31	6,09	117,81
<b>Cambio respecto a PN (%)</b>			
A15	-2,19	-0,43	-30,04
A60CC	-12,28	1,88	-29,78
A60CL	-10,14	7,16	-18,10
A80	-13,52	-3,17	-37,66
A100	-14,56	-3,45	-49,76

### **Alertas de procesos de degradación según la historia de manejo**

A pesar de las diferencias en intensidad de uso agrícola, se ha observado una reducción promedio de alrededor de 30% en el contenido de COT en los 5 cm superficiales, mientras que hasta los 20 cm la reducción es del orden del 10% en esta variable. De todos modos, se manifiesta una tendencia a que los manejos sin inclusión de pasturas en la rotación, afecten más al COT.

No se verifica acidificación por uso agrícola, evidentemente, los aún elevados contenidos de COT confieren a los suelos del sudeste bonaerense una alta capacidad de resistir procesos de acidificación causados por la aplicación prolongada de fertilizantes en el tiempo.

El NAN se presenta como un indicador más sensible a la intensidad de manejo, mostrando una mayor reducción cuanto más intenso es el uso agrícola. Estas diferencias se pueden observar, no sólo en los 5 cm superficiales, sino también hasta los 20 cm de profundidad.

Si bien hay un aumento de la concentración en el PE, los incrementos son menores con usos agrícolas más intensivos, lo que significa que las cantidades de fertilizante empleados no logran reponer la extracción de fósforo que hacen los cultivos.

La cantidad de P retenido en la superficie del suelo depende de algunas propiedades fisico-químicas del mismo, y estas características no se modifican en el corto plazo. Por eso no hay una tendencia clara en la variación del ISP en suelos con diferente uso agrícola, indicando que no sería un indicador sensible a los cambios producidos por el manejo del suelo y cultivos.

Hay acuerdo en la bibliografía internacional que establece que valores de GSP mayores de 20 a 30 % implican que existe riesgo ambiental de liberación de fósforo que podría transportarse por escurrimiento hacia las fuentes superficiales de agua o por lavado hacia aguas subterráneas. En aquellos suelos donde se realizan rotaciones largas de cultivos intercalados con periodos cortos de pastura, en los que se verifica un aumento del GSP, presentan riesgo potencial de pérdida de fósforo.

### **Bibliografía**

BRAY, R.H. and L.T. KURTZ. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59: 39 – 45.

BACHE, B.W. and E.G. WILLIAMS 1971. A phosphate sorption index for soils. *Journal of Soil Science* 22, 289-301.

NELSON, D. and L SOMMERS. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. *Methods of soil analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties.* Page et al. (Eds.). Am. Soc. Agron. Madison, WI, USA, pp 539-577.

WARING, S.A. and J.M. BREMNER. 1964. Ammonium production in soil under waterlogged condition as an index of nitrogen availability. *Nature* 201:951-952.

## Ecorregión Pampeana Centro-Sur de Santa Fe

SISTEMA PRODUCTIVO: Agrícola continuo

Silvina Bacigaluppo<sup>1</sup>, Guillermo Gerster<sup>2</sup>, Fernando Salvagiotti<sup>1</sup>

SUELOS: Argiudoles

### Caracterización del área.

El centro-sur de la provincia de Santa Fe se encuentra dentro de la región de la Pampa Ondulada, subregión de la Pampa Húmeda Argentina. De Sur a Norte, se extiende desde el límite con la provincia de Buenos Aires (34° 22' at S) hasta la latitud de la ciudad de Santa Fe (31° 37' Lat S), mientras que de Oeste a Este se extiende desde el límite con la provincia de Córdoba hasta el río Paraná. El relieve es suavemente ondulado, recortado por cañadas, arroyos y ríos. Posee pendientes medias con gradientes menores de 2%, aunque en algunos sectores pueden alcanzar el 3%. En los interfluvios y en las nacientes de los cursos de agua, el terreno suele ser más plano. Los materiales sobre los cuales se formaron los suelos son sedimentos loésicos de textura pre-

dominante franco-limosa (Mosconi et al., 1981). Los suelos del área son genéticamente similares, una alta proporción de los mismos pertenece al gran grupo Argiudol, variando sólo a nivel de series por diferencias en sus contenidos de limo, arcilla y arena y/o en el espesor de los horizontes que las componen. En estos suelos, la capacidad de almacenaje de agua útil para el cultivo es aproximadamente 300 mm hasta los dos metros de profundidad, a la cual llegan las raíces de los principales cultivos extensivos de la región (Andriani, 2000a, 2000b; Dardanelli et al., 2003). En la zona sur de la región (departamento Gral. López) aumenta la proporción de suelos Hapludoles (típicos y énticos) con una capacidad de almacenamiento de agua útil de aproximadamente 280 mm.

1. INTA, Estación Experimental Oliveros. Oliveros 2206, Santa Fe, Argentina.

2. INTA, Agencia Extensión Rural Roldán.

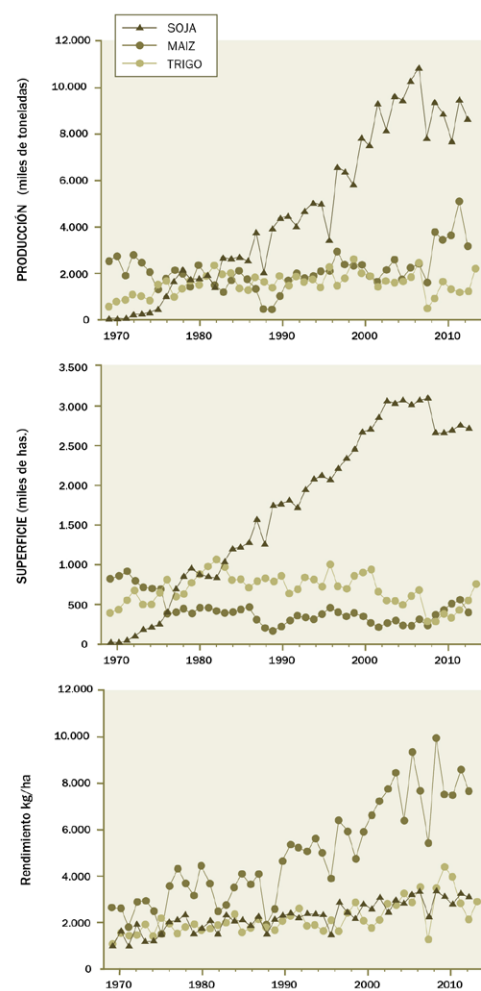
El clima del área descripta es templado, con un periodo libre de heladas de 250 días (mediados de setiembre a mediados de mayo), pudiendo variar en 20 ó 25 días, según el año. Las temperaturas medias anuales varían entre 16 y 18 °C y las precipitaciones entre 975 y 1075 mm, con una alta variación interanual. Aumentan de oeste a este y el régimen pluviométrico tiende a ser monzónico, o sea con concentración de lluvias en primavera-verano. El período octubre-marzo concentra el 70% de las lluvias (Mosconi et al., 1981).

### Uso y estado actual de los suelos del centro-sur de Santa Fe

Los suelos de la región centro-sur de Santa Fe fueron afectados durante décadas por problemas erosivos y de degradación física, química y biológica como consecuencia de sistemas de producción basados en agricultura con predominio de la labranza convencional. Esto trajo aparejado una disminución en la profundidad del horizonte superficial, reducción en los contenidos de materia orgánica y la porosidad del suelo.

A partir de 1990 la práctica de siembra directa tuvo una amplia difusión alcanzando en la campaña 2011 el 78.5 % del área sembrada (Aapresid 2012). El crecimiento de la siembra directa no fue acompañado por rotaciones de cultivos que incluyeran gramíneas. En la actualidad, la superficie de gramíneas de verano no supera el 15 % del área afectada a la agricultura (SIIA, 2015). El cultivo de soja cubre más del 75 % de la superficie de la región, ya sea como cultivo de primera o de segunda época de siembra, detrás del trigo. La producción de soja ha presentado un sostenido crecimiento en las últimas campañas asociado a un área de siembra creciente año a año y a un incremento constante de los rendimientos (Figura 1). El avance de la superficie sembrada se realizó en gran parte en áreas marginales para la agri-

cultura, incluso en áreas de relieve deprimido y con napas freáticas cercanas a la superficie agravando los “problemas de piso” especialmente en otoños húmedos.



**Figura 1.** Evolución de la producción total, superficie y rendimiento por ha de soja, maíz y trigo en el centro-sur de Santa Fe en el período 1970 - 2013. Datos correspondientes a los departamentos Gral. López, Constitución, Iriondo, Rosario, San Lorenzo, Caseros, Belgrano, San Martín, San Jerónimo, La Capital, Las Colonias y Castellanos (SIIA, 2015).

### Indicadores de la degradación física.

La degradación del recurso suelo es producto de la combinación de efectos naturales y antrópicos de gran intensidad (Pecorari 1988a, 1988b). Los suelos de la región centro-sur de Santa Fe, con alta proporción del monocultivo de soja, presentan un marcado deterioro estructural en los horizontes sub-superficiales, evidenciado por descensos significativos de la materia orgánica y la presencia de estados masivos delta, “MΔ” (bloques de suelo donde no se observan terrones sino un solo elemento estructural, sin porosidad interna visible) (De Battista et al., 1993). La baja estabilidad y la escasa regeneración de la estructura de los suelos de esta región, están asociadas a su alto contenido de limo, mayor al 70% (Barbosa et al., 1997). Estas características tienen como consecuencia negativa, un incremento en la resistencia mecánica del suelo a la penetración, con efectos adversos sobre el crecimiento radical y una disminución de la velocidad de infiltración del agua (Cosentino y Pecorari, 2002; Gerster y Bacigaluppo, 2004). Estudios realizados en Argiudoles del sur de Santa Fe, mostraron que los suelos de menor calidad y problemas de compactación (mayor densidad aparente del horizonte A, mayor proporción de pisos y estados masivos delta), se encuentran habitualmente asociados a lotes en siembra directa continua con baja frecuencia de maíz en la rotación (Tabla 1). Por el contrario, lotes con mayor proporción de gramíneas en la secuencia de cultivos, presentan en general, menos incidencia de este problema (Gerster et al., 2002). En consecuencia, lotes en siembra directa que a pesar de tener el mismo tipo de suelo, igual régimen de precipitaciones y similar manejo, pueden tener un nivel o capacidad productiva diferente (Bacigaluppo et al., 2011).

### Indicadores de la degradación química.

El sistema de producción agrícola implementado durante décadas, con escasa reposición de los nutrientes extraídos por los cultivos, provocó deficiencias generalizadas de nitrógeno (N), fósforo (P) y mayor frecuencia de lotes con respuesta a la fertilización con azufre (S). En el caso del P, las deficiencias son más dramáticas debido a que la tasa de exportación con el grano por parte de los cultivos, es mayor que en el caso del S.

Variables edáficas asociadas a la respuesta del cultivo a la fertilización, son indicadores de la fertilidad química del suelo. En nutrientes de alta movilidad como el caso del nitrógeno, la deficiencia de N (manifestada principalmente en gramíneas) es generalizada en el centro-sur de Santa Fe, ya que se combinan una alta demanda del cultivo, asociada al potencial de rendimiento y la capacidad del suelo de aportar los nutrientes, muchas veces afectada por la reducción en los niveles de materia orgánica. Además, la disponibilidad de nitrógeno en el suelo está también determinada por la época de siembra y el cultivo antecesor. En consecuencia, los indicadores de suelo no son suficientes para determinar el nivel de deficiencia de N del sistema, sino que además es necesario conocer el nivel de productividad del lote. Por ejemplo para maíz, se ha determinado que la respuesta a la fertilización es máxima cuando se tiene una disponibilidad de N en el suelo de 137 kg N ha<sup>-1</sup> sumando la oferta de NO<sub>3</sub> del suelo en los 60 cm de profundidad y el aporte del fertilizante nitrogenado, cuando el potencial de producción es inferior a los 9600 kg ha<sup>-1</sup>. Para rendimientos superiores la disponibilidad de NO<sub>3</sub> en el suelo más fertilizante debería alcanzar los 162 kg N ha<sup>-1</sup> (Salvagiotti et al., 2011).

Para nutrientes de baja movilidad, es necesario mantener un nivel de concentración del nutriente en el suelo por encima de un umbral, para que

la respuesta a la fertilización sea baja. En el caso del P, diferentes estudios han mostrado que por debajo de 18 ppm de P Bray en los veinte centímetros superficiales del suelo, la probabilidad de respuesta a la fertilización aumenta, para los diferentes cultivos de grano sembrados en el centro

sur de Santa Fe (Ferraris et al., 2002; Barbagelata, 2011). En el caso del cinc (Zn), estudios realizados por Barbieri et al. (2015) han mostrado que los niveles de respuesta a la fertilización aumentan por debajo de concentraciones de 1 ppm (Tabla 1).

**Tabla 1:** Rango de valores y umbrales de distintas variables edáficas físicas y químicas

Variables	Unidad de medida	Valor probable para que un lote exprese mejor calidad de suelo	Rango observado en lotes de producción	Método de determinación	Referencia	
Materia Orgánica (MO) Horizonte A	%	>3	1.9 - 4.5	Walkley & Black	Gerster et al. (2002) Salvagiotti, comunicación personal	
Densidad Aparente (Dap) Horizonte A	g cm <sup>-3</sup>	<1.23	1.1 - 1.4	Cilindro (Blake and Hartage, 1986)	Gerster et al. (2002) Gerster, Bacigaluppo (2004)	
Piso sub-superficial	%	< 60	0 - 93	Reconocimiento, perfil cultural. (Manichon, 1987)	Gerster et al. (2002) Bacigaluppo et al. (2011)	
Estado masivo delta (MΔ) Horizonte A+B1	%	<25	0 - 57	Reconocimiento, perfil cultural. (Manichon, 1987)	Gerster et al. (2002) Bacigaluppo et al. (2011)	
Infiltración básica (Ib)	mm h <sup>-1</sup>	>24	9.4 - 54	Permeámetro de disco (Perroux, & White, 1988)	Bacigaluppo et al. (2011)	
pH	—	—	5 - 7	Potenciometría (Reed & Cummings, 1945)	Cordone et al. (2008)	
Espesor de horizontes sub superficiales	cm	>25	14 - 34	Reconocimiento (profundidad hasta el B2 textural)	Bacigaluppo et al. (2011)	
Fósforo extractable (P)	ppm	>18	2 - 40	Bray 1 (Bray & Kurtz, 1945)	Salvagiotti et al. (2003)	
Cinc (Zn)	ppm	>1	0.13 - 7.07	DTPA (Lindsay and Norvell, 1978)	Barbieri et al. (2015)	
Disponibilidad de N a la siembra, NO <sub>3</sub> , en suelo a 60 cm + N fertilizante	Maíz Bajo rendimiento	kg ha <sup>-1</sup>	137	NO <sub>3</sub> por fenil disulfónico (Bremner, 1965)	Salvagiotti et al. (2011)	
	Maíz Alto rendimiento	kg ha <sup>-1</sup>	162			
	Trigo Bajo rendimiento	kg ha <sup>-1</sup>	92		14 - 85 *	Salvagiotti et al. (2004) Ferrari et al. (2010)
	Trigo Alto rendimiento	kg ha <sup>-1</sup>	140			

\* Contenido de N en los 60 cm como nitratos a la siembra del cultivo

**Consideraciones finales - Alertas de procesos de degradación y propuestas de manejo.**

La fertilidad del suelo es la resultante de procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en él. En términos generales, el cuidado de la fertilidad de un lote de producción agrícola, implica tener el suelo cubierto la mayor parte del año, utilizando prácticas conservacionistas con mínima o nula remoción de los residuos (por ejemplo la siembra directa) y en los casos de balances hídricos más favorables, la inclusión de mayor número de cultivos en el tiempo, ya sea para grano o como cobertura.

El contenido de Materia Orgánica (MO) del suelo juega un rol fundamental en la estructura y en la fertilidad química, contribuyendo a la formación de los agregados y brindando los nutrientes necesarios para el crecimiento de los cultivos. Las rotaciones con cultivos que aporten grandes volúmenes de residuos, la inclusión de cultivos de cobertura en el invierno, la fertilización y el manejo de los residuos a través de la siembra directa, son algunas de las prácticas que mayor efecto positivo ejercen sobre el contenido de materia orgánica del suelo a través del tiempo.

Un suelo con óptimas condiciones de funcionamiento para el desarrollo de las plantas, debería presentar una estructura estable y mínima presencia de sectores densificados por el tránsito (Dap; MΔ), que permitan una correcta entrada y circulación de agua (Ib) y aire y la exploración de raíces del mayor volumen de suelo posible. Prácticas como la rotación con gramíneas de verano e invierno en siembra directa permiten reconstituir la pérdida de porosidad generada por la compactación por tránsito en el lote.

Otro aspecto importante a considerar en la fertilidad del suelo, es mantener un balance de nutrientes adecuado, fertilizando el lote de acuerdo

a lo que el cultivo exporta con la cosecha en el caso de nutrientes de baja movilidad en el suelo, y en base a las expectativas de producción con aquellos de mayor movilidad. Los nutrientes pueden ser incorporados a los sistemas de producción mediante el uso de fertilizantes minerales, abonos orgánicos y/o efluentes de la actividad pecuaria, además del uso de leguminosas que fijan el nitrógeno del aire.

Los sistemas agrícolas actuales de gran parte de este área, necesitan ser manejados con mayor diversidad de especies y con un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles como agua, luz y nutrientes, para asegurar secuencias “amigables con el ambiente” que permitan alcanzar un manejo sustentable y rentable.



Cobertura de suelo de una secuencia con gramíneas



Cobertura de suelo de monocultivo de soja

## Bibliografía

AAPRESID 2012. Asociación Argentina de productores en siembra directa, <http://www.aapresid.org.ar>

ANDRIANI, J.; 2000a. Crecimiento de las raíces de los principales cultivos extensivos en suelos Argiudoles de la provincia de Santa Fe. Para Mejorar la Producción N° 13, EEA INTA Oliveros: 40-44.

ANDRIANI, J.; 2000b. Parámetros hídricos de los principales suelos Argiudoles y Hapludoles del sur de Santa Fe. Para mejorar la producción N° 13, EEA INTA Oliveros: 23-26.

BACIGALUPPO S.; M. BODRERO; M. BALZARINI; G. GERSTER; J. ANDRIANI; J.M. ENRICO; J. DARDANELLI; 2011. Main edaphic and climatic variables explaining soybean yield in Argiudolls under no-tilled systems. *Europ. J. Agronomy* 35, 247-254.

BARBAGELATA P. Fertilización fosfatada para trigo y maíz en siembra directa: Diagnóstico de fertilidad y estrategias de fertilización. IPNI. Simposio Fertilidad 2011. Actas Simposio Fertilidad 2011, 90-97. 2011, Rosario.

BARBIERI P, SAINZ ROZAS H, ECHEVERRIA H, SALVAGIOTTI F, BARBAGELATA P, BARRACO M, COLAZO J C, FERRARIS G, SANCHEZ H, CACERES DIAZ R H, REUSSI CALVO N, ESPOSITO G, EYHERABIDE M AND LARSEN B. ¿El análisis de suelo permite diagnosticar la deficiencia de cinc en el cultivo de maíz? Simposio Fertilidad 2015. Actas Simposio Fertilidad 2015. 2015, Rosario - Argentina, IPNI - Fertilizar Asociación Civil.

BARBOSA, O.; TABOADA, M; RODRÍGUEZ, M; COSENTINO, D.; 1997. Regeneración de la estructura en diferentes fases de degradación de un suelo franco limoso de la Pampa Ondulada. *Ciencia del Suelo* 15: 81-86.

BLAKE G. AND HARTAGE K., 1986. Bulk density. *Methods of soils analysis. Soil Sc. Soc. Am., USA.* 363-375

BRAY, RH & LT KURTZ. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science* 59:39-45.

BREMNER, JM. 1965. Inorganic forms of nitrogen. In: CA Black (ed.) *Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and Microbiological properties.* Pp 1179-1232. ASA. Madison-Wisconsin-USA.

CORDONE G., MARTÍNEZ F., VERNIZZI A., ANDRIULO A., PAGANI R. and BACIGALUPPO S. Efecto de la secuencia de cultivos sobre algunas propiedades edáficas monitoreadas en sistemas reales de producción. XXI Congreso Argentino Ciencia del Suelo. Actas XXI Congreso Argentino Ciencia del Suelo. 2008. Potrero de los Funes, San Luis, AACCS.

COSENTINO, D.; PECORARI, C.; 2002. Limos de baja densidad: impacto sobre el comportamiento físico de los suelos de la región pampeana. *Ciencia del Suelo* 20: 9-16.

DARDANELLI, J., CALMON, M., JONES, J., ANDRIANI, J., DÍAZ, M., COLLINO, D., 2003. Use of a crop model to evaluate soil impedance and root clumping effects on soil water extraction in three argentine soils. *American Society of Agricultural Engineers, Vol. 46 (4):* 1265-1275.

DE BATTISTA, J., ANDRIULO, A., PECORARI, C., 1993. El Perfil Cultural: un método para la evaluación de sistemas de cultivo. *Ciencia del Suelo* Vol. 10-11: 89-93.

FERRARI M., CASTELLARÍN J. M., SAINZ ROZAS H., VIVAS H., MELCHIORI R. and GUDELJ V. Evaluación de métodos de diagnóstico de fertilidad nitrogenada para el cultivo de trigo en la región pampeana. *Informaciones Agronomicas del Cono Sur* 45[2], 10-13. 2010.

FERRARIS G., GUTIÉRREZ BOEM F. and ECHEVERRIA H. Respuesta a la fertilización en el cultivo de soja. *IDIA* XXI 3, 52-58. 2002.

GERSTER, G; GARGICEVICH, A; CORDONE, G; GONZÁLEZ, C.; 2002. Factores edáficos y prácticas culturales asociadas al rendimiento de soja. Actas XVIII Congreso Argentino de las Ciencias del Suelo. 2002, Puerto Madryn, Chubut, AACCS.

GERSTER, G., BACIGALUPPO, S. 2004. Consecuencias de la densificación por tránsito en Argiudoles

del sur de Santa Fe. Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo . 2004, Paraná, Entre Ríos, AACCS.

LINDSAY W. L. and NORVELL W. A., 1978. Development of a DTPA Soil Test for Zinc, Iron, Manganese, and Copper. *Soil Science Society of America Journal* 42, 421-428.

MANICHON H., 1987. Observation morphologique de l'état structural et mise en évidence d'effets de compactage des horizons travaillés. In: Monnier, G., Goss, M.J. (Eds.), *Soil Compaction and Regeneration.* Balkema, Rotterdam, pp. 39-52

MOSCONI F, PRIANO L., HEIN N., MOSCATELLI G., SALAZAR J., GUTIÉRREZ T., CÁCERES L., 1981. Mapa de suelos de la Provincia de Santa Fe. INTA-MAG 216 pp.

PECORARI C., 1988a. Características físicas de las fracciones granulométricas de los horizontes superficiales de un Argiudol típico (serie Pergamino). Informe Técnico N° 220. INTA Centro Regional Buenos Aires Norte, EEA Pergamino 18 pp.

PECORARI C., 1988b. Inestabilidad estructural de los suelos en la región de la EEA Pergamino. Informe Técnico N° 216. INTA Centro Regional Buenos Aires Norte, EEA Pergamino 16 pp.

PERROUX K., WHITE I., 1988. Designs for disc permeameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52, 1205-1215

REED J.F. & CUMMINGS R.W. 1945. Soil reaction-glass electrode and colorimetric methods for determining ph values of soils. *Soil Science* 59: 97-105.

SALVAGIOTTI F, NOVELLO O. A., GERSTER G., BACIGALUPPO S., CASTELLARÍN J. M. and PEDROL H. M. Disponibilidad de Fósforo en sistemas agrícolas del centro-sur de Santa Fe y respuesta a la fertilización fosfatada de trigo. Para mejorar la producción - INTA Oliveros 22[TRIGO], 49-52. 2003.

SALVAGIOTTI F., CORDONE G., CASTELLARÍN J. M., BACIGALUPPO S., CAPURRO J, PEDROL H. M., GERSTER G., MARTÍNEZ F., MÉNDEZ J. M. and TRENTINO

N. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada en trigo utilizando un umbral de disponibilidad de nitrógeno a la siembra. Para mejorar la producción - INTA Oliveros 25[TRIGO], 50-52. 2004.

SALVAGIOTTI F., CASTELLARIN J. M., FERRAGUTI F. J., and PEDROL H M. 2011, Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz según potencial de producción y disponibilidad de nitrógeno en la región pampeana norte. *Ciencia del Suelo* 29[2], 199-212. 2011.

SIIA, 2015. Sistema Integrado de Información Agropecuaria. <http://www.sia.gov.ar>

WALKLEY, A. & BLACK I.A. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37:29-37.

## Ecorregión Pampeana Sudeste de Córdoba

SISTEMA PRODUCTIVO: Agrícola

Bethania Aimetta<sup>1</sup>, Tomás Baigorria<sup>1</sup>, Juan Pablo Bertram<sup>2</sup>, Mónica Boccolini<sup>1</sup>, Cristian Cazorla<sup>1</sup>, Valeria Faggioli<sup>1</sup>, Claudio Lorenzon<sup>1</sup>, Sebastian Muñoz<sup>2</sup>, Jimena Ortiz<sup>1</sup>, Vanesa Pegoraro<sup>1</sup>, Martín Sanchez<sup>2</sup>

SUELOS: Argiudoles y Hapludoles (Molisoles)

### Caracterización del agroecosistema e identificación de sus puntos críticos.

La región sudeste de la provincia de Córdoba presenta una temperatura media anual de 16 °C y precipitaciones medias anuales de 860 mm. En general, existe una asociación de suelos dominantes según la posición que ocupen en el paisaje, donde predominan Argiudoles típicos, siendo el material parental de los suelos de origen loesico. Tradicionalmente los sistemas de producción han sido mixtos (agrícola – ganaderos) hasta la década del 70 y luego gradualmente agrícolas hasta ocupar casi la totalidad con agricultura continua en siembra directa desde mediados de los 90. Los cultivos más comunes en la actualidad son trigo (*Triticum aestivum* L.), maíz (*Zea mays* L.) y soja (*Glycine max*), siendo esta última

la que predomina en la superficie implantada en las últimas 10 campañas (SIIA, 2015). En este escenario existen procesos de degradación reversibles asociados a la agricultura continua, como la pérdida de carbono orgánico, (Sainz Rozas et al., 2011) y la degradación física de los suelos (Urricariet and Lavado, 1999; Ferreras et al., 2007).

Los indicadores de calidad de suelo (Tabla 1) fueron seleccionados en función de su relación con los procesos y funciones de suelo predominantes, la posibilidad de emplear valores críticos y la sensibilidad al manejo (Escala temporal = años). Para ello se efectuaron muestreos en 35 situaciones de agricultura continua en siembra directa, en lo

1. INTA, Estación Experimental Marcos Juárez. Marcos Juárez, 2580, Córdoba, Argentina.

2. CREA Monte Buey



tes que pertenecen a productores agrupados en el consorcio regional de experimentación agrícola (CREA) Monte Buey, ubicados en los departamentos Unión y Marcos Juárez. Las muestras fueron tomadas en la profundidad 0 - 20 cm, que abarca la totalidad del horizonte A para la mayoría de las situaciones. Además se tomaron 2 situaciones de referencia de baja alteración, una pastura natural sin uso desde el año 1993, que se mantiene mediante cortes anuales y un monte sin cultivar con vegetación de pinos sin uso agrícola en los últimos 50 años. Los suelos tienen contenidos de arcilla + limo superiores al 70%.

**Tabla 1:** Conjunto Mínimo de Indicadores (CMI): Carbono orgánico total (COT), nitrógeno orgánico total (NOT), Carbono orgánico particulado (COP), Nitrógeno orgánico particulado (NOP), Fósforo disponible (P), pH, conductividad eléctrica (CE) y Nitrógeno anaeróbico (Nan) para el sistema agrícola puro en el sudeste de Córdoba.

Indicador	Unidades	Método de determinación
COT	(g kg)	Combustión seca (Allison et al., 1965)
NOT	(g kg)	Combustión seca (Bremner and Tabatabai, 1971)
COP	(g kg)	Combustión seca (Allison et al., 1965)
NOP	(g kg)	Combustión seca (Bremner and Tabatabai, 1971)
P	(ppm)	Bray 1 (Kurtz & Bray, 1945)
PH		(1:2,5) IRAM 29410, 1999
CE	(ds m <sup>-1</sup> )	(1:2,5) USDA, 1954
Nan	(ppm)	Incubación (Gianello and Bremner, 1986) y Microdestilación directa (Keeney, 1982)

Los valores umbrales fueron identificados en función de la bibliografía y de las relaciones entre los indicadores y las funciones de suelo. El carbono orgánico total (COT): en relación con la producción del cultivo de trigo (Díaz-Zorita et al., 1999), el Carbono orgánico particulado (COP) y Nitrógeno orgánico particulado (NOP) en función a los valores desde donde disminuye la respuesta a la fertilización nitrogenada en maíz en regiones semiáridas (Quiroga et al., 2006). El contenido

de Fósforo disponible (P) según la respuesta a la fertilización en la mayoría de los cultivos agrícolas (Gutiérrez-Boem et al., 1999) y el pH y conductividad eléctrica (CE) en función de limitantes para el crecimiento y desarrollo de los cultivos agrícolas presentes en la región (Bustingorri and Lavado, 2013; Picone et al., 2006; Azcarate and Kloster, 2009). Los contenidos de Nan en función a la respuesta a la fertilización en el cultivo de maíz (Calviño and Echeverría, 2003).

**Tabla 2:** Valores de las situaciones de monte, pastura, lotes agrícolas y umbrales de referencia para el CMI de suelos bajo sistema agrícola puro de la región sudeste de la provincia de Córdoba.

Indicador	Monte	Pastura	Lotes agrícolas	Umbrales de referencia
COT (g kg)	25,36	19,26	13,4 (7,4 - 17,4)	17
NOT (g kg)	2,21	1,53	1,11 (0,8 - 1,7)	1,7
COP (g kg)	4,22	5,93	2,2 (1,2 - 3,7)	1,5
NOP (g kg)	0,27	0,3	0,11 (0,05 - 0,20)	0,10
P (g kg)	82	42	19,4 (6 - 4,6)	10,16
pH	5,76	6,48	6,3 (5,7 - 7,8)	> 6 y > 7
CE (ds m <sup>-1</sup> )	0,18	0,11	0,15 (0,1 - 0,7)	0,5
Nan (ppm)	72,1	86,1	61 (39 - 91)	47

**Lotes agrícolas.** Valores observados medios, entre paréntesis valores mínimos y máximos.

### Alertas de procesos de degradación y propuestas de manejo.

Considerando los valores de COT y NOT se observaron contenidos de 40 y 30 % inferiores a los que presentaron los sistemas monte y pastura, respectivamente. En cambio para las fracciones COP y NOP, los contenidos fueron alrededor de 60% inferiores con respecto a los mismos sistemas. Los valores observados de P fueron 24 y 46 % inferiores a las situaciones monte y pastura, respectivamente, mientras que en los contenidos de Nan los valores fueron un 16 y 30 % inferiores a los mismos sistemas. Además de esta reducción con respecto a los sistemas de baja alteración antrópica (monte y pastura), la mayoría de los lotes agrícolas presentaron valores inferiores a los umbrales de referencia. En el

caso de los valores de COT y NOT, todos los sistemas agrícolas presentaron valores inferiores a los umbrales de referencia, mientras que el 10 y 50% de estos sistemas presentaron valores inferiores a los umbrales en las variables COP y NOP, respectivamente. En cambio, los valores de P y Nan fueron inferiores a los umbrales de referencia solo en el 10% de las situaciones agrícolas evaluadas. Los contenidos de P considerando los valores de respuesta a los cultivos son adecuados en el 90 % de los casos, pero se observa una disminución importante en los valores medios en relación a las situaciones de baja alteración, como así también descensos importantes registrados en los últimos años (Sainz Rozas et al., 2012). Considerando los valores de pH y CE se observaron situaciones con valores dentro de los

umbrales en la mayoría de las situaciones agrícolas. Los valores observados en los indicadores por debajo de los valores umbrales de referencia indican la necesidad de aplicar tecnologías que tiendan a revertir estos procesos de degradación del suelo. Los contenidos de COT están asociados a la fertilidad física y la mayoría de los lotes se encuentran por debajo de los umbrales de referencia. En cambio, los contenidos de COP, NOP, Nan y P (más asociados a la fertilidad química) presentan muchos lotes con valores por encima de los valores umbrales. Por lo tanto, en la región se pueden presentar problemas de degradación física y en menor medida, degrada-

ción química. Se recomiendan aquellas prácticas de manejo que tiendan a incrementar los contenidos de COT y sus fracciones, tales como fertilización (Campbell and Zentner, 1993), rotación de cultivos (Sainju et al., 2011) y la utilización de cultivos de cobertura (Nascente et al., 2013). La alta participación del cultivo de soja con barbechos químicos presenta un espacio entre cultivos de cosecha que puede utilizarse para intensificar las secuencias agrícolas con cultivos de invierno, ya sea para la producción de granos de cosecha, como para la generación de biomasa área utilizando cultivos de cobertura de especies gramíneas y/o leguminosas.



**Figura 1.** Sitio de muestreo: sistema de monte natural (a la izquierda) y pastura (a la derecha).

### Bibliografía

ALLISON, L.E., BOLLEN, W.B., and MOODIE, C.D. (1965). Total Carbon. Methods Soil Anal. Part 2 Chem. Microbiol. Prop. agronomy monograph, 1346–1366.

AZCARATE, P., and KLOSTER, N. (2009). Reacción del suelo. pH. In A. Quiroga & A. Bono (Eds.), Manual de fertilidad y evaluación de suelos. (p. 161).

BREMNER, J.M., and TABATABAI, M.A. (1971). Use of Automated Combustion Techniques for Total Carbon, Total Nitrogen, and Total Sulfur Analysis of Soils. Instrum. Methods Anal. Soils Plant Tissue assesspublicati, 1–15.

BUSTINGORRI, C., and LAVADO, R. (2013). Soybean response and ion accumulation under sprinkler irrigation with sodium-rich saline water. J. Plant Nutr. 36, 1743–1753.

CALVIÑO, P.A., and ECHEVERRÍA, H.E. (2003). Incubación anaeróbica del suelo como diagnóstico de la respuesta a nitrógeno del maíz bajo siembra directa. Cienc. Suelo 21, 24–29.

CAMPBELL, C.A., and ZENTNER, R.P. (1993). Soil organic matter as influenced by crop rotations and fertilization. Soil Sci. Soc. Am. J. 57, 1034–1040.

DIAZ-ZORITA, M., BUSCHIAZZO, D.E., and Peinemann, N. (1999). Soil organic matter and wheat productivity in the semiarid Argentine Pampas. Agron. J. 91, 276–279.

FERRERAS, L., MAGRA, G., BESSON, P., KOVALEVSKI, E., and GARCÍA, F. (2007). Indicadores de calidad física en suelos de la Región Pampeana Norte de Argentina bajo siembra directa. Cienc. Suelo 25, 159–172.

GUTIÉRREZ-BOEM, F.H., SCHEINER, J.D., and LAVADO, R.S. (1999). Identifying fertilization needs for soybean in Argentina. Better Crops Int. 13, 7.

NASCENTE, A.S., Li, Y.C., and CRUSCIOL, C.A.C. (2013). Cover crops and no-till effects on physical fractions of soil organic matter. Soil Tillage Res. 130, 52–57.

PICONE, L.I., ECHEVERRÍA, H.E., and GARCÍA, F.O. (2006). Propiedades del suelo relacionadas con la fertilidad. Fertil. Suelo Fertil. Cultiv. 3–18.

QUIROGA, A., SAKS, M., FUNARO, D., and FERNÁNDEZ, R. (2006). Aspectos del manejo del agua y la nutrición nitrogenada de maíz en la región semiárida y subhúmeda pampeana. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta, Argentina. CD. [Links].

SAINJU, U.M., LENSSEN, A.W., CAESAR-TONTHAT, T., JABRO, J.D., LARTEY, R.T., EVANS, R.G., and ALLEN, B.L. (2011). Dryland residue and soil organic matter as influenced by tillage, crop rotation, and cultural practice. Plant Soil 338, 27–41.

SAINZ ROZAS, H.R., ECHEVERRÍA, H.E., and ANGELINI, H.P. (2011). Niveles de carbono orgánico y pH en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extra-pampeana argentina. Cienc. Suelo 29, 29–37.

SIIA 2015. Sistema integrado de información agropecuaria. Ministerio de agricultura.

United States Salinity Laboratory Staff (USSL). (1954). Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. U.S. Government Printing Office.

## Ecorregión Pampeana Sudoeste de Buenos Aires

SISTEMA PRODUCTIVO: Mixto (Agrícola-Ganadero y Ganadero-Agrícola)

Josefina Zilio<sup>1</sup>, Hugo Krüger<sup>1</sup> y Franco Frolla<sup>1</sup>

SUELOS: Haplustoles, Hapludoles y Argiudoles

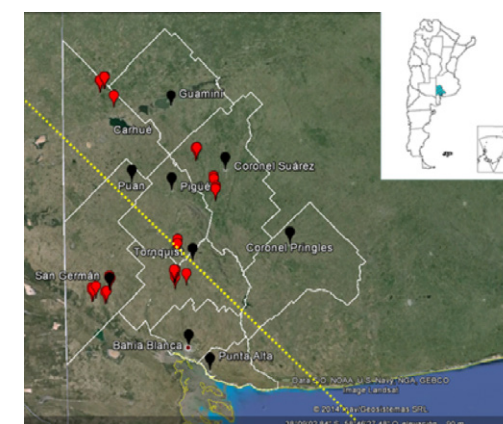
ESCALA: Predio

### Caracterización del agroecosistema e identificación de sus puntos críticos.

El área de estudio corresponde a la zona de influencia de la EEA INTA Bordenave (Fig. 1), que abarca una superficie aproximada de 4,3 millones de ha en el SO de la provincia de Buenos Aires, comprendida en la denominada Pampa Austral (Viglizzo, 2002).

En esta región se registra la transición entre las denominadas “pampa húmeda” y “pampa semiárida”, con lluvias que van decreciendo desde los 800 hasta los 500 mm de media anual en el sentido NE-SO. Al mismo tiempo se incrementa la frecuencia e intensidad de los vientos y la evapotranspiración (Cappaninni et al., 1978). La isohieta de 700 mm puede tomarse como referencia para dividir al área. Según el Mapa de Suelos de

**Figura 1.** Área de influencia de la EEA INTA Bordenave, puntos de muestreo (en rojo) y localidades cercanas (en negro). Fuente: elaboración propia en base a Imágenes Google Earth, captura 29/9/14. La línea punteada esquematiza la isohieta de 700 mm.



1. INTA, Estación Experimental Bordenave, 8187, Buenos Aires, Argentina

la provincia de Buenos Aires (SAGyP-INTA, 1989), predominan suelos del orden Molisoles: Hapludoles y Argiudoles al NE, y Haplustoles y Argiustoles al SO. En ambas zonas coexisten sedimentos de texturas que van desde franco arcillosa hasta franco arenosa. En la mayor parte de la región, una capa subsuperficial de carbonato de calcio consolidado (“tosca” u horizonte petrocálcico), limita la profundidad efectiva de los suelos y, junto con el clima, condiciona su productividad.

Los sistemas productivos son, en general, de carácter mixto. Predomina la agricultura en el NE, y la ganadería en el SO. En la zona NE, con mayores precipitaciones y menor evapotranspiración relativas, se realizan cultivos de verano (soja, girasol, maíz, sorgo), e invierno (trigo, cebada, avena). Por influencia del proceso de agriculturización general de la región pampeana la actividad ganadera se ha visto reducida, siendo confinada a corrales de engorde o suelos de escasa aptitud. La excesiva presión sobre suelos

agrícolas con escasa reposición de nutrientes, y la sobrecarga animal en suelos marginales, son los principales causantes de los procesos de degradación de suelos.

En la zona SO la alta variabilidad de las precipitaciones, combinada con escasa capacidad de retención de agua de los suelos determina el predominio de la actividad ganadera de cría y recría, sobre pastizales naturales y cultivos forrajeros anuales como avena y centeno. La agricultura se limita a los cultivos de trigo, cebada y avena. El manejo del suelo constituye el punto crítico del sistema productivo, al no respetar la aptitud de uso y/o realizar labranzas mecánicas, que lo refinan y lo dejan expuesto a procesos erosivos.

Estudios recientes (Zilio, 2015) han recabado información de numerosos parámetros físicos y químicos para obtener el Conjunto Mínimo de Indicadores (CMI) adecuados para el sudoeste de la Provincia de Buenos Aires (Tabla 1).

<b>COT</b>	Carbono orgánico total
<b>COPg</b>	Carbono orgánico particulado grueso (2000 - 100 μ )
<b>COPf</b>	Carbono orgánico particulado fino (100 - 50 μ )
<b>COM</b>	Carbono ligado a la fracción mineral (< 50 μ )
<b>IE<sub>COT</sub></b>	Índice Estructural o índice de Pieri para COT
<b>IE<sub>COPg</sub></b>	Índice Estructural o índice de Pieri para COPg
<b>IE<sub>COPf</sub></b>	Índice Estructural o índice de Pieri para COPf
<b>IE<sub>COM</sub></b>	Índice Estructural o índice de Pieri para COM
<b>EE</b>	Estabilidad estructural

**Tabla 1:** Conjunto Mínimo de Indicadores (CMI) para suelos molisoles del SO de la provincia de Buenos Aires bajo sistemas de producción mixtos.

### Obtención de los indicadores

El fraccionamiento físico del COT se realizó en base a los lineamientos descriptos por Galantini (2005) con algunas modificaciones, por ejemplo la utilización del tamiz vibratorio SPARTAN Analysette 3, con tamices homologados marca FRITSCH (ISO 9001), de 50, 100 y 2000 μm. El tiempo de tamizado varió entre 5 y 7 minutos, dependiendo de la textura y se culminó cuando el agua de descarte se tornó translúcida. En las dos fracciones mayores, se determinó el contenido de CO y por diferencia con el valor obtenido para suelo entero se calculó el correspondiente al COM. Cada una de las fracciones, denominadas: COM, COP fino (COPf) y COP grueso (COPg), fue ponderada y expresada como porcentaje del suelo entero.

Para el cálculo del IE fue necesaria la determinación de textura, que se realizó por el método del hidrómetro (Bouyoucos, 1965).

Para Estabilidad Estructural se utilizaron dos métodos: De Leenheer y De Boodt (1959), y Le Bissonnais et al. (2002) sobre muestras sin disturbar secadas al aire.

En el primer caso se calculó el cambio del diámetro medio ponderado (CDMP en mm) por diferencia entre el DMP en seco y en húmedo. En el segundo caso, se calculó el diámetro medio ponderado (DMP, en mm), obtenido luego de tres pretratamientos aplicados a la muestra de manera independiente: humedecimiento rápido, humedecimiento lento y disgregación mecánica por agitación después del humedecimiento len-

to. Se utilizó el protocolo descrito en “Metodología de muestreo de suelo y ensayos a campo” (Cazorla et al., 2012).

El muestreo comprendió lotes inalterados y lotes agropecuarios con manejos agronómicos comunes para cada zona (Valores de referencia, VR), aunque con variaciones en los niveles de insumos y tecnología utilizados.

La importancia relativa de cada indicador se estudió con análisis multivariado, para detectar aquellos más efectivos en la separación de las situaciones de manejo evaluadas. El análisis discriminante lineal para las determinaciones realizadas en capa 0-10 cm, reagrupó la variabilidad de la información y calificó a los parámetros evaluados según su capacidad para agrupar tratamientos de acuerdo a los factores suelo y manejo. Diferenció los suelos de textura más fina respecto de los de textura más gruesa, según la primera función discriminante que reunió el 59 % de la variabilidad. La segunda función discriminante reunió el 18% de la variabilidad, y diferenció el manejo Inalterado respecto del de referencia.

A continuación, se detallan los resultados de los indicadores obtenidos en situaciones inalteradas y bajo uso agropecuario (Fig. 2 y 3) para los suelos del ambiente subhúmedo (Tabla 2) y semiárido (Tabla 3). No se han determinado al presente, valores umbrales para los indicadores seleccionados, a partir de los cuales se deberían implementar medidas de manejo conservacionistas.

**Tabla 2:** Valores de referencia (VR) y valores correspondientes a la situación inalterada (In), para el CMI de suelos bajo sistema mixto (agrícola-ganadero) de la zona subhúmeda del SO de Buenos Aires para suelos Franco arcillosos: Argiudol, y Franco arenosos: Hapludol.

Indicador	Unidad de medida	Método de determinación	ARGIUDOL		HAPLUDOL	
			In	VR	In	VR
COT	g kg <sup>-1</sup>	Walkey y Black	30,4	21,9	19,8	9,70
COPg	g kg <sup>-1</sup>	Galantini, 2005, con modificaciones	1,67	1,35	6,93	1,68
COPf	g kg <sup>-1</sup>		8,33	3,01	2,70	0,88
COM	g kg <sup>-1</sup>		20,4	17,55	10,2	7,10
IE <sub>COT</sub>	adimensional	Pieri, 1995 IE = (CO*1,754 (g kg <sup>-1</sup> ) / arcilla + limo (g kg <sup>-1</sup> ) * 100	7,29	5,08	10,45	5,28
IE <sub>COPg</sub>			0,41	0,31	3,67	0,92
IE <sub>COPf</sub>			1,98	0,70	1,42	0,49
IE <sub>COM</sub>			4,89	4,07	5,37	3,86
EE	mm	Le Bissonnais	2,60	1,76	2,07	1,11
CDMP	mm	De Leenher y De Boodt (1954)	0,39	0,76	0,54	0,91

**Tabla 3:** Valores de referencia (VR,) y valores correspondientes a la situación inalterada (In), para el CMI de suelos bajo sistema mixto (ganadero-agrícola), de la zona semiárida del SO de Buenos Aires para suelos Haplustoles y Franco arcillosos y Franco arcillo limosos.

Indicador	Unidad de medida	Método de determinación	HAPLUSTOL			
			Franco arcilloso		Fco. arc. lim.	
			In	VR	In	VR
COT	g kg <sup>-1</sup>	Walkey y Black	23,3	16,7	12,2	8,45
COPg	g kg <sup>-1</sup>	Galantini, 2005, con modificaciones	5,13	1,80	1,93	1,95
COPf	g kg <sup>-1</sup>		3,97	2,12	1,23	0,75
COM	g kg <sup>-1</sup>		14,2	12,80	9,07	5,83
IE <sub>COT</sub>	adimensional	Pieri, 1995 IE = (CO*1,754 (g kg <sup>-1</sup> ) / arcilla + limo (g kg <sup>-1</sup> ) * 100	6,79	4,60	5,45	4,13
IE <sub>COPg</sub>			1,49	0,50	0,91	0,98
IE <sub>COPf</sub>			1,14	0,58	0,55	0,35
IE <sub>COM</sub>			4,17	3,52	3,99	2,83
EE	mm	Le Bissonnais	2,85	1,88	1,65	1,00
CDMP	mm	De Leenher y De Boodt (1954)	0,31	0,80	0,61	1,18

**Figura 2.** Suelo inalterado con vegetación natural (izquierda), y suelo bajo cultivo de soja en siembra directa (derecha), en la zona subhúmeda del SO de Buenos Aires.



**Figura 3.** Suelo inalterado bajo vegetación de stipas (izquierda), y suelo bajo cultivo forrajero con labranza mecánica (derecha) en la zona semiárida del SO de Buenos Aires.



### Alertas de procesos de degradación y propuestas de manejo.

De la comparación de los valores de los indicadores para suelos inalterados y bajo uso agropecuario surge que las dos zonas muestran importantes pérdidas de carbono orgánico y, consecuentemente, de la estabilidad estructural por efecto de la actividad agropecuaria. Las pérdidas han sido comparativamente mayores en la zona subhúmeda respecto de la semiárida, y en los suelos de textura más gruesa respecto a los franco arcillosos.

Las pautas de manejo a proponer en estas circunstancias dependen de la zona. En la zona subhúmeda al N pasan por disminuir la presión agrícola, incrementando el uso de secuencias de cultivos que aporten carbono al suelo. Volver al sistema de rotación con pasturas perennes sería el manejo ideal. La respuesta a la tecnología de insumos es más segura en esta zona que en la semiárida; sin embargo los niveles de fertilización resultan insuficientes para asegurar la reposición de los nutrientes extraídos por los cultivos, hecho que debe corregirse.

En la zona semiárida, la variabilidad climática y los menores niveles de producción justifican el predominio de tecnologías de procesos respecto de las de insumos, aunque sin descuidar el balance de nutrientes. Se debe reducir la intensidad de labranzas, manteniendo el suelo cubierto de residuos para evitar la erosión, y lograr un balance de carbono más equilibrado sobre la base de la asignación de cultivos (perennes y anuales), en función de la aptitud de uso de los suelos. Aquí el manejo por ambientes, con la capacidad de retención de agua como variable determinante, puede producir un impacto importante sobre los niveles de producción y la sustentabilidad de las actividades agropecuarias.

### Bibliografía

BOUYOUCOS, G.J. 1965. Hydrometer Method Improved for Making Particle Size Analyses of Soils. *Agron. J.* 54: 464-465.

CAPPANNINI, DA.; C.O. SCOPPA & J.R. VARGAS GIL. 1978. Capítulo 1: Fisiografía, estratigrafía y geomorfología. En: F Spinelli Zinni (ed.). Estudio de situación del partido de Coronel Pringles, Provincia de Buenos Aires, República Argentina. P.imprenta: INTA. Buenos Aires, Argentina.

CAZORLA, C; J.J. DE BATTISTA; M. FERRARI; O. GUIDELJ; A. QUIROGA; M.C. SASAL; M. TABOADA y M. WILSON. 2012. Metodología de muestreo de suelo. Protocolo básico común: Estructura del suelo. En: Metodología de muestreo de suelo y ensayos a campo. Protocolos básicos comunes. Santos DJ; MG Wilson y M Ostinelli (Eds.). Ediciones INTA.

DE LEENHEER, L. & DE BOODT, M. 1959. Determination of aggregate stability by the change in mean weight diameter. En: Proceedings of the International Symposium on Soil Structure. Medeligen van de Landbouhogeschool, Ghent. pp. 290-300.

GALANTINI, J.A. 2005. Separación y análisis de las fracciones orgánicas. En: Manual Tecnología en

Análisis de Suelos: alcances a laboratorios agropecuarios. Marban y L & S. Ratto (Eds.) 1° edn. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. - Buenos Aires, pág. 215.

LE BISSONNAIS, Y; O. DUVAL & H. GAILLARD. 2002. Fiche de protocole: Mesure de la stabilité d'agrégats de sols. INRA Orléans, Institut de Science du Sol.

PIERI, C. 1995. Long-term soil management experiments in semi-arid Francophone Africa. En: Lal, R. y B. Steward (Eds.). Soil Management: experimental basis for sustainability and environmental quality. Lewis Publishers-CRC. FL, USA. 266 pp.

SAGyP-INTA, 1989. Mapa de Suelos de la Provincia de Buenos Aires. Escala 1:500.000. Proyecto PNUD / ARG / 85 / 019.

VIGLIZZO, E.F; AJ Pordomingo; MG Castro & FA Lértora. 2002. La sustentabilidad ambiental del agro pampeano. Programa Nacional de Gestión Ambiental Agropecuaria, INTA.

ZILIO, J.P. 2015. Aspectos de calidad de suelos del sur de la Provincia de Buenos Aires y efectos de la actividad agropecuaria sobre la misma. Tesis Magister en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Sur.

## Ecorregión Pampeana Sudeste de la Provincia de Buenos Aires

SISTEMA PRODUCTIVO: Agrícola-Ganadero

Virginia Aparicio<sup>1</sup> y Jose Luis Costa<sup>1</sup>

SUELOS: Argiudoles y Paleudoles petrocálcicos

### Caracterización del agroecosistema e identificación de sus puntos críticos.

La región pampeana argentina comprende una extensión de 60 millones de hectáreas, de las que, aproximadamente el 90 % son tierras de aptitud agrícola y agrícola-ganadera.

El Sudeste de la Provincia de Buenos Aires tiene una temperatura media anual de 13.3 °C y el período medio libre de heladas abarca desde principios de octubre a mediados de mayo. Posee un régimen hídrico subhúmedo – húmedo (Thornthwaite 1948). Su régimen pluviométrico presenta tres estaciones: a) lluviosa de octubre a marzo, b) moderadamente lluviosa en los meses de abril, mayo y septiembre y c) poco lluviosa de junio a agosto (Suero et al., 2001). Su precipitación media es del orden de los 900 mm año<sup>-1</sup>.

El sistema productivo predominante es mixto agrícola – ganadero. Se caracteriza por una actividad ganadera basada principalmente en la producción de carne bovina y leche y una agricultura donde los principales cultivos de cosecha son trigo, girasol, maíz, soja y papa. Los sistemas de labranza utilizados en la zona son principalmente siembra directa (SD), labranza reducida (LR) y labranza convencional (LC).

Entre los sistemas productivos de alta aplicación de tecnología puede encontrarse a los cultivos de girasol, maíz y soja bajo SD (RIAN, 2008). Actualmente, sólo el 6 % de la superficie agrícola se siembra con pastura, esa proporción equivaldría a una rotación de 4 años de pastura

1. INTA, Estación Experimental Balcarce. 7620, Buenos Aires, Argentina.

y 19 años de agricultura (*preocupación vinculada al caso 1*).

La SD, que surge en la década de 1960 luego de la invención del 2,4-D y del desarrollo del paraquat, ha ganado aceptación en Sudamérica a un ritmo más rápido que en EE. UU. Los países sudamericanos con mayor superficie bajo SD son Brasil, Argentina y Chile (Lal et al. 2007). Sin embargo, el sudeste de la Provincia de Buenos Aires no es un reflejo de esa situación, donde la adopción de SD ha sido más dilatada en el tiempo (*preocupación vinculada al caso 2*).

Por otra parte, situándonos en un ambiente con condiciones climáticas y edáficas muy favorables a la producción de productos primarios, es que se diseña el Plan Estratégico Agroalimentario con una meta de aumentar la producción de granos en Argentina del 14% (PEA 2010). La tecnología del riego suplementario es una de las prácticas propuestas para lograr esa meta y en los últimos años se produjo un aumento significativo de su adopción (*preocupación vinculada al caso 3*). Sin embargo, en el sudeste de la provincia de Buenos Aires, la fuente más común de agua de riego es de origen subterránea y se caracteriza por su alto contenido de bicarbonato de sodio, que provoca conocidos perjuicios al suelo por el efecto del sodio como dispersante de las arcillas, entre otros.

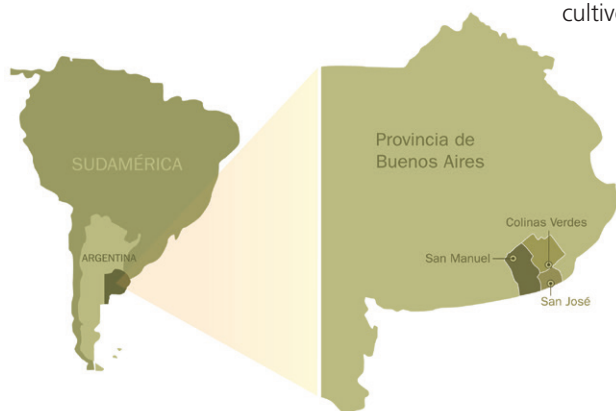
**Los indicadores de la calidad de suelo se conciben como una herramienta de medición que debe ofrecer información sobre las propiedades, los procesos y las características del suelo.** Estos se miden para monitorear los efectos del manejo sobre el funcionamiento del suelo en un periodo dado (Astier et al., 2002). Los indicadores de la calidad del suelo pueden ser las propiedades físicas, químicas y biológicas, o los procesos que ocurren en él (SQI, 1996).

**La selección de indicadores está en función del proceso de degradación que se esté estudiando.** A continuación presentamos algunos casos de estudio desarrollados en el sudeste bonaerense, que fueron inquietudes del sector productivo regional abordados conjuntamente con el INTA Balcarce.

**Caso 1**  
**La incorporación de agricultura continua ¿puede afectar las propiedades físicas-químicas de los suelos?**

Para responder esta interrogante trabajamos conjuntamente con tres establecimientos rurales de la zona (figura 1) y nos planteamos los siguientes objetivos:

1. evaluar la relación entre parámetros físicos y químicos del suelo (cuadro 1),
2. identificar los indicadores de calidad de suelos, sensibles a los cambios en sistemas de cultivo continuo en Argentina.



**Figura 1.** Mapa con la ubicación de los tres establecimientos rurales en los que se realizó el trabajo

En este trabajo se observó una disminución de la conductividad hidráulica ( $R^2=0.7$ ) y un aumento del cambio de diámetro medio ponderado ( $R^2= 0.36$ ) a medida que se avanzaba en el número de años bajo agricultura continua (Aparicio y Costa, 2007).

**Tabla 1:** Indicadores evaluados, unidad de medida y método de determinación.

Indicador	Unidad de medida	Método de determinación
Conductividad Hidráulica	mm h <sup>-1</sup>	Infiltrómetro de disco
Densidad aparente	Mg m <sup>-3</sup>	Método del cilindro
Resistencia Mecánica a la Penetración	MPa	Penetrómetro digital
Cambio de Diámetro Medio Ponderado	mm	De Leenher and de Boodt (1959) Pipeta de Robinson
Textura	%	Pipeta de Robinson
Curva de retención hídrica	Kg kg <sup>-1</sup>	Ollas de Richard
S de Dexter	adimensional	Cálculo
Densidad Aparente Máxima	Mg m <sup>-3</sup>	Test Proctor
Materia Orgánica	%	Walkley y Black
Capacidad de Intercambio Catiónico	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	Acetato de Amonio a pH 7
pH	adimensional	Potenciométrico (solución 1 : 2,5)

El modelo generado por el procedimiento stepwise, con  $R^2=0.65$  y  $P > 0.001$  fue el siguiente:

$$AAC = -1.39 + 30.23 CDMP - 47.71 S + 0.88 CIC$$

Dónde: **AAC** = años de agricultura continua; **CDMP** = cambio del diámetro medio ponderado (mm); **S** = parámetro de la calidad física de Dexter; **CIC** = capacidad del intercambio catiónico.

La integración de indicadores en este trabajo permitió enfatizar la importancia del **CDMP**, **S de Dexter** y a la **CIC** del suelo para evaluar el funcionamiento del suelo bajo distintos años de agricultura continua.

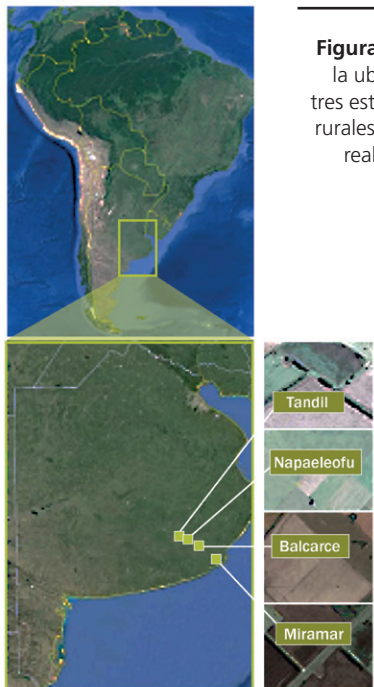
Fue posible además, alertar sobre la posibilidad de degradación física de los suelos al incorporarlos a agricultura continua.



**Caso 2**  
**La incorporación de la siembra directa ¿puede afectar las propiedades físicas de los suelos?**

Para responder esta interrogante trabajamos conjuntamente con cuatro establecimientos rurales de la zona (figura 2) por un período de 10 años y nos planteamos evaluar:

1. el cambio de diámetro medio ponderado (CDMP), la conductividad hidráulica y contenido de carbono orgánico en la secuencia de cultivo de trigo-maíz-girasol en tres sistemas de labranza;
2. si el tamaño de poro está afectando las diferencias en la densidad aparente observadas en tres sistemas de labranzas y su relación con la conductividad hidráulica del suelo;
3. el rendimiento de la secuencia de cultivos trigo-maíz-girasol durante 10 años.



**Figura 2.** Mapa con la ubicación de los tres establecimientos rurales en los que se realizó el trabajo.

En este trabajo se observó una modificación en las propiedades del suelo debidas a la práctica de agricultura continua bajo la secuencia trigo-maíz – girasol en los tres sistemas de labranza predominantes en la zona (Costa et al., 2015). Si bien el sistema de labranza no tuvo efecto en los rendimientos, se observó que:

1. Los valores de **densidad aparente** mostraron una tendencia a disminuir con el tiempo en los tres sistemas labranza.
2. En SD, la densidad aparente del suelo fue significativamente mayor comparada con LC y LR **alertando sobre la compactación del suelo bajo SD.**
3. Los valores de CDMP aumentaron a través del tiempo, lo que implica una disminución en la estabilidad estructural de los suelos debido a las actividades agrícolas. Este resultado se observó en todos los sistemas de labranza, siendo más importante el aumento de este indicador cuando más intensivo fue el sistema de labranza aplicado (LC > LR > SD).
4. La reducción de la conductividad hidráulica del suelo se observó en el rango de los mesoporos del suelo y fue consistente con un bajo valor de porosidad estructural y un alto valor de densidad aparente para los tratamientos evaluados. Los autores podemos concluir que **la reducción de la porosidad total bajo SD es principalmente producto de una reducción en el porcentaje de mesoporos del suelo.**
5. El contenido de carbono orgánico no presentó diferencias a través del tiempo en ninguno de los sistemas de labranza evaluados. Esto significa que **el contenido de carbono orgánico no constituye un indicador sensible a los cambios, durante el período de 10 años que duró el trabajo de investigación.**

**Caso 3**  
**La incorporación del riego suplementario con aguas bicarbonatadas sódicas ¿puede degradar el suelo?**

En el sudeste bonaerense, es muy frecuente observar erosión hídrica en lotes bajo riego suplementario, que comienza por un desplazamiento de rastrojo superficial y termina produciendo importantes cárcavas (Figura 3).

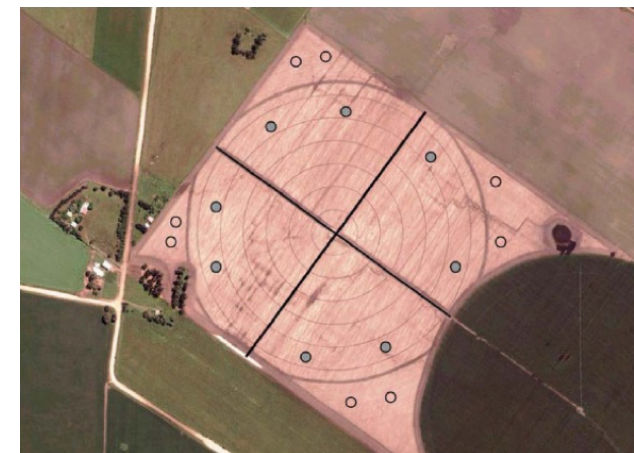


**Figura 3.** Fotos de lotes bajo riego con pivot (derecha) y lote con erosión hídrica (izquierda)

Ante estas evidencias visuales y para responder esta interrogante evaluamos la calidad de agua para riego, en condiciones de lluvia combinada con riego.

Para desarrollar esta actividad se seleccionó como indicador físico a la **conductividad hidráulica** de los suelos y se midió el impacto del agua de lluvia sobre este indicador en suelos

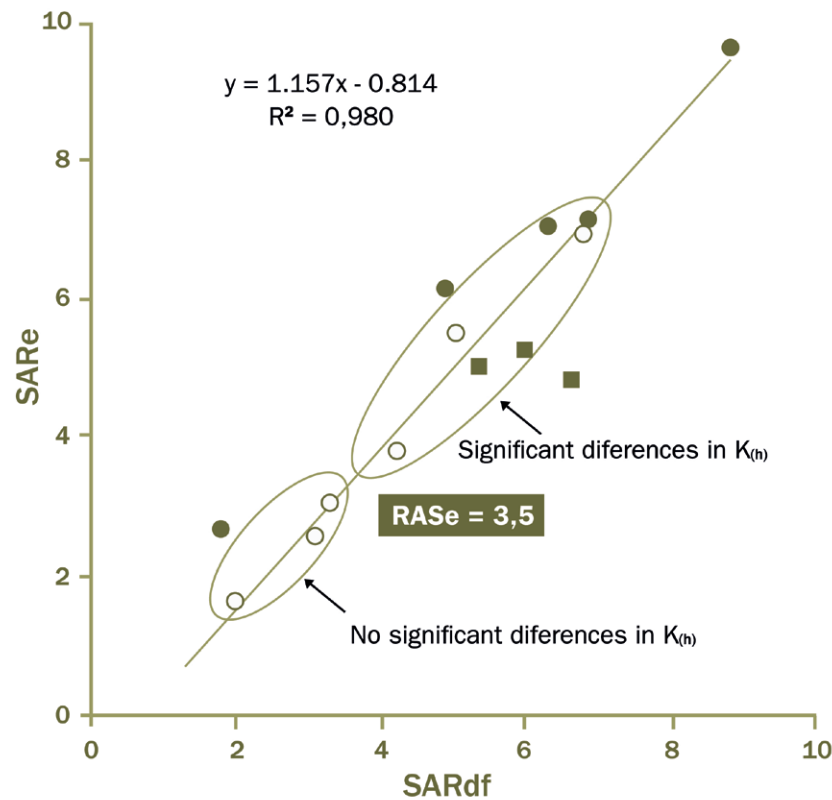
regados con aguas bicarbonatadas sódicas. Además, de realizaron determinaciones de laboratorio tales como: 1- Relación de Adsorción de Sodio (RAS); 2- Porcentaje de Sodio de Intercambio (PSI); 3- Conductividad Eléctrica (CE); 4- pH; 5- Capacidad de intercambio catiónico (CIC) y cationes intercambiables (CI) según el diseño de muestreo que se observa en la Figura 4.



**Figura 4.** Foto con posiciones de determinación de la conductividad hidráulica dentro y fuera de un lote bajo riego con pivot central (cada punto representa una estación de muestreo).

En este trabajo, partiendo de un indicador físico de la calidad de suelo (conductividad hidráulica: Kh) logramos establecer un umbral químico (relación de adsorción de sodio en el extracto de saturación: RAS<sub>e</sub>) que, corregida por el factor de

dilución con agua de lluvia (RAS<sub>d</sub>) nos permite brindar una recomendación concreta de manejo del riego suplementario en el sudeste (Figura 5, Costa y Aparicio, 2015).



**Figura 5.** Relación entre la relación de adsorción de sodio (RAS) del agua de riego teniendo en cuenta el factor de dilución del agua de lluvia (RAS<sub>d</sub>) frente a la relación de adsorción de sodio del extracto de saturación (RAS<sub>e</sub>). Puntos llenos adaptados de Aparicio et al. (2014), cuadrados llenos adaptados de Costa (1999), y los círculos vacíos corresponden a los datos obtenidos en este estudio.

Básicamente se propuso el cálculo del Factor de Dilución (FD):

$$FD = \frac{Riego_4}{Lluvia_4 + Riego_4}$$

El factor de dilución, aplicado al manejo del riego es un concepto muy novedoso. En la siguiente tabla (Tabla 2) se observa la lámina máxima a aplicar cada 4 años en función de la calidad de agua para riego (RAS<sub>w</sub>) para no superar el RAS<sub>e</sub> = 3.5.

RAS <sub>w</sub>	Riego (mm/4 años)
20	139
17,5	183
15	254
12,5	378
10	627
7,5	1290
5	5260

**Tabla 2.** Valor de relación de adsorción de sodio del agua (RAS<sub>w</sub>) y lámina de riego a aplicar (mm / 4 años) en el sudeste bonaerense.

**Consideraciones finales**

El término 'calidad del suelo' se comenzó a usar al reconocer sus funciones (Doran y Parkin, 1994; Karlen et al., 1997):

- Promover la productividad del sistema sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas (productividad biológica sostenible).
- Atenuar los contaminantes ambientales y los patógenos (calidad ambiental).
- Favorecer la salud de las plantas, los animales y los humanos.

Los **indicadores de la calidad de suelo** se conciben como **una herramienta de medición y monitoreo** que debe ofrecer información sobre las propiedades y los procesos que tiene lugar en el suelo para lo cual se requiere:

- Conocer la **multifuncionalidad del suelo**, inserto en un agro-ecosistema,
- Conocer la **variabilidad espacial del suelo**, dado que se han reportado importantes diferencias de las características edáficas intra-lote (Córdoba et al., 2012; Bosh Mayol et al., 2012; Simón et al., 2013, Paggi et al., 2013, Peralta et al., 2015; Castro Franco et al., 2015; Cicore et al., 2015). **La variabilidad espacial podría jugar un rol muy importante a la hora de evaluar calidad de suelo a través del tiempo** (monitoreo en puntos geo-referenciados).
- Considerar la incorporación de indicadores que permitan monitorear la presencia de contaminantes ambientales, de uso muy frecuente en los sistemas productivos actuales, dado que se han reportado concentraciones de plaguicidas en sistemas productivos de la zona (Aparicio et al., 2013).

## Bibliografía

APARICIO, V. C., A. BARBACONE, COSTA J. L. 2014. Efecto de la calidad de agua para riego complementario sobre algunas propiedades químicas edáficas. *Ciencia del Suelo* 32:95-104.

APARICIO V.C., E. DE GERÓNIMO, D. MARINO, J. PRIMOST, P. CARRIQUIRIBORDE, J. L. Costa. 2013. Environmental fate of glyphosate and aminomethylphosphonic acid in surface waters and soil of agricultural basins. *Chemosphere*. 93:1866-1873.

APARICIO, V., COSTA, J. L. 2007. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. *Soil Tillage Res.* 96:155-165.

ASTIER-CALDERÓN, M., MAASS-MORENO, M., ET-CHEVERS-BARRA, J., 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia*. 36 (5):605. 2002.

BOSCH MAYOL, Matias; José Luis COSTA; Fabián Néstor CABRIA & Virginia Carolina APARICIO. 2012. Relación entre la variabilidad espacial de la conductividad eléctrica y el contenido de sodio del suelo. *Ciencia del Suelo*, 30:95-105.

CASTRO FRANCO, M.; COSTA, J.L.; PERALTA, N.R.; APARICIO, V. 2015. Prediction of Soil Properties at Farm Scale Using a Model-Based Soil Sampling Scheme and Random Forest. *Soil Science*. 180: 74-85.

CICORE P. L., H. SANCHEZ, N. R. PERALTA, M. CASTRO FRANCO, V. C. APARICIO, J. L. Costa. 2015. Delimitación de ambientes edáficos en suelos de la pampa deprimida mediante la Conductividad eléctrica aparente y la elevación. *Ciencia del Suelo*. (En Prensa).

CÓRDOBA M. M. BALZARINI, C. BRUNO, J. L. COSTA. 2012. Identificación de zonas de manejo sitio-específico a partir de la combinación de variables de suelo. *Revista Corpoica - Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 13:47-54.

COSTA J. L., V. C. APARICIO. 2015. Quality assessment of irrigation water under a combination of rain and irrigation. *Agricultural Water Management* 159:299-306.

COSTA, J.L., APARICIO, V., and CERDÀ, A. 2015. Soil physical quality changes under different management systems after 10 years in the Argentine humid pampa. *Solid Earth*, 6, 361-371, doi:10.5194/se-6-361-2015.

COSTA, J.L. 1999. Effect of irrigation water quality under supplementary irrigation on soil chemical and physical properties in the "southern humid pampas" of Argentina. *Journal of Crop Production* 2:85-99.

DORAN, J.W. et al. Defining soil quality for a sustainable environment. *Soil Science Society of America, Inc. Special Publication No. 35*. Madison, Wisconsin, USA. 244 p. 199445.

KARLEN, D.L. et al. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. *Soil Science Society of America J.* 61:4. 1997

LAL R., REICOSKY, D. C., and HANSON, J. D.: Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. *Soil Till. Res.* 93, 1-12, 2007.

PAGGI, M; PERALTA, N.R.; CALANDRONI, M.; CABRIA, F; COSTA, J.L.; APARICIO, V. 2013. Identificación de series de suelos mediante el uso de sensores de conductividad eléctrica aparente en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 31:175-188.

PERALTA N. R., P. L. CICORE, M. A. MARINO, J. R. MARQUES DA SILVA and J. L. COSTA. 2015. Use of geophysical survey as a predictor of the edaphic properties variability in soils used for livestock production. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 13 (4), e1103

SQI-Soil Quality Institute. 1996. Indicators for Soil Quality Evaluation. USDA Natural Resources Conservation Service. Prepared by the National Soil Survey Center in cooperation with The Soil Quality Institute, NRCS, USDA, and the National Soil Tilth Laboratory, Agricultural Research Service. USA.

THORNTHWAITE, C. W.: An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*. 55-94, 1948

SUERO, E.E., J.N. SANTA CRUZ, A Silvia BUSSO, A.I. DELLA MAGGIORA, A.I. IRIGOYEN, J.L. COSTA, J.M.

GARDIOL. 2001. Caracterización de los recursos naturales en sistemas bajo riego del sudeste bonaerense. *RIA* 30:71-89.

SIMON, M. PERALTA; N.R.; COSTA; J.L. 2013. Relación entre la conductividad eléctrica aparente con propiedades del suelo y nutrientes. *Ciencia del Suelo*. 31:45-55.

## Ecorregión Pampeana Este de La Pampa

SISTEMA PRODUCTIVO: Mixto (Agrícola-Ganadero)

Juan Cruz Colazo<sup>1</sup>; Juan de Dios Herrero<sup>1</sup> y Daniel Buschiazzo<sup>2</sup>

SUELOS: Haplustoles (Molisoles) y Psammentes (Entisoles)

### Caracterización del agroecosistema e identificación de sus puntos críticos.

La región semiárida central argentina (RSCA) presenta una temperatura media anual de 16 °C y precipitaciones medias anuales de 650 mm. En general, existe una asociación de suelos dominantes según la posición que ocupen en el paisaje, donde predominan Haplustoles Énticos, siendo el material parental de los suelos de origen eólico y edad cuaternaria. Tradicionalmente los sistemas de producción han sido mixtos (agrícola-ganaderos), y los cultivos más comunes trigo (*Triticum aestivum* L.), avena (*Avena sativa* L.), maíz (*Zea mays* L.) y girasol (*Helianthus annuus* L.). En los últimos años se ha incrementado la proporción de cultivos agrícolas en especial la superficie destinada a cultivos de verano. De éstos, la soja (*Glycine max*) es el cultivo de mayor su-

perficie implantada en las últimas tres campañas (SIIA, 2013). En este escenario existen procesos de degradación irreversibles característicos de zonas semiáridas como la erosión eólica, y procesos reversibles, asociados a la agriculturización, como la extracción de nutrientes, la pérdida de materia orgánica y la compactación (Buschiazzo, 2006; Quiroga et al., 1998).

Los indicadores de calidad de suelo (Tabla 1) fueron seleccionados en función de su relación con los procesos y funciones de suelo predominantes, la posibilidad de emplear valores críticos y la sensibilidad al manejo (Escala temporal = años). Para ello se efectuaron muestreos por triplicado, en catorce pares de suelos: un suelo cultivado (labranza convencional) y su contraparte un suelo

1. INTA, Estación Experimental San Luis. Villa Mercedes, 5730, San Luis, Argentina.

2. INTA, Estación Experimental Anguil. Anguil, 6326, La Pampa, Argentina.

sin cultivar (Caldenal), los cuales abarcaron un amplio gradiente textural (suelos arenosos a franco – limosos).

**Tabla 1:** Conjunto Mínimo de Indicadores (CMI). Sistema mixto agrícola-ganadero. Este de La Pampa.

<b>COT</b>	Carbono orgánico total
<b>Da</b>	Densidad aparente
<b>P<sub>E</sub></b>	Fósforo Extractable
<b>FE</b>	Fracción erosionable por el viento
<b>EES</b>	Estabilidad estructural en seco
<b>E<sub>A</sub></b>	Espesor del horizonte A

Los valores umbrales fueron identificados en función de la bibliografía y de las relaciones entre los indicadores y las funciones de suelo. COT: Valores críticos en relaciones no lineales con FE y EES (Colazo & Buschiazzo, 2010). DA: Fue determinado en función de la textura de los puntos de muestreo según los valores establecidos por Daddow & Warrington (1983) como limitantes para el crecimiento radicular. PE: Nivel de respuesta a la fertilización en la mayoría de los cultivos agrícolas. FE: Considerado como el equivalente necesario para mantener la erosión eólica por debajo de valores tolerables y EES: Valor empírico (Colazo & Buschiazzo, 2010).

**Tabla 2.** Valores umbrales (VU), de referencia (VR) y valores correspondientes a la situación inalterada (In), para el CMI de suelos bajo sistema mixto (agrícola-ganadero). Este de La Pampa.

Indicador	Unidad de medida	Método de determinación	In	VR	VU
<b>COT</b>	%	Walkey y Black	3,8	1,25	1 - 2,9 (min)
<b>Da</b>	g cm <sup>-3</sup>	Cilindro	1,05 (0,7 - 1,4)	1,22 (1 - 1,4)	1,75 - 1,45 (max)
<b>P<sub>E</sub></b>	mg kg <sup>-1</sup>	Bray 1	100,5	12,7	10 (min)
<b>FE</b>	%	Tamiz rotativo	20 (6 - 51)	26,5 (6 - 51)	40 (max)
<b>EES</b>	%	Tamiz rotativo	87 (58 - 95)	83 (54 - 98)	85 (min)
<b>E<sub>A</sub></b>	cm	Reconocimiento	23	16	-

Donde **min** y **max** indican valores mínimos y máximos requeridos, respectivamente. Entre paréntesis valores mínimos y máximos promedio de cada sitio (n=3).

### Alertas de procesos de degradación y propuestas de manejo

El concepto de sustentabilidad definido en el contexto de sistemas con predominio de procesos eólicos, como en nuestros suelos, puede resumirse como un balance neutro de la cantidad de suelo que ingresa y sale del sistema (Warren, 2010). En este sentido, la comparación de suelos cultivados y sin cultivar muestra que la erosión eólica ha disminuido la sustentabilidad de los sistemas de producción de la región. En este contexto, los suelos de textura media, son capaces de formar agregados no erosionables y estables que son eficientes para controlar la erosión en condiciones naturales. Este no es el caso de los suelos cultivados, que muestran agregados pequeños y débiles debido a la pérdida de cementantes orgánicos e inorgánicos. Aquellas prácticas de manejo que tiendan a incrementar los contenidos de CO y producir grandes agregados pueden ser eficientes en controlar la erosión eólica en estos suelos. Los suelos de textura fina, presentan grandes cantidades de agregados no erosionables y estables. No existen diferencias de manejo en estos suelos, a pesar de las pérdidas de CO. Esta falta de diferenciación fue atribuida a la alta presencia de cementantes orgánicos e inorgánicos en suelos vírgenes, y a la formación de terrones ("clods") gruesos y estables en suelos cultivados. En los suelos arenosos, la falta de cementantes orgánicos e inorgánicos no favorece la formación de agregados resistentes al viento, aún en condiciones naturales. Probablemente, las tecnologías que tiendan a incrementar los contenidos de CO por sí solas no serán efectivas en controlar la erosión eólica. Este objetivo debe ser logrado por el uso de tecnologías que tiendan a incrementar el uso de la cobertura en la superficie del suelo. Para disminuir la pérdida de materia orgánica en los sistemas actuales se sugiere una mayor implementación del sistema de siembra directa y de cultivos de cobertura in-

vernales en base a gramíneas. También es necesaria una gestión adecuada del fósforo que asegure la utilización de dosis apropiadas que permitan la rentabilidad de la sistemas productivos y la prevención de externalidades negativas (Ron, 2012).



**Figura 1.** Arriba: Sitio de muestreo donde se aprecia el suelo cultivado (barbecho) a la derecha y suelo sin cultivar a la izquierda (Caldenal). Abajo: Tratamiento sin cultivar.

## Bibliografía

BUSCHIAZZO, D.E. 2006. Management Systems in Southern South America. Pp. 395-425. In: Peterson, G.A., P.W. Unger & W.A. Payne (Eds.). Dryland Agriculture. 2nd Edition. Agron. Monogr. 23. ASA, CSSA & SSSA, Madison, USA. 1026 pp.

COLAZO, J.C. & D.E. BUSCHIAZZO. 2010. Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of Argentina. Geoderma 159: 228-236.

DADDOW, R.L. & G.E. WARRINGTON. 1983. Growth – limiting soil bulk densities as influenced by soil texture. Watershed systems development group report TN – 00005. WSDG – USDA forest service. Fort Collins, USA. 14 pp.

QUIROGA, A.R., D.E. BUSCHIAZZO & N. PEINEMANN. 1998. Management Discriminant properties in Semiarid Soils. Soil Sci. 163: 591-597.

RON, M.M. 2012. Gestión del fósforo en sistemas agropecuarios del sudoste bonaerense. AgroUNS 17: 9 -12.

SIIA (Sistema integrado de información agropecuaria). 2013. Agricultura. Disponible en: <http://www.sia.gov.ar>

WARREN, A. 2010. Sustainability in aeolian systems. Aeolian Res. 1: 95 – 99.

En el presente Manual quedan plasmados los avances logrados a través de las últimas dos carteras de proyectos de INTA, enmarcados en el anterior Programa Nacional Ecorregiones y el actual Programa Nacional Suelo. El aporte de los grupos de investigación activos de INTA de diferentes puntos del territorio, en articulación con investigadores de reconocida trayectoria de otras instituciones, valoriza el alcance de la obra.

El uso del suelo produce alteraciones estructurales y funcionales que condicionan su productividad, siendo prioritario su conocimiento y cuantificación, a través de la identificación de indicadores que representen los diferentes estados, trayectorias y tendencias. La calidad del suelo debe mantenerse, a largo plazo, dentro de ciertos límites que garanticen la capacidad productiva del recurso de forma económicamente viable. Los indicadores de calidad de suelo constituyen herramientas que permiten visualizar el origen de los procesos de degradación y, a partir de esto, delinear pautas de manejo que tiendan a mitigarlos o revertirlos. En tal sentido, esta obra aporta elementos técnico-científicos para la generación de alertas tempranas de procesos de degradación del suelo y la instrumentación de políticas adecuadas de planificación del uso de la tierra.

El Manual está estructurado en dos grandes capítulos. El primero, referido a aspectos generales, comprende quince subcapítulos en los que se plantea y discute el enfoque de la temática, se recopila una década de investigación en la Argentina y se aportan herramientas matemáticas y estadísticas para la obtención de indicadores de calidad del suelo, la definición de sus valores umbrales y el desarrollo de protocolos de monitoreo. Los indicadores, como así también sus valores umbrales, deben ser desarrollados localmente para cada binomio suelo-sistema productivo. Es así que en el segundo capítulo se presentan veintidós casos donde se definen los conjuntos mínimos de indicadores de calidad del suelo para los sistemas productivos más relevantes de las seis ecorregiones del país. En cada subcapítulo se caracteriza el agroecosistema, se identifican sus puntos críticos, se presentan los indicadores seleccionados y sus valores umbrales, y se proponen prácticas tecnológicas, de manejo o de organización para lograr la seguridad de los suelos, la sustentabilidad de los sistemas productivos y el fortalecimiento de las economías regionales.



Ministerio de Agroindustria  
Presidencia de la Nación