

ÁRBOL DE DECISIÓN PARA DIAGNOSTICAR LA CAPACIDAD PRODUCTIVA DE SUELOS DE LA REGIÓN PAMPEANA

GERARDO RUBIO^{1*} & MIGUEL A TABOADA²

Recibido: 03-06-13

Recibido con revisiones: 25-09-13

Aceptado: 26-09-13

RESUMEN

Los suelos constituyen un *continuum* a través de la superficie terrestre. Cada combinación específica de paisaje, clima, material parental, proceso de meteorización, vegetación y manejo determina diferentes unidades de suelo. En suelos agrícolas, la distinción entre diferentes unidades de suelo suele ser muy compleja y requiere experiencia de campo. De hecho, tanto estudiantes de grado en las Universidades como profesionales poseen dificultades para diagnosticar la aptitud de los suelos para la producción de cultivos. Con el objeto de facilitar la identificación de la aptitud productiva de las diferentes unidades de suelo, se ha desarrollado un árbol de decisión o cursograma, con énfasis en los suelos pampeanos. La Región Pampeana argentina es la más productiva en términos agrícolas y varios de sus suelos son considerados dentro de los más fértiles del planeta. Sin embargo, éstos se encuentran distribuidos en el paisaje formando un intrincado patrón con otros menos productivos. El árbol de decisión fue organizado en dos pasos sucesivos (1: Paisaje; y 2: Perfil del suelo), que conducen al paso final 3: Nivel de aptitud para cultivos. El análisis de paisaje incluye la frecuencia de anegamientos, la presencia de suelos arenosos y la pendiente. El análisis del perfil de suelo comienza con la identificación de las principales limitantes: salinidad, sodicidad, anegamiento, impedancias mecánicas, y el espesor del horizonte superficial. Esperamos que esta nueva herramienta, diseñada para estudiantes de grado y profesionales pueda ser utilizada para hacer un primer diagnóstico de suelos.

Palabras clave. Diagnóstico, Hidromorfismo, Halomorfismo, Profundidad Efectiva, Composición Textural.

DECISION TREE FOR DIAGNOSING SOIL PRODUCTIVE CAPACITY IN THE PAMPAS REGION

ABSTRACT

Soils are a continuum across Earth's surface. Each specific combination of landscape, climate, parent material, weathering process, vegetation and management determines different soil units. In agricultural soils, the distinction among different soil units is often very complex and requires some field experience. In fact, many graduate students and professionals have difficulties to diagnose soil capacity for crop production. With the aim of facilitating the identification of different soil units, we have developed a decision tree with emphasis in soils of the Pampas region. This region is the most productive in terms of crop production in Argentina and many of its soils are among the most fertile on Earth. However, these soils are often intermingled with other less productive soils. The proposed decision tree was organized in two successive paths as follows: 1= Landscape; and 2= Soil profile, which lead to the final path 3= Extensive cropping capability. Landscape analyses include ponding/flooding frequency, the occurrence of sandy soils and slope type. The analysis of soil profiles starts with the identification of the main soil limiting factors, such as salinity, sodicity, waterlogging, mechanical impediments, and surface horizon depth. This new tool, designed for graduate students and professionals, should be easier to use than traditional tools based on an extensive experience in soil surveys.

Key words. Diagnosis, Hydromorphism, Halomorphism, Effective Soil Depth, Soil Textural Composition.

1 INBA CONICET y Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes. Facultad de Agronomía, UBA. Av. San Martín 4453. 1417 Buenos Aires.

2 Instituto de Suelos, CIRN, INTA, y Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes. Facultad de Agronomía, UBA y CONICET.

* Autor de contacto: rubio@agro.uba.ar

INTRODUCCIÓN

El diagnóstico con fines agronómicos de la capacidad productiva de un suelo permite identificar y evaluar la intensidad de las limitantes del suelo para el crecimiento de cultivos (Rubio & Taboada, 2012). La jerarquización de estas limitantes en orden de importancia constituye la base para diseñar prácticas agronómicas tendientes a la resolución de las limitantes halladas y para clasificar los suelos según su aptitud productiva. El diagnóstico se basa en la identificación de rasgos morfológicos del perfil del suelo y de características del paisaje que pueden afectar el crecimiento de los cultivos (Etchevehere, 1976). Esto es así ya que indicadores simples como la textura, el tipo de estructura y la profundidad de enraizamiento se encuentran asociados con el rendimiento de los cultivos agrícolas (Mueller *et al.*, 2012). Esta información debe ser complementada con características del clima (*i.e.* régimen de lluvias y temperatura).

Para realizar el diagnóstico se requiere experiencia de campo y entrenamiento en la descripción y análisis de perfiles de suelos. Estas destrezas son muy específicas y no necesariamente las poseen los demandantes de información sobre la capacidad productiva del suelo. Un hecho que profundiza esta especificidad es la jerga propia de los expertos en suelos, no siempre accesible para los demandantes de la información práctica, aún aquellos vinculados con la gestión de la agronomía. En el ámbito de la enseñanza, los términos edafológicos específicos a menudo confunden a los estudiantes, conduciendo a un aprendizaje poco efectivo o equivocado (Field *et al.*, 2011).

Los suelos se suceden unos a otros en el espacio a través de la superficie terrestre. Cada combinación específica de paisaje, clima, material parental, proceso de meteorización, vegetación y manejo determina diferentes unidades de suelo (Jenny, 1941). En suelos agrícolas, la distinción entre diferentes unidades edáficas es clave para la elección de las prácticas de manejo adecuadas (Arens & Etchevehere, 1966; Logsdon *et al.*, 2008).

La necesidad de realizar el diagnóstico de la capacidad productiva de un suelo puede obedecer a diferentes propósitos. Por ejemplo, se puede efectuar el diagnóstico para analizar la viabilidad de llevar a cabo un cultivo determinado. En ese caso, los requerimientos edáficos del cultivo se conocen previamente y debe determinarse si el suelo analizado es apto para satisfacer esas necesidades. Sin embargo, la situación más común es que el diagnóstico no esté orientado a un cultivo específico, sino que el objetivo

sea la caracterización de la fertilidad del suelo en un sentido agronómico amplio. Debe considerarse que la clasificación final de un ambiente como el agrícola no es fija ni inmutable, ya que no sólo depende de las propiedades del suelo, sino que está sujeta a circunstancias externas al mismo (Ghida Daza, 2009). Por otro lado, suelos de similar capacidad productiva, pero ubicados en zonas geográficas distintas (*i.e.* con diferente clima) pueden brindar rendimientos agrícolas y/o económicos diferentes.

Al diagnosticar la fertilidad edáfica, las limitantes de tipo irreversible (ej. presencia de tosca) tienen mucho más relevancia que las reversibles (ej. encostramiento superficial o limitaciones por nutrientes) (Taboada *et al.* 2010a). Las limitantes reversibles se pueden subsanar total o parcialmente mediante la realización de prácticas culturales relativamente sencillas. Por ejemplo, la adición de fertilizantes en el caso específico de las deficiencias de nutrientes.

El presente trabajo propone un árbol de decisión para realizar un primer diagnóstico de la aptitud de uso agrícola y clasificar en tres categorías los suelos de la Región Pampeana. Considerando que los requerimientos edáficos de los cultivos presentan cierta variación, en este trabajo se toman como referencia los requerimientos de los cultivos extensivos actualmente más difundidos en la Región Pampeana: soja, maíz, girasol, colza, trigo y cebada. El esquema propuesto está destinado principalmente a usuarios no especialistas en suelos y a estudiantes universitarios.

METODOLOGÍA

La toma de decisión sobre la aptitud de uso agrícola de un suelo determinado se lleva a cabo recurriendo a un cursograma, que va proponiendo opciones a ser seleccionadas en base a propiedades fácilmente detectables del paisaje y del perfil de los suelos. En un primer nivel, el cursograma recurre a atributos del paisaje y del relieve, es decir externos a los suelos, y que como tales pueden ser detectados a campo, o haciendo uso de imágenes y fotografías aéreas. En un segundo nivel, el cursograma recurre a características morfológicas del perfil de los suelos, que surgen de la inspección visual de los mismos. Siguiendo un esquema binario (si-no), se termina confeccionando un árbol de decisión, que concluye con un tercer nivel de tres posibles categorías de aptitud agrícola (apto, parcialmente apto, no apto).

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS QUE DETERMINAN LA CAPACIDAD PRODUCTIVA DE UN SUELO EN LA REGIÓN PAMPEANA

En la Tabla 1 se identifican las principales variables consideradas en el árbol de decisión para el diagnóstico de la capacidad productiva de suelos de la Región Pampeana y su grado de reversibilidad.

Salinidad y alcalinidad

Siguiendo un enfoque jerárquico, las limitaciones por salinidad y alcalinidad son determinantes en primera instancia de la capacidad productiva de los suelos pampeanos. El diagnóstico de estas limitantes a campo se realiza mediante la detección de rasgos dentro del perfil del suelo y de características del paisaje. Rasgos de simple identificación como la presencia de sales o de humatos de sodio en superficie, o bien estos últimos formando barnices oscuros en los agregados de los horizontes subsuperficiales, son efectivos indicadores de estas limitantes. Sin embargo, los indicadores más concluyentes surgen del análisis que requieren instrumental específico: el pH y la conductividad eléctrica de los distintos horizontes del suelo hasta la profundidad de raíces. Otro tema a destacar es que las sales sódicas son altamente móviles en el perfil y que poseen una dinámica temporal. Por ejemplo, la conductividad eléctrica de los horizontes superficiales puede variar a lo largo del año debido a la existencia de pulsos salinos desde la capa freática hacia la superficie del suelo (Lavado & Taboada, 1987). La dinámica de las sales de los suelos pampeanos es usualmente dependiente de la profundidad de la capa freática. Debido a que la capa freática puede ser tanto fuente como destino de sales, un indicador clave para distinguir suelos con limitaciones por alcalinidad y/o salinidad es su posición topográfica en el paisaje. Aquellos suelos ubicados en posiciones elevadas presentan una distancia tal entre la superficie del suelo y la capa freática

que los procesos de ascenso capilar no son relevantes y normalmente las sales son lixiviadas hacia los horizontes profundos. En estos casos, los fenómenos de capilaridad desde la capa freática nunca llegan a la zona explorada por las raíces. Lo contrario ocurre en suelos ubicados en posiciones deprimidas. Si bien esto es válido a nivel regional, en algunas situaciones se puede dar el caso de que posiciones topográficas elevadas estén ocupadas con suelos con limitantes de salinidad o alcalinidad.

Los suelos salino-alcalinos de mayor extensión en la Región Pampeana poseen horizonte nátrico (Lavado & Taboada, 1987; Taboada *et al.*, 2009; INTA, 2013), siendo clasificados como Natracuoles, Natrudoles, Natracualfes y Natradulfes. La principal diferencia es que en los Natracualfes y Natradulfes las limitantes al crecimiento vegetal son más severas y se encuentran presentes en todo el perfil del suelo. En cambio, en los Natracuoles y Natrudoles, las limitantes se concentran en el horizonte subsuperficial, de características nátricas. En estos suelos, el horizonte superficial es de fertilidad moderada a elevada, por lo que es relevante diagnosticar el espesor de dicho horizonte.

Hidromorfismo

El diagnóstico del hidromorfismo también se realiza mediante la detección de características del paisaje y de rasgos dentro del perfil. En primer término, se debe evaluar la posición topográfica y la presencia de vías de evacuación y/o de aporte de agua por escorrentía. La ausencia de vías de escape puede provocar que el agua se acumule en depresiones. La presencia de aportes de agua desde zonas más elevadas aumenta las posibilidades de anegamiento. Por ello, la posición topográfica y las vías de escurrimiento deben ser analizadas en conjunto. La evaluación de imágenes satelitales es de gran utilidad para determinar áreas anegables. Es importante analizar imágenes de una serie

Tabla 1. Características de suelo utilizadas en el árbol de decisión con fines de diagnóstico en la Región Pampeana.

Table 1. Soil characteristics used in the decision tree for diagnosing cropping capability in the pampas region.

Limitaciones	
Irreversibles o reversibles con mucha dificultad	Reversibles
Salinidad	Disponibilidad de nutrientes
Hidromorfismo	Presencia de costras
Profundidad efectiva	Compactación
Limitaciones por textura	Acidez

de años, de modo de captar los eventuales excesos hídricos que permitan individualizar las áreas sujetas a anegamiento en años con exceso de precipitaciones. En tal sentido, la evaluación de un número limitado de imágenes puede llevar a un diagnóstico erróneo.

La susceptibilidad de un suelo a ser inundado limita fuertemente su aptitud de uso agrícola. No obstante, debe tenerse en cuenta el origen del agua inundante (*i.e.* superficial o freática), la periodicidad con que ocurre este fenómeno, así como su duración (Taboada *et al.*, 2009).

Una vez efectuadas las observaciones a nivel paisaje, es posible analizar el perfil propiamente dicho. Debido a que la presencia de agua durante un prolongado lapso en el suelo deja rastros morfológicos distinguibles (moteados, concreciones, cambios de color, horizontes gley), es necesaria una minuciosa revisión del perfil del suelo para detectar su presencia. La abundancia de rasgos de hidromorfismo y la profundidad a la que se encuentran son las variables a utilizar en la caracterización del hidromorfismo en el perfil. Aquí también la distancia entre la superficie del suelo y el nivel de oscilación de la capa freática son factores primarios en la presencia de rasgos hidromórficos en suelos de áreas deprimidas. También se observan rasgos de hidromorfismo en perfiles donde existen diferencias texturales importantes en los distintos horizontes del perfil del suelo. Estas diferencias pueden determinar capas de suelo con permeabilidad contrastante que originan napas de agua 'colgantes' con saturación de parte del perfil de variada magnitud y duración en el tiempo.

Textura y estructura

Las limitaciones por textura se relacionan principalmente con la capacidad de retención hídrica, la cual suele ser baja (*i.e.* 0,6-0,8 mm agua útil por cm de suelo) en suelos de textura arenosa (Damiano & Taboada, 2000). Un ejemplo frecuente de limitaciones por textura son los suelos de médanos no estabilizados o en vías de estabilización (*i.e.* Urdipsaments, Hapludoles énticos). En el otro extremo, texturas muy finas pueden generar limitaciones por drenaje. Muy frecuentemente, estas texturas finas se presentan en horizontes subsuperficiales que poseen prismas de gran tamaño. Por su tamaño y cohesividad, este tipo de estructura es de difícil exploración por las raíces, por lo que puede quedar una elevada cantidad de agua sin ser absorbida (Taboada *et al.*, 2010 a; b), aún cuando en estos horizontes la capacidad de retención hídrica es moderada. Es frecuente en este tipo de suelos que la exploración radical

posea un patrón irregular y una importante disminución de la abundancia de raíces en el horizonte Bt (Dardanelli *et al.*, 2003; Micucci & Taboada, 2006; Taboada & Álvarez, 2008).

Las limitaciones por tipo de estructura pueden ser reversibles o irreversibles. En términos generales, muchas estructuras desfavorables que se presentan en el horizonte superficial (*e.g.* planares, agregados grandes y duros en seco) son consecuencia del manejo del suelo, por lo que no definen su aptitud de uso agrícola, a excepción de suelos erosionados que presentan una pérdida total del horizonte A (Rubio & Lavado, 1990; den Biggelaar *et al.*, 2003). En cambio, son irreversibles aquellas estructuras poco favorables de origen natural, como las de tipo prismático en el horizonte Bt que limitan la exploración radical (Amato & Ritchie, 2002; Taboada *et al.*, 2010a) o las de tipo laminar en horizontes eluviales de suelos de posiciones topográficas deprimidas. Estos horizontes suelen aparecer sobre horizontes Bt poco permeables, sobre los que se forma una napa colgante en épocas de lluvias excesivas. En este esquema, se propone como límite para separar a los suelos arenosos a aquellos que poseen menos de 10% de arcilla, tomando como base el comportamiento estructural y volumétrico de los suelos (Dexter, 1988; Oades, 1993).

Profundidad efectiva

Son varias las características del suelo que pueden constituir una limitación a la exploración en profundidad del suelo por parte de las raíces. Estas características se denominan genéricamente impedancias. En función de que posean o no grietas o fisuras a través de las cuales las atraviesan las raíces, el grado de limitación que causan estas impedancias puede ser absoluta o parcial. Por ejemplo, la presencia de horizontes Bt pesados (*i.e.* Argiudoles vérticos) no constituye en sí mismo una limitante absoluta a la profundidad efectiva, pues las raíces los atraviesan por las grietas de secado o bien por poros comunes cuando el suelo está húmedo (Amato & Ritchie, 2002; Dardanelli *et al.*, 2003; Taboada & Álvarez, 2008). La simple presencia de un horizonte Bt no implica necesariamente una impedancia mecánica. Ello es así porque el carácter textural es definido por la relación del contenido de arcillas con respecto a la capa u horizonte suprayacente. Es así que en la Región Pampeana pueden encontrarse horizontes Bt que no pueden ser considerados limitantes para la exploración radical, pues poseen porcentajes de arcilla < 40% (*e.g.* Series Rojas y O'Higgins). Otros horizontes Bt sí lo son, pues

constituyen panes de arcilla (>50% de arcilla), como ejemplo en las Series Ramallo, Peyrano y otras (INTA, 1989).

Las planchas de tosca sí suelen ser limitantes absolutas a la penetración radical por la baja proporción de fisuras, y por el elevado pH, propio de suelos calcáreos (Sadras & Calviño, 2001). Estas planchas están muy extendidas en el sudeste bonaerense (INTA, 1989). Otro caso de impedancia absoluta lo constituye la presencia de basamento cristalino cerca de la superficie del suelo, tal como sucede en las áreas de pedemonte próximas a ambientes serranos (INTA, 1989).

La limitación ejercida por la impedancia se reduce en la medida que ésta se presente a mayor profundidad. En relación al grado de persistencia, se consideran en el diagnóstico de la capacidad productiva las limitaciones de tipo permanente a la profundidad efectiva, como lo son la mayoría de las de origen natural (e.g. tosca, panes de arcilla, duripanes), a excepción de los fragipanes que se ablandan en agua. No son consideradas en esta etapa las limitaciones de propiedades físicas de carácter transitorio, como los pisos de arado, las costras superficiales y la compactación

por actividades agrícolas (Taboada *et al.*, 2010a). Estas limitantes pueden ser removidas en el corto o mediano plazo por prácticas culturales (Hamza & Anderson, 2005).

ÁRBOL DE DECISIÓN

El árbol de decisión se empieza a recorrer desde su extremo superior derecho, analizando la frecuencia de anegamiento. Las entradas del esquema (rectángulos de la Fig. 1) pueden ser tanto cualitativas como cuantitativas determinadas por atributos explicados en el texto. A partir de estas entradas, el árbol conduce a una respuesta que conduce a una nueva etapa de la evaluación. La última etapa es una decisión final que es tomada a partir de las entradas y que representa el diagnóstico final en tres categorías de capacidad productiva (óvalos en la Fig. 1).

La primera tarea a realizar al hacer el diagnóstico es un estudio previo al viaje de campo en base a material cartográfico, fotografías aéreas y fundamentalmente imágenes satelitales (Logsdon *et al.*, 2008). De este estudio surge si

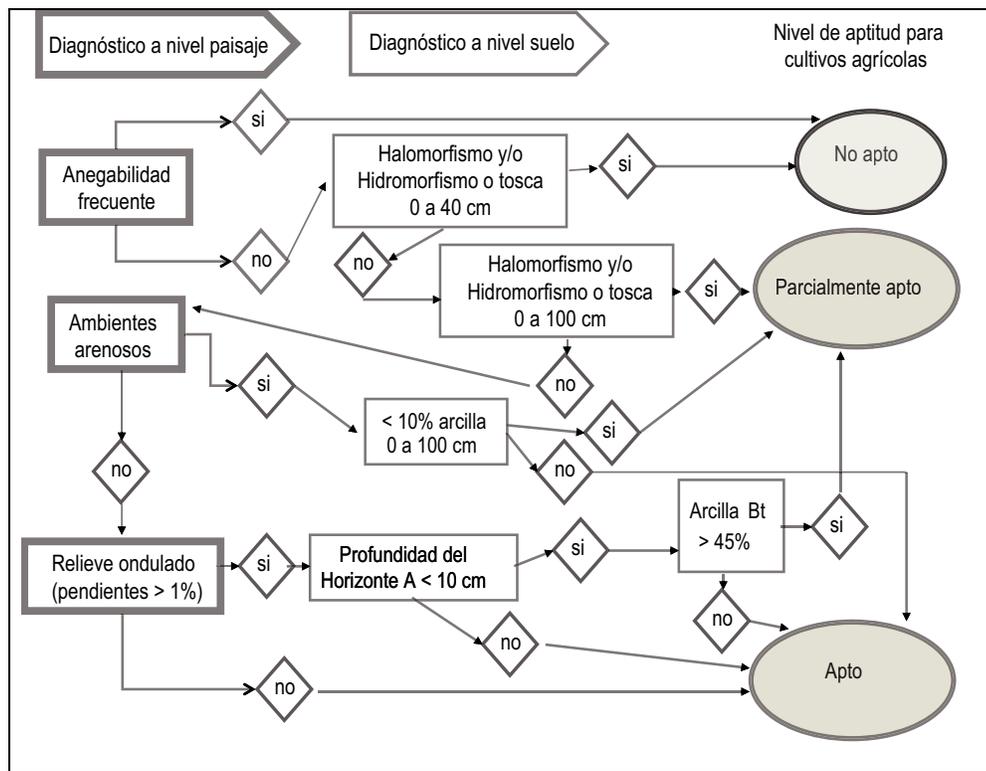


Figura 1. Árbol de decisión para diagnosticar la capacidad productiva de los suelos, para cultivos agrícolas extensivos de secano en la Región Pampeana. Figure 1. Decision tree for diagnosing extensive cropping use in the Pampas region.

el campo, el lote o un suelo en particular sufren inundaciones (agua externa al lote) y/o anegamientos (agua local) periódicos, atributo relativamente fácil de identificar en imágenes. La información debe complementarse con registros pluviométricos. La evaluación realizada debe ser chequeada a campo, y debe observarse minuciosamente el paisaje donde se encuentra el lote a evaluar. Con esta información se completa la primera etapa del árbol de decisión. Serán considerados suelos sin aptitud agrícola aquellos que son afectados por frecuentes inundaciones y/o anegamientos que duran gran parte del año.

Si estos fenómenos poseen la suficiente entidad, el segundo paso es evaluar la existencia de halomorfismo edáfico, en forma de niveles excesivos de sodio intercambiable y/o sales solubles (Taboada *et al.*, 2009). Es frecuente que los suelos pampeanos que poseen este tipo de alteraciones de la fertilidad, también posean rasgos hidromórficos en alguna parte del perfil. El principal criterio que se sigue es la profundidad a la cual se presentan en el perfil estas limitantes. De acuerdo al árbol propuesto, cuando los problemas son observados dentro de los primeros 40 cm, se considera que los suelos son no aptos para uso agrícola. Del mismo modo, y si bien la génesis del problema no es la misma, cuando un suelo presenta planchas de tosca dentro de esa profundidad (0 a 40 cm), también se lo considera no agrícola, en este caso por impedimentos mecánicos de origen genético (Sadras & Calviño, 2001; Taboada & Álvarez, 2008). Dada esta similitud, dos limitantes muy diferentes como el halo-hidromorfismo y la tosca fueron agrupadas en el mismo paso del árbol de decisión. En caso que estas limitantes se presentan en profundidades entre 40 y 100 cm, el suelo puede ser apto para algunos cultivos con menos exigencias de profundidad efectiva, aún cuando el riesgo económico es mayor. En este caso, estos suelos son clasificados como de aptitud parcial para el uso agrícola.

Si el suelo no posee ninguna de las limitantes antes mencionadas, el árbol de decisión conduce a evaluar la presencia de ambientes arenosos, caracterizados por las limitaciones de retención hídrica. Estos ambientes poseen una gran variabilidad, debido al escaso grado de evolución genética de los suelos que los componen. El criterio escogido para diferenciar estas situaciones es la textura del horizonte A. Dado que un 10% de arcilla fue propuesto como un nivel umbral, sobre el cual la arcilla comienza a manifestar su influencia sobre los suelos (Dexter, 1988; Oades, 1993), se propone que aquellos suelos que no poseen más de 10% de arcilla en ningún horizonte o capa dentro del metro, poseen limitaciones de fertilidad originadas por la

baja retención hídrica y fertilidad general. Ello los torna sólo parcialmente aptos para cultivos agrícolas. Este "apto parcial" tiende a "no apto" en los valores más reducidos de porcentaje de arcilla.

En caso que el ambiente supere la etapa de calificación de arenoso, el árbol de decisión nos conduce a los suelos de sedimentos más finos, con texturas francas a franco arcillo limosas en superficie. En esta etapa, se utiliza al relieve por su valor indicador de riesgo de erosión hídrica. Si la pendiente es mayor a 1% (relieve normal) se considera con riesgo. Un riesgo potencial de erosión evaluado de esta manera no implica necesariamente una merma en la capacidad productiva actual. Para evaluar si el efecto de la situación erosionada tendría consecuencia sobre la capacidad productiva actual, el árbol conduce en esta etapa a relevar la profundidad del horizonte A, como un indicador de pérdida de suelo (o la profundidad a la que aparece el B). En su estado original muchos suelos pampeanos exhibían horizontes A con espesores mayores a 15-20 cm (INTA, 1989), habiendo sido la reducción de dicho espesor uno de los rasgos morfológicos indicadores de pérdidas por erosión (Michelena *et al.*, 1988; Lavado & Taboada, 2009). Si este horizonte posee un espesor menor que 10 cm sobre el horizonte subyacente, generalmente un BA o un Bt, es indicador de que el suelo se encuentra erosionado. Esta evaluación permite calificar la condición que compromete su capacidad productiva actual. En este punto es importante saber qué es lo que hay debajo del horizonte A. Si es un horizonte Bt "pesado" (textura franco arcillosa, arcillo limosa o arcillosa), se considera que es una limitante importante para la exploración radical (Amato & Ritchie, 2002; Micucci & Taboada, 2006; Taboada & Álvarez, 2008). Estos suelos pasan a ser considerados moderadamente aptos o incluso no aptos para la agricultura. En caso que el horizonte por debajo del A erosionado tenga un porcentaje de arcilla menor a 45%, se considera que no representa un impedimento mecánico, por lo que el suelo posee aptitud de uso agrícola. Como excepción relevante en este paso del árbol de decisión, deben considerarse algunos suelos del sudoeste de la Región Pampeana, que originalmente poseían horizontes A de escaso espesor (INTA, 1989; INTA, 2013).

DISCUSIÓN

La clasificación de los suelos de acuerdo a los pasos del árbol de decisión permite realizar una primera separación de los principales suelos de la región en tres clases de aptitud

para cultivos agrícolas. Estas clases son: no apto, parcialmente apto y apto. Subsecuentes análisis, no abordados en el presente trabajo, serán necesarios para subdividir estas tres amplias clases, si la demanda específica de información así lo requiere. Debido a que la clasificación como agrícola depende en cierta medida de los requerimientos edáficos, un supuesto de este esquema fue basarse en los requerimientos de los cultivos extensivos actualmente más difundidos en la región: soja, maíz, girasol, colza, trigo y cebada. Para algunos de estos cultivos, los requerimientos de profundidad efectiva varían entre 1,30 m y 2,90 m (Dardanelli *et al.*, 1997), si bien existen importantes diferencias dentro de cada cultivo en función de cultivares, grupos de crecimiento o híbridos. Además de los requerimientos de los cultivos, hay otros factores que condicionan la clasificación de los suelos de acuerdo a su aptitud agrícola y que hacen que la misma no sea fija. En un suelo destinado a arroz, por ejemplo, la caracterización física e hídrica deberá seguir lineamientos distintos a los suelos destinados a cultivos como el maíz o el trigo.

En la Región Pampeana los suelos halomórficos e hidromórficos son normalmente considerados no aptos para agricultura. En otros países, donde el factor tierra es limitante, son convertidos en aptos mediante obras de sistematización de gran envergadura. En forma similar, numerosos países desarrollan su producción agrícola en zonas de humedales que, luego de efectuarse obras de drenaje, son capaces de sostener una agricultura de altos rendimientos. Otro aspecto que determina la flexibilidad de la clasificación de un suelo como agrícola es el precio del producto que se cosecha en el ambiente considerado. Si el precio del producto agrícola cultivado es suficientemente elevado, suelos de baja capacidad productiva, aún proporcionando rindes reducidos, pueden dar lugar a sistemas rentables. Es así que en los últimos años muchos suelos considerados poco aptos para la agricultura han sido cultivados, respondiendo a presiones de tipo económico y a las nuevas tecnologías de producción (Paruelo *et al.*, 2005; Viglizzo *et al.*, 2010). El sistema de siembra directa combinado con amplios aportes de residuos vegetales ha elevado notoriamente la aptitud agrícola de suelos arenosos del oeste de la Región Pampeana, región en la cual se produjo la mayor conversión de pastizales y pasturas en tierras de agricultura continua en los últimos años (Subsecretaría de Ganadería, 2012). Otra posibilidad es que suelos no agrícolas pasen a ser altamente productivos mediante el riego, caso con alguna frecuencia en zonas áridas. Por otro lado, la propia actividad agrícola puede

conducir a que un suelo originalmente agrícola deje de serlo, por ejemplo, por procesos de erosión derivados de aquella actividad, o situaciones en las cuales la agricultura promueve procesos de salinización superficial de los suelos (Viglizzo *et al.*, 2010; Nosetto *et al.*, 2012).

El primer paso del árbol de decisión consiste en separar los suelos salino-sódicos e hidromórficos, los cuales concentran la mayor parte de los suelos no aptos para agricultura en la Región Pampeana (INTA, 1986). Esta separación es aplicable a toda la región, debido a que estos suelos se distribuyen en toda su superficie. Suelos de este tipo se encuentran tanto en distritos caracterizados por poseer suelos de alta fertilidad tanto en el norte (ej. Pergamino, Venado Tuerto) como al sur de la región (Balcarce) así como en los distritos centrales de la región que ocupa la ganadera pampa deprimida (ej. Pila, General Guido). La diferencia es que en la Pampa Deprimida estos son los suelos predominantes mientras que en el primer grupo estos suelos ocupan una proporción minoritaria de la superficie (INTA, 1989). Considerando que las características morfológicas de los distintos suelos halo-hidromórficos presentes en la región son semejantes, aprender a reconocerlos constituye una habilidad de suma utilidad ya que puede ser aplicada en diversas situaciones dentro de la región. Es importante destacar que una importante proporción de los suelos halo-hidromórficos de la Región Pampeana poseen sus rasgos distintivos en el horizonte subsuperficial (ej. Natracuoles), por lo que el análisis del horizonte superficial no es suficiente para identificarlos (Taboada *et al.*, 2009). Más aún, un diagnóstico de suelos basado en las capas superficiales puede conducir a conclusiones completamente erróneas. Estos suelos salino-alcálinos están fuertemente asociados a la presencia de capas freáticas cercanas a la superficie, lo que suele provocar una continua recarga de sales hacia el perfil explorado por las raíces (Lavado & Taboada, 1987; Taboada *et al.*, 2009).

Los suelos con limitaciones impuestas por texturas arenosas se concentran en el oeste pampeano, aunque también ocupan importantes áreas en el centro, al norte de la Pampa Deprimida (ej. distritos de Saladillo y 25 de Mayo) (INTA, 1989). El elevado contenido de arena de estos suelos determina una baja retención hídrica y una menor fertilidad por los valores bajos de materia orgánica. El contenido de arcilla es la variable empleada en el esquema para clasificar estos suelos (Dexter, 1988; Oades, 1993).

El paso que separa los suelos afectados por erosión permite diferenciar especialmente aquellos ubicados en las áreas sensibles de la Pampa Ondulada (e.g. Arrecifes y Salto)

y otras áreas con pendiente pronunciada como aquellos ubicados en el sudeste bonaerense. En este caso, se considera la profundidad del horizonte A como primer indicador de la capacidad productiva. Un segundo paso del diagnóstico de la aptitud es determinar la textura del horizonte subyacente. La presencia de horizontes subsuperficiales arcillosos normalmente no es un factor excluyente para definir un suelo en las tres clases de aptitud propuestas. Sin embargo, el registro de estos horizontes es muy útil para predecir la capacidad productiva del suelo y para hacer una clasificación más detallada de los suelos de aptitud agrícola. La productividad de los suelos agrícolas de muchas zonas depende del espesor del horizonte A, y por consiguiente de la profundidad a la que se encuentra el horizonte Bt. Vale aclarar que el grado de limitación al crecimiento de los cultivos que ofrecen los horizontes B pesados es regulado por la humedad del suelo. La resistencia a la penetración disminuye notoriamente en suelos húmedos. La separación de suelos con aptitud agrícola en este nivel más fino excede los alcances del árbol de decisión presentado aquí. Se considera que porcentajes de arcilla superiores a 45% producen ciertas restricciones a la penetración radical en grandes unidades de agregados, como los prismas de los horizontes Bt (Amato & Ritchie, 2002; Dardanelli *et al.*, 2003; Micucci & Taboada, 2006; Taboada & Álvarez, 2008). Esta restricción es generalmente parcial, lo cual determina que los suelos con horizontes Bt arcillosos se clasifiquen como "parcialmente aptos" para la agricultura.

La acidez del suelo no es considerada en el esquema propuesto debido a que actualmente no es un atributo extendido en la Región Pampeana, aunque existen situaciones donde comienza a ser identificada como un problema (Gambaudo, 2011; Vázquez, 2011). En función de su intensidad, esta variable puede condicionar la aptitud productiva del suelo. Si bien es una limitante que puede ser subsanada mediante la aplicación de enmiendas, en casos de acidez muy severa las dosis de enmienda a aplicar pueden hacer inviable la práctica. Asimismo, debe considerarse que la aplicación de enmiendas no produce efectos permanentes (Cregan *et al.*, 1989).

Este esquema de diagnóstico puede ser mejorado, incorporando indicadores que permitan subdividir la diferente calidad de los suelos calificados en esta primera etapa como aptos o parcialmente aptos para las actividades agrícolas. Para esta subdivisión, la característica edáfica más relevante es la capacidad de almacenamiento de agua útil. La textura y la profundidad efectiva definen en gran parte de esta capacidad (Damiano & Taboada, 2000).

La experiencia en suelos es esencial para dar solución a problemas más complejos que los abordados aquí. Por ejemplo, la subdivisión de las tres clases de capacidad productiva que permitan una categorización más detallada. Sin embargo, para realizar una primera aproximación al diagnóstico de suelos, se espera que este árbol de decisión sea una herramienta más amistosa que las tradicionales herramientas basadas en una extensa experiencia en relevamiento de suelos. Su finalidad es poder distinguir los suelos en base a su aptitud para los cultivos agrícolas, por lo cual no se recomienda su aplicación para otras finalidades que no sean las que motivaron este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por CONICET (PIP 335) y UBA (UBACYT 1050 y G088). Se agradece a Roberto Álvarez (UBA) quien impulsó la realización de las primeras versiones de este modelo.

BIBLIOGRAFÍA

- Amato, M & J Ritchie. 2002. Spatial distribution of roots and water uptake of maize (*Zea mays* L.) as affected by soil structure. *Crop Sci.* 42: 773-780.
- Arens, PI & PH Etchevehere. 1966. Normas de reconocimiento de suelos. Instituto de Suelos y Agrotecnia (INTA). Tirada interna, Buenos Aires.
- Cregan, PD; JR Hirth, & MK Conyers. 1989. Amelioration of Soil Acidity by Liming and Other Amendments. In: A.D. Robson, ed, Soil Acidity and Plant Growth, pp. 205-264. Academic Press
- Damiano, F & MA Taboada. 2000. Predicción del agua disponible usando funciones de pedo-transferencia en suelos agrícolas de la región pampeana. *Ciencia del Suelo* 18: 77-88.
- Dardanelli, JL; OA Bachmeier; R Sereno & R Gil. 1997. Rooting depth and soil water extraction patterns of different crops in a silty loam Haplustoll. *Field Crops Res.* 54: 29-38.
- Dardanelli, JL; MA Calmon; JW Jones; MP Andriani; MP Díaz & DJ Collino. 2003. Use of a crop model to evaluate soil impedance and root clumping effects on soil water extraction in three argentine soils. *Trans. ASAE* 46: 1265-1275.
- den Biggelaar, Ch; R Lal; K Wiebe; H Eswaran; V Breneman & P Reich. 2003. The global impact of soil erosion on productivity: ii: effects on crop yields and production over time. *Adv. Agron.* 81: 49-95.
- Dexter, AR. 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil Till. Res.* 11: 199-235.
- Etchevehere, PH. 1976. Normas de reconocimiento de suelos. INTA. Castelar. 211 pp.
- Field, DJ; AJ Koppi; LE Jarrett; LK Abbott; SR Cattle; CD Grant; AB McBratney; NW Menzies & AJ Weatherley. 2011. Soil Science teaching principles. *Geoderma* 167-168: 2-9.

- Gambaudo, S. 2011. Diagnóstico de la acidez edáfica y corrección. Actas Simposio Fertilidad 2011, Rosario.
- Ghida Daza, C. 2009. El valor de la tierra agrícola y variables económicas. Algunos comentarios. INTA EEA Marcos Juárez, 6 p. (<http://www.inta.gov.ar/documentos/el-valor-de-la-tierra-agricola-y-variables-economicas.-algunos-comentarios/>).
- Hamza, MA & WK Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Till. Res.* 82: 121-145.
- INTA 1986. Aptitud y uso actual de las tierras argentinas. Estudios para la implementación de la Reforma Impositiva Agropecuaria. Proyecto PNUD Argentina 85/019. Área Edafología. SAGyP-INTA.
- INTA 1989. Mapa de suelos de la provincia de Buenos Aires, escala 1:500.000. INTA Suelos, Buenos Aires.
- INTA 2013. Base de datos de suelos en la provincia de Buenos Aires: <http://www.inta.gov.ar/suelos/cartas/index.htm> (INTA Instituto de Suelos, Castelar, BA).
- Jenny, H. 1941. Factors of soil formation. A system of quantitative pedology. McGraw Hill Book Company, New York, NY, USA. 281 pp.
- Lavado RS & MA Taboada. 1987. Soil salinization as an effect of grazing in a native grassland soil. *Soil Use Manage.* 3: 143-148.
- Lavado, RS & MA Taboada. 2009. The Argentinean Pampas: A key region with a negative nutrient balance and soil degradation needs better nutrient management and conservation programs to sustain its future viability as a world agrosresource. *J. Soil Water Conserv.* 65: 150-153.
- Logsdon, S; D Clay; D Moore & T Tsegaye (eds.). 2008. Soil Science. Step-by-step field analysis. *Soil Sci. Soc. Am.*, 251 p.
- Michelena, RO; CB Irurtia; A Pittaluga; F Vavruska & ME de Sardi. 1988. Degradación de los suelos en el sector norte de la Pampa Ondulada. *Ciencia del Suelo* 6: 60-66.
- Micucci, FG & MA Taboada. 2006. Soil physical properties and soybean (*Glycine max*, Merrill) root abundance in conventionally- and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 86: 152-162.
- Mueller, L; G Shepherd; U Schindler; BC Ball; LJ Munkholm; V Hennings; E Smolentseva; O Rukhovic; S Lukin & C Hu. 2012. Evaluation of soil structure in the framework of an overall soil quality rating. *Soil Till. Res.* (aceptado).
- Nosetto, MD; EG Jobbágy; AB Brizuela & RB Jackson. 2012. The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. *Agriculture, Ecosyst. Environ.* 154: 2-11.
- Oades, JM. 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma* 56: 377-400.
- Paruelo, JM; JP Guerschman & SR Verón. 2005. Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia Hoy* 15: 14-23.
- Rubio, G & RS Lavado. 1990. Efectos de alternativas de manejo pasturil sobre la densidad aparente de un Natracualf. *Ciencia del Suelo* 8: 79-82.
- Rubio, G. & MA Taboada. 2012. Diagnóstico de la capacidad productiva del suelo. En: Fertilización de cultivos y pasturas. Álvarez R, P Prystupa, MB Rodríguez, CR Álvarez (eds). Ed. FAUBA, Buenos Aires. Pp. 3-25.
- Sadras, VO & PA Calviño. 2001. Quantification of grain yield response to soil depth in soybean, maize, sunflower, and wheat. *Agron. J.* 93: 577-583.
- Candan, F & P Broquen. 2009. Aggregate Stability and related properties in NW Patagonian Andisols. *Geoderma* 154: 42-47.
- Duchaufour, P. 1968. L'évolution des Sols. Mason. Paris France. 93 pp.
- Ferrer; J; J Irisarri & M Mendía. 1990. Síntesis de los factores del medio geográfico y de las propiedades de los suelos. En: Estudio Regional de los suelos de la Provincia del Neuquén. 1. (2). CFI-COPADE-NQN. Bs. As. 147 pp.
- Fieldes, M & KW Perrot. 1966. The nature of Allophane in soils. 3. Rapid field and laboratory test for allophane. *New Zealand J. Sci.* 9: 623-629.
- Gaitán, JJ & CR López. 2007. Análisis del Gradiente Edáfico en la Región Andinopatagónica. *Ci. Suelo* (Argentina) 25(1): 53-63.
- Leamy, ML; B Clayden; RL Parfitt; DL Kinloch & CW Childs. 1988. The Andisol proposal. Final proposal of the International Committee on the Classification of Andisols (ICOMAND). New Zealand Soil Bureau; Low Hutt; New Zealand.
- Marcolín, A; CR López; J Ayesa; D Bran; MJ Lanciotti; S García & H Moraga. 1996. Zonificación del potencial Forestal de los suelos del Sector centro sur del Departamento Minas (Provincia del Neuquén) Comunicación Técnica 38 Relevamiento integrado. INTA-Bariloche. 23 pp.
- Mizota, C & van LP Reeuwijk. 1989. Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic material in diverse climatic regions. International soil reference and information centre. Soil Monograph 2; 103 pp.
- Parfitt, RL & AD Wilson. 1985. Estimation of allophane and halloysite in three sequences of volcanic soils; New Zealand. In: E Fernandez Caldas y DH Yaalon (eds.). *Volcanic soils. Catena Suppl.* 7: 1-8.
- Parfitt, RL & T Henmi. 1982. Comparison of an oxalate-extraction method and the infrared spectroscopic method for determining allophane in soil clays. *Soil Sci. Plant Nutr.* 28(2): 183-190.
- Robarge, WP & DW Johnson. 1992. The effects of acidic deposition on forested soils. *Adv. Agron.* 47: 1-83.
- SAMLA. 1996. Sistema de apoyo metodológico para laboratorio de análisis de suelos y aguas. Dirección Prod. Agrícola, SAGy A.
- Saigusa, M; S Shoji & M Otowa. 1991. Clay Mineralogy of Andisols Showing a Hydrosequence and its Relationships to their Physical and Chemical Properties. *Pedologist.* 35(1): 21-33.
- Shoji, S & Y Fujiwara. 1984. Active aluminum and iron in the humus horizons of Andosols from Northeastern Japan: their forms, properties and significance in clay weathering. *Soil Sci.* Vol. 137, N° 4: 216-226.
- Shoji, S; Y Fujiwara; I Yamada & M Saigusa. 1982. Chemistry and clay mineralogy of ando soils, brown forest soils, and podzolic soils formed from recent towada ashes, Northeastern Japan. *Soil Sci.* 133: 69-86.
- Shoji, S; M Nanzyo & RA Dahlgren. 1993. Volcanic ash soils. Genesis. Properties and utilization. Developments in Soil Science 21. Amsterdam. Elsevier. 288 pp.
- Soil Survey Staff. 1993. Soil Survey Manual. 5th Edition. U.S. Dept. Agricultural Handbook N° 18. US Govern. Printing Office Washington D.C.
- Soil Survey Staff. 1999. Soil Taxonomy. 2th. Ed. AID-USDA. Handbook N° 436. 869 pp.
- Sumner, ME & WP Miller. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficients. In: DL Sparks. (edit.); Methods of soil Analysis. Part 3. Chemical Analysis. Soil Sci. Soc. Am. Book Series N° 5. Soil Sci. Soc. Am. Inc. & A. Soc. Agron.; Inc. Madison; WI; pp. 2201-2229.