

ALTERNATIVAS DE DIAGNÓSTICO PARA EL MANEJO NUTRICIONAL EN CULTIVOS EXTENSIVOS

Adrián Correndo* y Fernando García
IPNI Latinoamérica Cono Sur
[*acorrendo@ipni.net](mailto:acorrendo@ipni.net)

ABSTRACT

Soil fertility is a discipline of soil science closely related to food production, human health, and life quality. Its study was traditionally associated with the ability of the soil to provide nutrients to crops. This core concept has expanded with the development of science and technology, towards a holistic view of the soil-plant-atmosphere system. In the current context, of increasingly demanding agricultural production, right diagnosis of crop nutrient status is necessary to improve resources use efficiency. Continuous emergence of methods to determine crop nutrient status generates the need for a proper data interpretation, identifying its potential and limitations, to get success. Since there is not unique solution for all farmers, fields, and environments, knowing the physical, chemical and biological properties of soils and their relationship to crop production is the main basis of the nutritional assessment. Soil testing provides the basis for the development of fertilizer recommendations, and it is more reliable as far as we work with representative data, and perform local calibrations. Under similar scientific principles, plant analysis appears as a complementary method that enables better interpretation under situations where the soil test does not have enough reliability. Furthermore, site-specific nutrient management, at increasing detailed scales, provides a great potential to improve the use efficiency of resources and inputs. Thus, soil testing is still the main method, but the use of new indicators, plant analysis, geo-referenced sampling, remote sensing, simulation models and other tools provides additional and improved alternatives for fertilizer recommendations. The main goal of this work is to review the available methodologies for crop nutrient assessment on field crops emphasizing soil testing.

RESUMEN

La fertilidad de suelos es una disciplina de la ciencia del suelo estrechamente relacionada con la alimentación, salud y calidad de vida de la humanidad. Su estudio tradicionalmente se asoció a la capacidad de los suelos de proveer nutrientes. Esta visión de base se ha ido ampliando con el avance de la ciencia y la tecnología, hacia una visión holística del sistema suelo-planta-atmósfera. En un contexto de producción agropecuaria cada vez más demandante, diagnosticar correctamente el estado nutricional de los cultivos es condición necesaria para mejorar la eficiencia de utilización de los recursos involucrados en el sistema productivo. Con el avance tecnológico, la aparición continua de nuevas metodologías de diagnóstico genera que la clave del éxito sea una adecuada interpretación de la información, identificando potencialidades y limitaciones de cada una de las herramientas disponibles. Dado que no existen soluciones únicas para todos los productores, lotes o ambientes, conocer las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos y su relación con la producción de los cultivos es la base para un buen diagnóstico y manejo nutricional. El análisis de suelos nos provee la información básica para el desarrollo de las recomendaciones de fertilización, siendo confiable en la medida en que se trabaje con datos

representativos de cada situación y se realicen las correspondientes calibraciones locales. Bajo una base teórica común, el análisis de plantas aparece como una metodología complementaria que posibilita mejorar la interpretación bajo situaciones en que el análisis de suelo no tiene el suficiente poder de predicción. Por otra parte, el avance referido al manejo específico por sitio o agricultura por ambientes productivos a escalas cada vez más detalladas, tiene un gran potencial para mejorar la eficiencia de uso de los recursos e insumos de producción. De tal forma, si bien el análisis de suelos continúa siendo la principal metodología utilizada, el uso de nuevos indicadores, análisis de plantas, muestreos geo-referenciados, sensores remotos, modelos de simulación y otras herramientas aporta alternativas complementarias y/o superadoras para mejorar los diagnósticos de fertilización. El objetivo de este trabajo es realizar una descripción de distintas metodologías de diagnóstico para el manejo nutricional de los cultivos extensivos con énfasis en el análisis de suelos.

INTRODUCCIÓN

En un contexto de producción agropecuaria cada vez más demandante, diagnosticar correctamente el estado nutricional de los cultivos es condición necesaria para mejorar la eficiencia de utilización de los recursos e insumos involucrados en el sistema productivo. Así, el concepto central del Manejo Responsable de Nutrientes es realizar, para cada situación específica, un diagnóstico nutricional que permita la aplicación de la “fuente” correcta de nutrientes en la “dosis” correcta, en el “momento” correcto y en la “forma” correcta. Estos cuatro "requisitos" (4Rs) son necesarios para un manejo responsable de la nutrición, que contribuya de manera sostenible a la productividad de los cultivos y los sistemas contemplando el equilibrio entre los aspectos ambientales, económicos y sociales (Figura 1).



Figura 1. Esquema conceptual del Manejo de Nutrientes 4Rs considerando las dimensiones ambiental, económica y social. Adaptado de Bruulsema et al. (2008).

Existen principios científicos específicos que guían el desarrollo de las prácticas que determinan fuente, dosis, momento y forma correctos. Algunos ejemplos de los principios y prácticas claves se muestran en la **Tabla 1**. Globalmente, los principios son los mismos, pero la forma en que se ponen en práctica a nivel local varía en función de las condiciones específicas de suelo, cultivo, climáticas, del tiempo, económicas y sociales. Los agricultores y los asesores de cultivos deberán asegurarse de que las prácticas que se seleccionan y aplican a nivel local, estén de acuerdo con estos principios.

Tabla 1. Ejemplos de principios científicos y prácticas asociadas al manejo de nutrientes. Adaptado de IPNI (2012).

Los Cuatro Requisitos (4Rs)				
	Fuente	Dosis	Momento	Forma
Principios Científicos	<ul style="list-style-type: none"> - Asegurar una oferta balanceada de nutrientes - Adaptarse a las propiedades del suelo 	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluar la oferta de nutrientes de todas las fuentes - Evaluar la demanda del cultivo 	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluar las dinámicas de absorción del cultivo y de abastecimiento del suelo - Determinar momentos de riesgo de pérdidas 	<ul style="list-style-type: none"> - Reconocer los patrones de distribución de raíces - Manejar la variabilidad espacial
Elección de Prácticas	<ul style="list-style-type: none"> - Fertilizante comercial - Abono animal - Compost - Residuos de cultivos 	<ul style="list-style-type: none"> - Analizar los nutrientes del suelo - Realizar cálculos económicos - Balancear la remoción del cultivo 	<ul style="list-style-type: none"> - Previo a la siembra - A la siembra - En floración - En fructificación 	<ul style="list-style-type: none"> - Al voleo - En bandas, chorreado, inyectado - Aplicación en dosis variable

El suelo es la principal fuente de nutrientes para las plantas y su oferta se estima usualmente a través del análisis de suelos de las formas “disponibles” o “extractables” de los nutrientes. Los análisis de suelos con fines de diagnóstico de fertilidad, son extracciones químicas y/o bioquímicas rápidas que intentan estimar la disponibilidad de nutrientes (Sims, 2000; Havlin et al., 2005). La cantidad de nutriente que se extrae es solo una proporción de la cantidad total de nutriente en el suelo. La cantidad de nutriente extraída tampoco es igual a la cantidad de nutriente absorbida por el cultivo pero se relaciona estrechamente con esta. Por lo tanto, el análisis de suelo es solo un “índice de disponibilidad” de nutrientes para el cultivo. Frecuentemente se utiliza el término “disponible”, pero se debe entender que la fracción determinada usualmente representa solo una fracción que está en rápido equilibrio con la solución del suelo, y puede ser absorbida por las plantas.

El análisis de suelos continúa siendo probablemente el enfoque más utilizado a nivel mundial, pero otras metodologías o enfoques tales como otros indicadores de suelo, muestreos geo-referenciados, análisis de planta, requerimientos de nutrientes, sensores remotos, y modelos de simulación aportan alternativas complementarias y/o superadoras para mejorar los diagnósticos de fertilidad (Janssen et al., 1990; Satorre et al., 2005; Melchiori, 2012; Shanahan et al., 2008, Correndo y García, 2012).

En este trabajo se presenta i) una descripción del desarrollo e implementación de programas de análisis de suelos con fines de diagnóstico de fertilidad, y ii) una discusión acerca de los desafíos y oportunidades de otras metodologías de diagnóstico.

ANÁLISIS DE SUELOS

Los objetivos del análisis de suelos con fines de diagnóstico son: 1) proveer un índice de disponibilidad de nutriente en el suelo, 2) predecir la probabilidad de respuesta a la fertilización o enmienda, y 3) proveer la base para el desarrollo de recomendaciones de fertilización (Gutiérrez Boem et al., 2005; Havlin et al., 2005). Claramente, el análisis de suelo constituye una de las mejores prácticas de manejo (MPM) para el uso de fertilizantes y otros abonos, ya sea para los fines de producción como de protección ambiental.

Desarrollo e implementación de programas de análisis de suelo

El desarrollo del análisis de suelo con fines de diagnóstico de fertilidad incluye las siguientes etapas (Walsh y Beaton, 1973; Peck et al., 1977; Brown et al., 1987; Sims, 2000; Álvarez et al., 2005, y Havlin et al., 2005):

1) *Muestreo de suelos*. En las etapas de desarrollo se definen momento, frecuencia, profundidad y otras consideraciones que contribuyen a atenuar los efectos de variabilidad espacial y temporal. La representatividad de la muestra es fundamental para que el programa sea exitoso. En la mayoría de los suelos existe una alta variabilidad espacial y temporal cuyo impacto puede disminuirse con adecuada planificación del muestreo.

2) *Selección del extractante y metodología de análisis*. La elección de la metodología debe procurar facilitar estimaciones precisas y exactas del “nivel disponible” del nutriente en cuestión, ser rápida, y de bajo costo e impacto ambiental. Debe procurarse la estandarización de los análisis de laboratorio para reducir la variabilidad en los resultados analíticos (Marban y Ratto, 2005; González et al., 2007).

3) *Correlación*. Generalmente el análisis de suelo es correlacionado con la absorción del nutriente considerando una parte o toda la planta en condiciones de campo y/o invernáculo. Por otra parte, en muchos casos el análisis se correlaciona con la producción de materia seca y/o rendimiento comercial de los cultivos.

4) *Calibración*. Es la parte central del desarrollo ya que provee información respecto al grado de deficiencia o suficiencia de un elemento para un cultivo, y cuanto del elemento debe ser aplicado si se presenta deficiente. Involucra la definición de agro-ecosistemas de características similares (rotaciones, suelos, manejo, clima, etc.) que pueden responder de manera similar a la fertilización facilitando la formulación de recomendaciones. Una calibración adecuada requiere la evaluación de la mayor diversidad de los agro-ecosistemas de la región en varias campañas, para explorar condiciones climáticas contrastantes. Más aun, la calibración debe actualizarse de manera continua incorporando las más recientes prácticas de manejo de suelos y cultivos.

5) *Interpretación*. A partir de la información experimental desarrollada en las etapas de correlación y calibración, se interpreta cuantitativamente el resultado específico del análisis. La interpretación de los resultados puede variar según las relaciones cuantitativas utilizadas, e.g. distintos niveles críticos según el modelo matemático utilizado (Mallarino y Blackmer, 1992). En esta etapa pueden definirse las probabilidades de respuesta económica asociadas a distintas categorías de disponibilidad de nutrientes.

6) *Recomendaciones*. Se integra la interpretación cuantitativa del análisis de suelo con la condición de otros factores que afectan la respuesta potencial a la aplicación de nutrientes. Entre estos factores se incluyen el cultivo, el rendimiento esperado, el tipo de suelo, las condiciones climáticas, las condiciones económicas, las regulaciones ambientales y la filosofía del productor. En esta etapa se define la estrategia y filosofía de recomendación, por ejemplo en nutrientes de baja movilidad como el fósforo (P), los criterios de suficiencia, reposición, construcción y mantenimiento u otras variantes son las posibilidades a utilizar por el asesor o productor (Mallarino, 2012).

El desarrollo del análisis de suelos requiere de una inversión significativa en recursos técnicos, económicos y de tiempo. Se deben establecer redes de ensayos a campo en suelos con niveles contrastantes de disponibilidad del nutriente en estudio, en distintas condiciones edafo-climáticas y de manejo de suelos y cultivos, durante varios años y evaluando dosis de fertilización. Por esta razón, los estudios de correlación y calibración, que fueron numerosos en distintos países entre las décadas de 1950 y 1970, se han reducido notablemente en los últimos 20-30 años a nivel internacional (García y Ciampitti, 2010).

Una vez desarrollados, la implementación de los programas de diagnóstico de fertilidad, basados en análisis de suelo, involucran cuatro pasos asociados a las seis etapas indicadas para su desarrollo: i) Muestreo de suelos, ii) Análisis, iii) Correlación y Calibración, y iv) Interpretación y recomendaciones (García y Ciampitti, 2010). Esta serie de pasos deben seguir estrictamente las indicaciones definidas durante el desarrollo del programa ya que suelen presentarse numerosas fuentes de variabilidad y de errores potenciales en cada uno.

i) *Muestreo de suelos*. Es importante remarcar el concepto de que no existe análisis y/o recomendación que mejore la representatividad y calidad de la muestra analizada. Los lotes, zonas de manejo o grillas generalmente presentan marcada variabilidad espacial a nivel micro y macro. El concepto de área homogénea de manejo toma especial relevancia a la hora del muestreo. Para este punto, disponer de fotos aéreas y mapas de suelo y/o de rendimiento, puede ser de suma utilidad a la hora de diferenciar mejor entre áreas. Es clara pues la insistencia en un cuidadoso y detallado proceso de toma de muestras a campo.

Deben enfatizarse las indicaciones generales del muestreo de suelos: 1) obtener una muestra compuesta de al menos 25-30 sub-muestras de cada área homogénea, separando zonas con distintas historias de manejo o distinta posición topográfica; 2) respetar la profundidad y momento de muestreo indicados por el programa de análisis; 3) mantener limpios y en condiciones los elementos utilizados para el muestreo.

ii) *Análisis de la muestra*. Esta etapa es frecuentemente identificada como la principal fuente de variación en los resultados de un análisis de suelos y esto no debiera ser así. Las diferencias que se observan entre resultados de análisis de una misma muestra entre distintos laboratorios se deben a varias causas: 1) representatividad de la muestra -¿fue bien homogenizada antes de dividirse y enviarse a distintos laboratorios?-, 2) diferencias de extractantes utilizados, 3) metodologías de análisis diferentes (relación suelo:extractante, tiempo de agitado, tiempo de reposo, instrumental, etc.), y 4) calidad analítica del laboratorio.

Sin lugar a dudas, la estandarización de los ensayos de laboratorio y los programas de interlaboratorio contribuyen de manera decisiva a mejorar la calidad analítica y de los

resultados (Marban y Ratto, 2005; Cosentino et al., 2011). En el caso de Argentina, diversas instituciones y laboratorios, coordinados por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGyP), conforman el SAMLA que es una red de adhesión voluntaria que nuclea a laboratorios dedicados al análisis de suelos, aguas, vegetales y enmiendas orgánicas, cuyo objetivo es mejorar la calidad de los análisis con el fin de hacer los resultados más confiables y comparables entre sí, normalizando las distintas técnicas para determinaciones tanto físicas como químicas y unificando criterios en todo lo relativo a la expresión e interpretación de los resultados analíticos (MAGyP, 2010). Por otra parte, el PROINSA es un programa de interlaboratorios para suelos agropecuarios, también coordinado por el MAGyP, que tiene la finalidad de determinar el desempeño de cada laboratorio participante mediante la comparación de sus resultados con los de todos los demás participantes. La continuidad y profundización de este tipo de programas contribuirá a la mejora de la calidad analítica de los laboratorios (Cosentino et al., 2011).

iii) *Correlación y calibración.* El alcance del análisis de suelos con fines de diagnóstico de fertilidad es limitado por la variabilidad observada en las relaciones entre el rendimiento o la respuesta de los cultivos y el nivel de nutriente “disponible” en el suelo. En general, los niveles de un nutriente en suelo explican un 40-60% del rendimiento o respuesta del cultivo. Este escenario ocurre debido a que el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo dependen de numerosos factores más allá de la disponibilidad de un único nutriente (ej.: radiación, temperatura, otros nutrientes, agua, etc.).

A modo de ejemplo, las investigaciones en Argentina han permitido generar calibraciones basadas en la disponibilidad de nitrógeno (N) (como el contenido de N-nitratos en el suelo a 0-60 cm previo o a la siembra + N del fertilizante), facilitando la formulación de interpretaciones y recomendaciones (González Montaner et al., 1991; Ruiz et al., 2001; Álvarez et al., 2003; Barbieri et al., 2008; García et al., 2010). Sin embargo, como se muestra en la **Figura 2** para el caso de maíz, a pesar de explicar una buena parte de la variación del rendimiento del cultivo, la variabilidad que presentan estas relaciones debe ser considerada. La misma puede adjudicarse, entre otros factores, al aporte de N mineralizado durante el ciclo del cultivo, pérdidas del N disponible a la siembra, diferencias en potencial de rendimiento, condiciones climáticas, otros nutrientes o propiedades de suelo limitantes, y otros factores de manejo (plagas, malezas, enfermedades).

En el caso particular de P, se ha hipotetizado que, con la expansión de la siembra directa, se podrían lograr mejores ajustes muestreando a profundidades menores de 0-20 cm que es la profundidad a la cual se ha calibrado el análisis de P Bray en Argentina. Sin embargo, las evaluaciones realizadas no han mostrado mejoras en el ajuste del método muestreando a 0-5 o 0-10 cm de profundidad (Zamuner et al., 2004).

En Bolivia, los resultados de la red de ensayos exploratorios de Fundacruz indicaron que el P fue el nutriente que más frecuentemente limitó el rendimiento, observando respuestas significativas al agregado del nutriente en 26 de un total de 33 sitios/año (Terrazas et al., 2012). Estas respuestas son atribuidas a los bajos valores de P Olsen en la mayoría de los sitios experimentales de las regiones Norte y Centro. Relacionando los rendimientos relativos (Rendimiento KS / Rendimiento PKS) y los niveles de P Olsen, se puede estimar un nivel crítico de 5-6 mg/kg (**Figura 3**). Este valor crítico sería una herramienta inicial para la región en cuanto al manejo de la fertilización fosfatada. Debajo de 6 mg/kg, la respuesta

promedio en soya para 20 sitios/años fue de 268 kg/ha. Para maíz (4 sitios/años), la respuesta promedio en suelos con P Olsen menor de 5-6 mg/kg fue de 1542 kg/ha. Las eficiencias agronómicas estimadas resultaron en 13.4 y 77.1 kg grano por kg de P, para soya y maíz, respectivamente, mientras que las relaciones de precios fueron estimadas en 8.3 y 15.9 kg grano por kg de P, respectivamente.

El caso de azufre (S) debe ser examinado con mayor detalle ya sea en lo que hace a metodología de análisis como a los estudios de correlación y calibración, los cuales no han sido muy exitosos para definir niveles críticos hasta la fecha en Argentina y en otros países (García et al., 2010). Deberían evaluarse las posibles variables que contribuyan al mejor conocimiento de la dinámica del nutriente en diferentes agro-ecosistemas y las posibles alternativas para el diagnóstico de fertilidad.

iv) Interpretación de resultados y recomendaciones

La interpretación y subsecuente recomendación de fertilización, puede ser mejorada utilizando metodologías y herramientas complementarias al análisis de suelo. Siguiendo con el ejemplo de la relación disponibilidad de N con rendimiento de maíz de la **Figura 2**, evaluaciones de la condición de sitio como tipo de suelo, historia del lote, potencial de rendimiento, genética empleada, condiciones climáticas, profundidad de napa freática, entre otras, pueden contribuir a una mejor interpretación de los resultados. Otras variables de suelo o planta pueden ser determinadas para ajustar la interpretación, en este caso se podrían mencionar la evaluación de N-nitratos en suelo o de nitratos en jugo de base de tallos al estado V5-6, la determinación del índice de verdor a través del clorofilometro Minolta SPAD 502, y la evaluación del N mineralizado (Rice y Havlin, 1994; Melchiori, 2007; Sainz Rozas et al., 2000 y 2008).

En el caso de S, los ambientes más frecuentemente deficientes incluyen una o varias de las siguientes condiciones (Ferraris et al., 2004; Reussi Calvo y Echeverría, 2009): i) suelos degradados, con muchos años de agricultura continua (especialmente soya), ii) con historia de cultivos de alta producción con fertilización nitrogenada y fosfatada; iii) suelos arenosos de bajo contenido de materia orgánica; y/o iv) suelos sin aporte de sulfatos por parte de napas freáticas superficiales o aguas de riego.

La variación temporal afecta, en particular, a los nutrientes más asociados con la materia orgánica, como es el caso de N y S, y puede ser abordada a través del uso de modelos de simulación del crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo que incluyan simulaciones de la dinámica de los nutrientes (Hoogenboom et al., 2003; Mercau, 2010).

Para P, la recomendación con criterio de suficiencia o de construcción y mantenimiento es una alternativa a decidir por el productor y su asesor. La utilización de un criterio u otro, o de situaciones intermedias, depende en gran medida de la situación de cada productor, el sistema de manejo, la disponibilidad de capital, la relación de precios granos/fertilizante y la tenencia de la tierra, entre otros aspectos. En cualquier caso, el conocimiento de las correlaciones, calibraciones y la interpretación del análisis de suelo (Berardo y Grattone, 2000; Melchiori et al., 2002; García et al., 2005) (**Figura 4**) contribuirá a una toma de decisión más adecuada para optimizar la eficiencia de uso del nutriente y de otros recursos. A modo de ejemplo, el laboratorio de Suelos de la Universidad del Estado de Kansas ofrece en sus recomendaciones las dos alternativas para que productores y asesores tomen la

decisión en cada caso en particular (Leikam et al., 2003). Las alternativas intermedias son validas y probablemente son las más utilizadas en la actualidad (Mallarino, 2012).

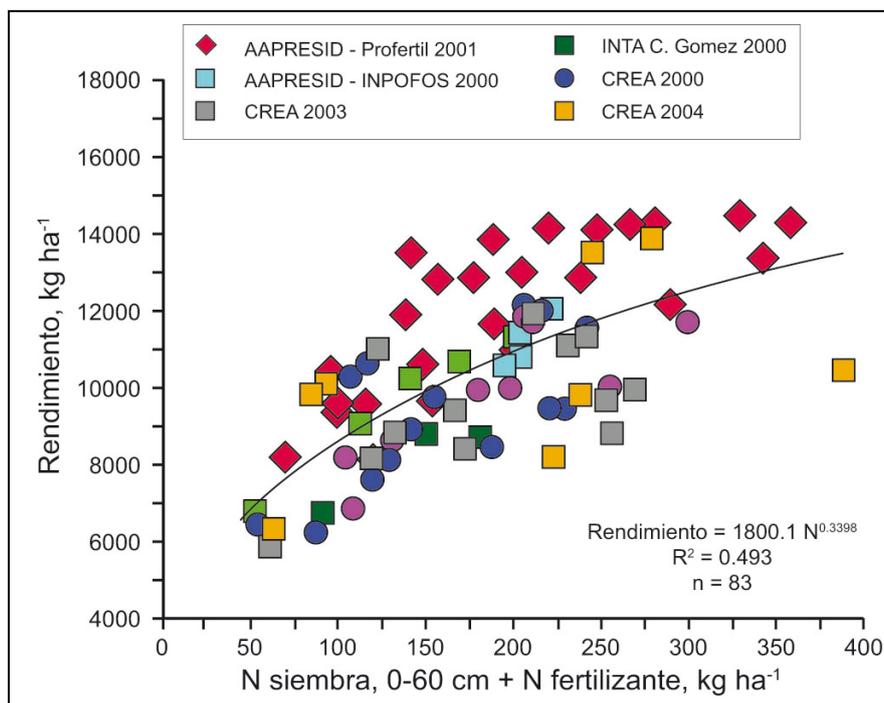


Figura 2. Rendimiento de maíz en función de la disponibilidad de N a la siembra del cultivo (N-nitratos suelo + N-fertilizante). García y Ciampitti (2010).

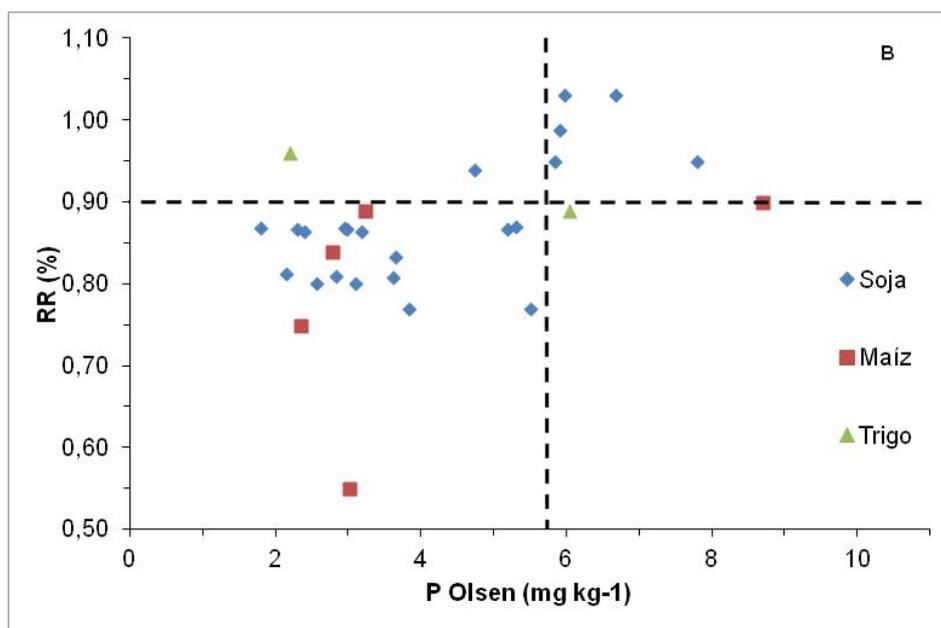


Figura 3. Relación del rendimiento relativo (RR) de soja, maíz, y trigo con el nivel de P Olsen para 32 sitios/año de la Red de ensayos FUNDACRUZ (Terrazas et al., 2012). No se incluyen los sitios de P Olsen superior a 12 mg/kg que presentaron rendimientos relativos superiores a 0.9.

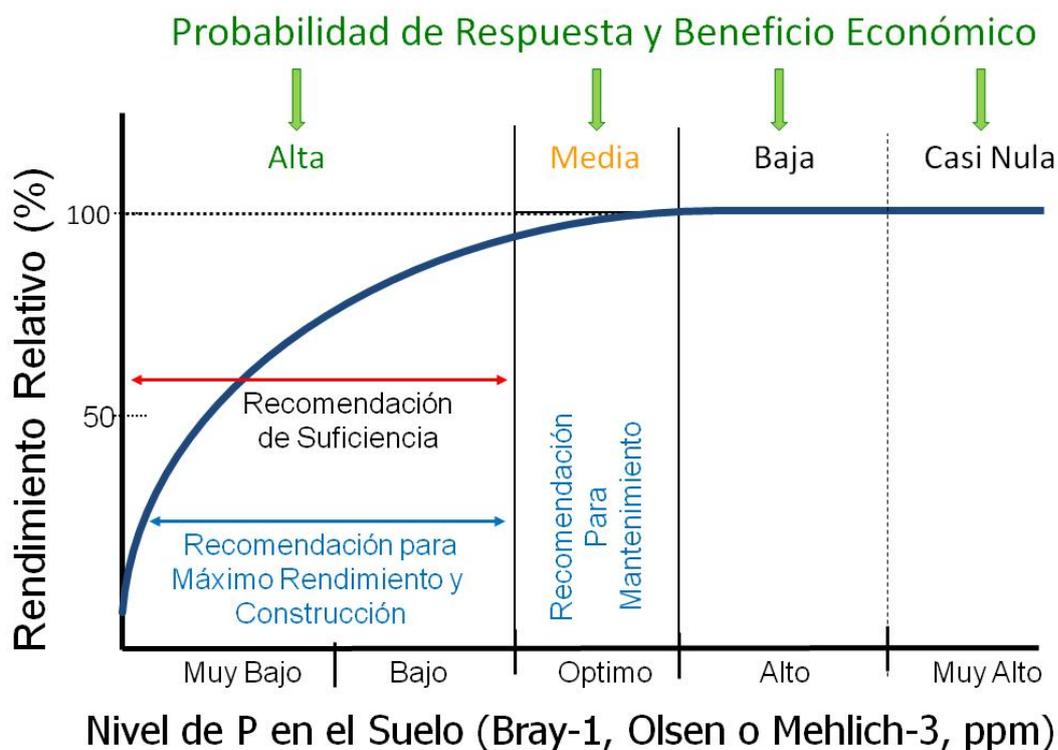


Figura 4. Relación teórica entre el rendimiento relativo de un cultivo, probabilidad de respuesta económica, y criterios de fertilización recomendados en función del nivel de P en el suelo. Adaptado Mallarino (2012).

OTRAS HERRAMIENTAS PARA EL DIAGNÓSTICO NUTRICIONAL

Análisis de plantas

A veces erróneamente referido como análisis foliar, esta metodología es una técnica que determina el contenido de los nutrientes en tejidos vegetales de plantas de un cultivo muestreado en un momento o etapa de desarrollo determinados (Munson y Nelson, 1986; Campbell, 2000). Esta herramienta se basa en los mismos principios que el análisis de suelos, asumiendo que la concentración de nutrientes en la planta está directamente relacionada con la habilidad del suelo para proporcionarlos y, a su vez, con la productividad de las plantas.

Normalmente, el término análisis de planta se refiere al análisis cuantitativo de laboratorio de los tejidos vegetales recolectados. Sin embargo, también existen metodologías denominadas semi-cuantitativas, para llevar a cabo a campo, que mediante diferentes pruebas determinan el contenido de nutrientes solubles en savia, como el test de nitratos en jugo de base del tallo en maíz (Blackmer y Mallarino, 1996), u otros métodos indirectos como los que determinan el índice de verdor, estimadores de la clorofila y del estatus nitrogenado (Ferrari et al., 2010). Estos análisis pueden dar una idea del contenido de nutrientes pero no poseen la precisión característica de un análisis de planta. El análisis vegetal es una herramienta sumamente eficiente para evaluar la nutrición del cultivo ya que el contenido de nutrientes en planta es un valor que resulta de la interacción entre el cultivo, el ambiente y el manejo.

Las utilidades de esta metodología pueden ser tales como: i) verificar síntomas de deficiencias nutricionales; ii) identificar deficiencias asintomáticas (“hambre oculta”); iii) indicar interacciones entre nutrientes; iv) localizar zonas del lote que se comportan en forma diferente; y v) evaluar el manejo nutricional de los cultivos.

Así, utilizando el análisis de planta para realizar un seguimiento y registro en etapas tempranas del ciclo de los cultivos, el agricultor puede determinar si se requiere o no de tratamientos correctivos de fertilización. Por otra parte, puede ser muy provechoso para el caso de cultivos perennes como forrajeras y frutales o en el planeamiento de los futuros cultivos anuales (Aldrich, 1986), determinando en etapas avanzadas del ciclo si los niveles de fertilidad del suelo y los fertilizantes aplicados fueron suficientes para satisfacer los requerimientos de los cultivos (Jones, 1998).

En el aspecto práctico de esta técnica, la misma comprende una secuencia de procedimientos con igual importancia: muestreo, análisis químico e interpretación.

i) Muestreo. Es importante considerar que el diagnóstico foliar exige un rigor de muestreo mayor que el del análisis de suelos, debido a que la especie, edad, tipo de tejido (planta entera, vainas, hojas completas, láminas, etc.), momento de muestreo, y el nutriente en cuestión, son variables que afectan la interpretación de los resultados. Así, por ejemplo, intervienen diferentes factores fisiológicos como la movilidad de los nutrientes dentro de la planta: algunos son móviles (como N, potasio –K- y P), mientras que otros se acumulan a medida que los tejidos maduran y no se remobilizan hacia nuevos tejidos (como calcio –Ca- y hierro –Fe-).

Como regla general debemos tomar muestras correspondientes a tejidos similares y en el mismo estado fisiológico a los definidos por la referencia con la cual se compararan los resultados del análisis, es decir siguiendo las instrucciones correspondientes al método de interpretación que se utilizará.

ii) Análisis químico. El análisis químico de tejido vegetal tiene como objetivo determinar el contenido de nutrientes, para comparar con los de plantas sin deficiencias nutricionales y, conjuntamente con los resultados del análisis de suelo, recomendar mejores prescripciones de fertilización. Una vez que las muestras representativas han sido recolectadas del campo, se envían al laboratorio para proceder al análisis químico. Los resultados de los análisis de macronutrientes se expresan, generalmente en g kg^{-1} de materia seca o en unidades de porcentaje relativas al peso seco, en tanto que los micronutrientes se expresan en mg kg^{-1} (equivalente a ppm), también en relación al peso seco.

iii) Interpretación. Existen varias alternativas para la interpretación de los resultados de los análisis vegetales. De manera general, se establecen diferentes categorías de contenido de nutrientes en tejido vegetal (**Figura 4**).

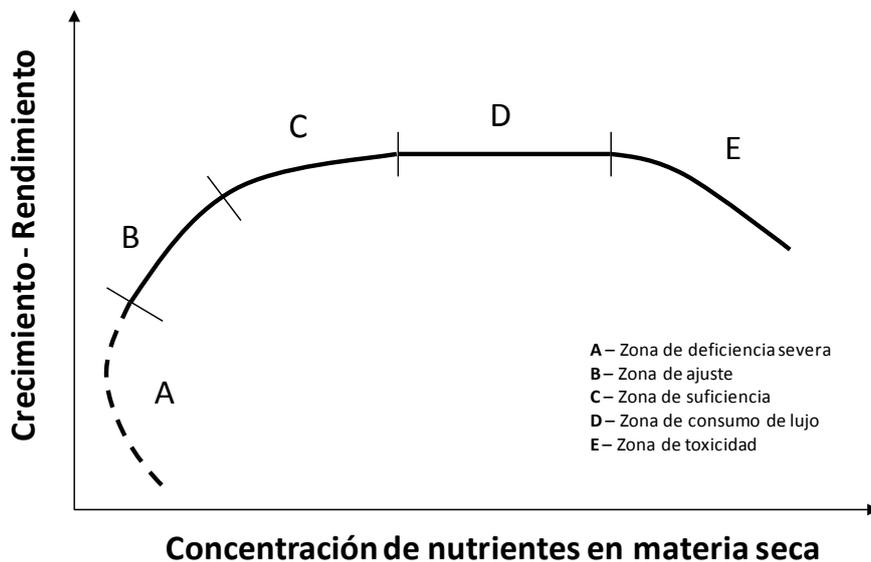


Figura 4. Relación general entre el crecimiento y/o rendimiento y el contenido de nutrientes en tejido vegetal. Adaptado de Jones (1998).

El diagnóstico foliar basado en el *nivel crítico* es uno de los criterios más difundidos de interpretación del análisis de plantas y requiere que la concentración de nutrientes sea comparada con valores estándares para un determinado nutrimento, estado fenológico y órgano establecido (Bates, 1971). Las calibraciones de niveles críticos consideran como tal a la concentración mínima del nutriente con la que se logra 90-95% del rendimiento máximo. Una de las desventajas del criterio de niveles críticos radica en que estos valores pueden variar entre un 25% o más en función de diferentes condiciones.

Una alternativa al nivel crítico es el criterio de “*suficiencia o rangos de suficiencia*”, que es el más popular y se pretende que los valores foliares no sean inferiores a un nivel considerado como crítico o se sitúen dentro de un rango de suficiencia (**Tabla 2**). La alternativa de utilizar “rangos” en lugar de niveles críticos se basa en que estos últimos no son valores estrictos de inflexión, y los rangos otorgan ventajas sobre todo en la identificación de deficiencias asintomáticas, que muchas veces pueden encontrarse por encima del nivel crítico (Campbell y Plank, 2000).

Los análisis que detectan valores en los rangos de bajo a deficiente, pueden estar asociados a síntomas visibles de deficiencias y/o rendimientos reducidos. Por el contrario, resultados en los rangos altos o de exceso, se asocian a consumos de lujo o a situaciones de toxicidad que conducen potencialmente a bajos rendimientos o mala calidad de los productos cosechados (Melgar et al., 2011). Los rangos de suficiencia indicados en la **Tabla 2**, deben ser considerados como orientativos ya que agrupan información de diversos autores y no son específicos para distintas regiones y condiciones de cultivos. La información local, en cuanto a rangos críticos de concentración, será siempre de mayor valor en la evaluación del diagnóstico nutricional de las plantas (Correndo y García, 2012).

Tabla 2. Rangos de suficiencia de nutrientes en planta para trigo, maíz, soja y caña de azúcar. Consultar partes de planta a muestrear y más cultivos en Correndo y García (2012).

Nutriente	Trigo		Maíz		Soja	Caña de Azúcar
	Emergencia -Macollaje	Encañazón -Floración	V3-V4	Floración	Floración	4 meses pos- brotación
N (%)	4.0-5.0	1.75-3.3	3.0-5.0	2.7-4.0	3.25-5.5	1.9-2.6
P (%)	0.2 - 0.5	0.2-0.5	0.3-0.8	0.20-0.50	0.26-0.60	0.20-0.30
K (%)	2.5-5.0	1.5-3.0	2-5.0	1.7-3.0	1.5-2.5	1.0-1.6
S (%)	0.15-0.65	0.4	0.15-0.4	0.10-0.60	0.20-0.60	0.25-0.30
Ca (%)	0.2-1.0	0.21-1.4	0.25-1.6	0.20-1.00	0.2-2.0	0.2-1.0
Mg (%)	0.14-1.0	0.16-1.0	0.3-0.8	0.15-1.00	0.25-1.00	0.15-32
B (ppm)	1.5-40	5-20	5-25	4-25	20-60	4-50
Cu (ppm)	4.5-15	5-50	5-25	5-25	4-30	04-10
Fe (ppm)	30-200	21-200	30-300	11-300	21-350	50-500
Mn (ppm)	20-150	16-200	20-160	15-200	20-100	12-250
Mo (ppm)	0.1-2.0	0.4-5.0	0.1-2.0	0.15-0.20	0.5-1.0	0.15-0.30
Zn (ppm)	18-70	20-70	20-50	15-100	15-80	16-50

En algunos países, incluyendo Brasil, Canadá, China, EE.UU. e India, asesores públicos y privados han adoptado el Sistema Integrado de Diagnóstico y Recomendación (DRIS) como parte de sus técnicas de diagnóstico en áreas seleccionadas. El DRIS se basa en utilizar cocientes relativos de las concentraciones de los nutrientes. Las normas para estas razones o cocientes se establecen comparando el análisis foliar completo de un cultivo de alto rendimiento con uno de bajo rendimiento. Debido a que se usan razones o cocientes, el efecto de dilución por el crecimiento de la materia seca tiene menor efecto en la interpretación y la época de muestreo puede ser más flexible (Sumner, 1977).

En un comienzo se sugirió que las normas DRIS establecidas en una localidad geográfica podrían aplicarse en otras regiones. Sin embargo, el resultado de numerosas investigaciones en maíz, trigo, soja, alfalfa y papa han indicado que las normas desarrolladas local o regionalmente producen resultados más precisos en el diagnóstico de deficiencias (Munson y Nelson, 1990; Jones, 1993). Aunque muchos investigadores han demostrado que DRIS produce diagnósticos más precisos de deficiencias de elementos nutritivos que los procedimientos convencionales, la complejidad de la metodología ha limitado su uso. Se han propuesto varias modificaciones a la metodología que pueden simplificar su uso e interpretación. Algunas de estas modificaciones incluyen cálculos simplificados de funciones intermedias, modificación de la selección de parámetros, y un criterio modificado para predecir la respuesta a la aplicación adicional de fertilizantes (IPNI, 2012).

Parcelas de omisión

En caso que no sea posible realizar análisis de suelo o de plantas, se puede estimar la capacidad del suelo de suministrar nutrientes utilizando la técnica del elemento faltante. Esto se hace utilizando parcelas pequeñas en las cuales cada uno de los nutrientes evaluados se omite en una parcela pero todos los demás nutrientes se aplican en niveles adecuados. Por otra parte, una parcela recibe todos los nutrientes y otra parcela se deja sin aplicación alguna. Si no se observa disminución de rendimiento cuando se omite un nutriente comparado con la parcela con “todos los nutrientes”, se asume que el suelo está suministrando niveles adecuados del nutriente omitido (IPNI, 2012).

Diferenciación de ambientes productivos

Las tecnologías de agricultura de precisión han comenzado a utilizarse con creciente intensidad por parte de los agricultores. La incorporación de equipamientos como el GPS, monitores de rendimiento, sensores remotos y computadoras de a bordo, entre otros, genera gran cantidad de información para procesar. Esto produjo la emergencia de grupos de trabajo que han desarrollado servicios de análisis de información y brindan asesoramiento en el uso de las nuevas tecnologías, en especial aquellas destinadas a la definición de ambientes productivos. Ahora bien, la diferenciación de zonas de manejo a escalas cada vez más detalladas es una herramienta de gran valor, pero su capacidad de optimizar los sistemas de producción es, indefectiblemente, dependiente de la calidad de la información utilizada y generada. Partiendo de esta base, el proceso de ambientación de un establecimiento o lote se basa en cuatro etapas (Bermúdez, 2011):

1) *Planteo de hipótesis donde existen diferentes ambientes productivos.* Esta etapa se realiza en gabinete y el objetivo es hacer una delimitación y creación de un mapa preliminar de los posibles ambientes productivos. Éste se construye mediante la integración y gestión de información geo-referenciada disponible, tal como mapas de rendimiento, topografía, cartas de suelo, altimetría, imágenes satelitales, mapa de profundidad de tosca, profundidad de la napa, imágenes de índice verde, etc. Cabe aclarar que las capas de información utilizadas para ambientar un campo en una determinada zona geográfica pueden ser (y de hecho lo son) distintas para ambientar otros campos con distinta ubicación geográfica ya que no toda la variabilidad se explica y distribuye de la misma manera.

2) *Validación a campo.* Se caracterizan las variables según la definición de ambientes que corresponda para esa zona, mediante muestreos de suelo dirigidos y ubicando puntos al azar dentro del ambiente. También se ajustan los límites determinados en la etapa 1.

3) *Obtención del mapa definitivo de ambientes.* Con la información obtenida de los muestreos y caracterizaciones realizadas a campo se rectifican, en caso de ser necesario, los límites o la clasificación asignada para esa área.

4) *Retro-alimentación.* A medida que se aumenta el número de campañas de cultivos para un determinado lote y con la acumulación de nuevas capas de información (nuevos mapas de rendimientos) se realimenta el mapa de ambientes aumentando la precisión en la información obtenida.

Una vez definidos los ambientes de un lote o campo, la decisión de manejo diferencial para cada uno puede tener diferentes alternativas en función de los objetivos perseguidos o limitantes emergentes (**Figura 5**). La aplicación de dosis variable, resulta en esta instancia una oportunidad de mejorar la eficiencia en el uso del fertilizante, evitando tanto zonas de consumo de lujo como de deficiencia de nutrientes, ya sea por sobre o sub-estimación de las necesidades de los cultivos. Usando de ejemplo el P, la confección de un mapa de prescripción de fertilización podría realizarse a partir de mapas de rendimiento (esperado -ex ante-, logrado -ex post-) afectados por el contenido de P en producto de cosecha (medido o estimado), si se trabaja bajo una estrategia de reposición. Si la estrategia es de construir y mantener, se hace necesario superponer a la anterior, una capa con las necesidades estimadas de fertilización para incrementar el análisis de suelo a un nivel objetivo.

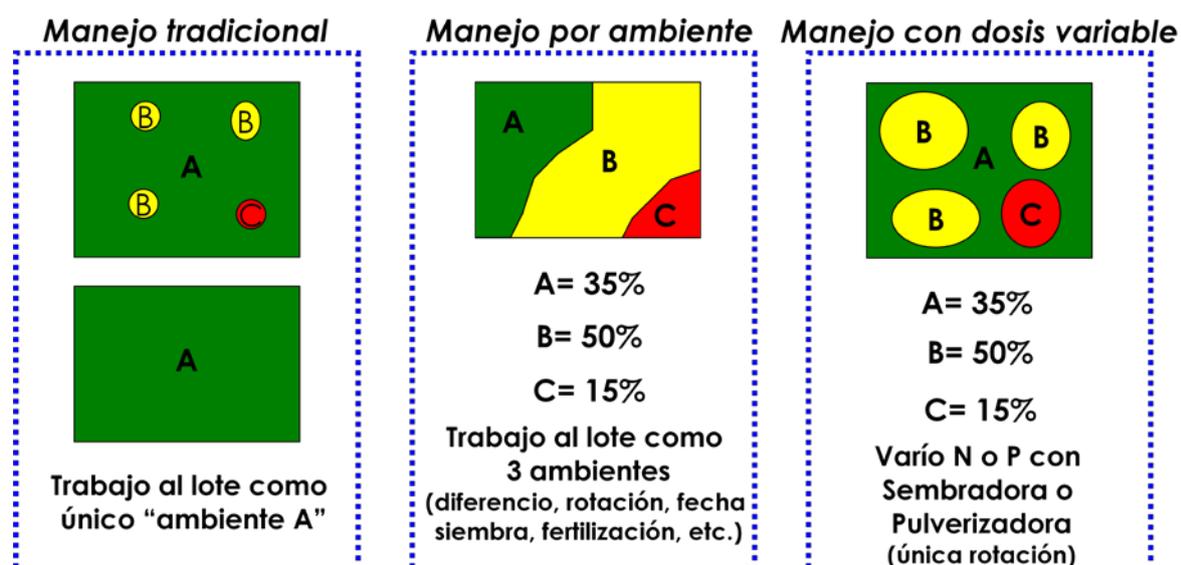


Figura 5. Diferentes alternativas de manejo dentro de un lote. Bermúdez (2011).

Sensores remotos

La teledetección sigue evolucionando como una valiosa herramienta agronómica que proporciona información a los científicos, consultores y productores acerca del estado de sus cultivos (Hatfield et al., 2008). El manejo variable basado en técnicas de este tipo puede ser una alternativa complementaria para mejorar la eficiencia de uso de N en modelos de producción de alta tecnología (Melchiori 2010). Numerosos antecedentes reportan la posibilidad de detectar deficiencias de N en los cultivos a partir de métodos basados en el uso de sensores remotos que miden la reflectancia del canopeo (Scharf et al., 2002; Shanahan et al., 2008; Holland y Schepers, 2010, Melchiori, 2011).

Los resultados de las experiencias en trigo y maíz conducidas hasta el presente en Argentina han permitido validar procedimientos, verificar relaciones y obtener modelos predictivos del rendimiento (**Figura 6**). La respuesta a la fertilización tardía sería factible en trigo y maíz, y si bien los rangos de respuesta medios serían similares para estrategias de aplicación con dosis uniformes, comparado con esquemas que incorporan re-fertilización variable basada en el uso de sensores remotos, las dosis totales podrían reducirse, mejorando la eficiencia de uso del nutriente. Aunque los resultados son alentadores,

persisten dudas acerca de la posibilidad de generalizar modelos de recomendación y, por otra parte, tanto la complejidad de la técnica como el costo de equipamientos específicos, limitan la tasa de adopción de la tecnología (Melchiori, 2012).

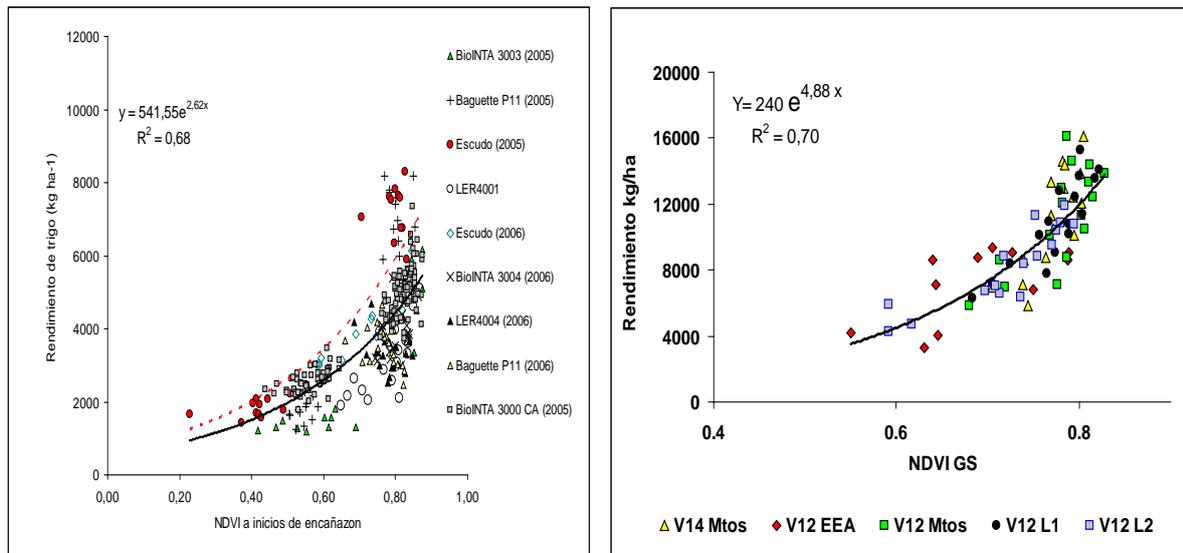


Figura 6. Predicción del rendimiento para trigo (izquierda) y maíz (derecha) en Paraná (Argentina) partir del índice normalizado de diferencias de vegetación (NDVI) utilizando sensores remotos. Adaptado de Melchiori (2012).

Modelos de simulación

En un contexto de avance vertiginoso de la informática y la accesibilidad a la tecnología de la comunicación, los modelos de simulación se sitúan dentro de un paquete de herramientas que nos facilitan los procesos de aprendizaje y toma de decisiones (Passioura, 1996). Su matriz consta de modelos matemáticos que representan, de una manera simplificada, las relaciones entre partes de un sistema dado, y que son capaces de reproducir el funcionamiento del mismo.

El software disponible varía desde instrumentos enfocados sólo en una práctica o decisión hasta verdaderos sistemas de apoyo para la toma de decisiones que integran varios aspectos del manejo de cultivos (fecha de siembra, ciclos de cultivo, fertilización, protección, etc.). Por ejemplo, en Argentina existe una amplia utilización de CERES Trigo y Maíz, CROPGRO Soja, y OILCROP Girasol, todos ellos dentro de la carcasa DSSAT, que permite armar sus bases de datos con información básica normalmente disponible y simular los efectos de muchas de las tecnologías de manejo con mayor impacto en el rendimiento, contemplando la simulación diaria de la dinámica del agua, y los efectos de distintos ambientes edáficos, modificando el crecimiento de los cultivos y la dinámica del N en el suelo (Mercau, 2010).

A modo de ejemplo, citamos algunos modelos de simulación disponibles que sirven de apoyo para la toma de decisiones:

a) **Triguero, Maicero y Granero.** Desarrollados para los cultivos de trigo y maíz por AACREA (Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola) y FAUBA (Facultad de Agronomía, UBA) para un gran número de localidades en la región

pampeana argentina. La base de su funcionamiento consiste en la combinación de escenarios de cultivo, suelo, recarga hídrica, registros climáticos, y disponibilidad de N, para simular el rendimiento. Los resultados se sintetizan en curvas de respuesta del rendimiento, promedio histórica y diferentes percentiles, a un determinado nivel de N disponible. Bajo este enfoque, se facilita el acceso de los productores a curvas de respuestas simuladas de una importante cobertura de ambientes y estrategias de manejo (Satorre et al., 2005).

b) **Nutrient Expert for Hibryd Maize.** Una herramienta desarrollada para ayudar a asesores agrícolas en la formulación de recomendaciones nutricionales para maíz híbrido tropical. En la actualidad este software está siendo adaptado para hacer recomendaciones para maíz y trigo en una variedad más amplia de ambientes. La ausencia de resultados de análisis de suelo no limita el uso de este software (<http://seap.ipni.net/articles/SEAP0059-EN>).

c) **Fertilizer Chooser.** Software desarrollado como un paso final en el proceso de recomendación, Seleccionador de Fertilizante ayuda al usuario a traducir una recomendación nutricional en la cantidad correcta de fuentes de fertilizante disponibles, haciendo comparaciones de costos para encontrar las combinaciones menos costosas de productos disponibles (<http://seap.ipni.net/articles/SEAP0008-EN>).

d) **Seed Placed Fertilizer Decision Aid.** Desarrollado por la Universidad del Estado de Dakota del Sur para ayudar a determinar la cantidad fertilizante que puede ser colocado en la hilera junto a la semilla en una manera razonablemente específica para cada condición. Esta ayuda para la toma de decisiones está basada en un estudio de emergencia de laboratorio con fertilizantes y cultivos comunes y verificado con resultados de estudios de campo publicados existentes (<http://www.ipni.net/article/IPNI-3268>).

Muchos sistemas e instrumentos de apoyo para la toma de decisiones están disponibles alrededor del mundo para sistemas de cultivo específicos. Tienen un gran potencial para mejorar las recomendaciones para la fuente, dosis, momento, y lugar de las aplicaciones de nutrientes. Quienes desarrollan estos sistemas necesitan asegurarse que atiendan todos los aspectos del manejo de nutrientes para las regiones de cultivos en las cuales serán utilizados (IPNI, 2012).

CONSIDERACIONES FINALES

El desarrollo y adopción de determinadas metodologías de diagnóstico nutricional se encuentran estrechamente relacionados a las condiciones específicas de cada sistema de producción. El análisis de suelos es la herramienta más comúnmente utilizada con fines de diagnóstico, pero en determinadas situaciones es necesario complementarlo o utilizar otras alternativas. Las tecnologías actuales imágenes satelitales, mapas de rendimiento, mapas de suelos y topográficos, son de gran utilidad para lograr una mejor definición de ambientes contrastantes. Obviamente, los costos y recursos que involucran el desarrollo e implementación de cada una de estas tecnologías pueden ser una limitante.

Por otro lado, más allá de contar con alternativas sofisticadas no debemos perder el enfoque de un punto esencial: “Conocer la realidad con la que trabajamos”. En la medida que la información generada por una metodología es representativa de lo que realmente sucede con nuestros suelos y cultivos, a nivel productivo permite mejorar los diagnósticos y recomendaciones de nutrientes en términos de fuente, dosis, momento y forma de

aplicación, con los consecuentes efectos positivos sobre los niveles superiores del sistema: ambiental, económico y social.

BIBLIOGRAFÍA

- Aldrich, S.R.** 1986. Plant Analysis: Problems and Opportunities. En: Walsh L.M. y J.D. Beaton (Eds.). Soil Testing and Plant Analysis. 6th Ed. SSSAJ. Madison, Wisconsin, USA: 213-222.
- Alvarez, R., F. Gutiérrez Boem, y G. Rubio.** 2005. Recomendación de fertilización. En R. Alvarez (Coord.). Fertilización de Cultivos de Granos y Pasturas. Diagnóstico y Recomendación en la Región Pampeana. Ed. Facultad de Agronomía (UBA). Buenos Aires, Argentina. pp.37-51.
- Alvarez, R., H. Steinbach, C. Alvarez, y S. Grigera.** 2003. Recomendaciones para la fertilización nitrogenada de trigo y maíz en la pampa ondulada. Informaciones Agronómicas 18:14-19. INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- Barbieri, P.A., H.E. Echeverría, y H.R. Sainz Rozas.** 2008. Nitratos en el suelo a la siembra o al macollaje como diagnóstico de la nutrición nitrogenada en trigo en el sudeste bonaerense. Actas CD XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. San Luis. AACS.
- Bates, T.E.** 1971. Factors affecting critical nutrient concentrations in plants and their evaluation: A review. Soil Science 112:116-129.
- Berardo, A., y F. Grattone.** 2000. Fertilización fosfatada requerida para alcanzar niveles objetivos de P-Bray en un argiudol. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, AACS. Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.
- Bermúdez, M.** 2011. Cómo llevar a la práctica en gran escala el manejo sitio-específico de N y P. : 47-54. En: F.O. García y A.A. Correndo, (Eds.). Actas Simposio Fertilidad 2011 : La Nutrición de Cultivos Integrada al Sistema de Producción. 18-19 de Mayo de 2011, Rosario, Argentina. IPNI Cono Sur y Fertilizar A.C. 276p.
- Blackmer, A.M., y A.P. Mallarino.** 1996. Cornstalk testing to evaluate nitrogen management. Publ. PM-1584. Department of Agronomy, Iowa State University, Ames, Iowa, USA. Disponible en: <http://www.extension.iastate.edu/Publications/PM1584.pdf>
- Brown, J.** 1987. Soil Testing: Sampling, correlation, calibration and interpretation. SSSA Spec. Pub. 21. SSSA. Madison, Wisconsin, EE.UU. 144p.
- Bruuselma T., C. Witt, F. Garcia, S. Li, T. N. Rao, F. Chen, y S. Ivanova.** 2008. A Global Framework for Fertilizer BMPs. Better Crops 92 (2): 13-15. IPNI. Norcross, EE.UU.
- Campbell, C.R.** 2000. Reference sufficiency ranges for plant analysis in the southern region of the United States. N.C. Department of Agriculture and Consumer Services. Disponible en: <http://www.ncagr.gov/agronomi/saaesd/s394.htm>
- Campbell, C.R., y C.O. Plank.** 2000a. Foundation for practical application of plant analysis. N.C. Department of Agriculture and Consumer Services. Disponible en: <http://www.ncagr.gov/agronomi/saaesd/sect1.htm#sect1d>
- Correndo, A.A., y F.O. García.** 2012. Concentración de nutrientes en planta como herramienta de diagnóstico: Cultivos extensivos. Archivo Agronómico No. 14. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica No. 5. IPNI Cono Sur. Buenos Aires. Disponible en: <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1155>
- Cosentino, D., D. Russi, F. García, M. Taboada, D. Carreira, C. Puglisi, L. Castro, L. Santinoni y M. García.** 2011. Primeros resultados del Programa Nacional de Interlaboratorios de Suelos Agropecuarios: 151-154. En: F.O. García y A.A. Correndo, (Eds.). Actas Simposio Fertilidad 2011 : La Nutrición de Cultivos Integrada al Sistema de Producción. 18-19 de Mayo de 2011, Rosario, Argentina. IPNI Cono Sur y Fertilizar A.C. 276p.
- Ferrari, M., H. Castellarín, H.R. Saiz Rozas, H.S. Vivas, R.J.M. Melchiori, y V. Gudelj.** 2010. Evaluación de métodos de diagnóstico de fertilidad nitrogenada para el cultivo de trigo en la región pampeana. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del suelo. El Suelo: pilar de la agroindustria en la pampa argentina, Rosario, Santa Fe, AACS. Cd-rom.
- Ferraris, G., F. Salvagiotti, P. Prystupa, y F. Gutiérrez Boem.** 2004. Disponibilidad de azufre y respuesta de la soja de primera a la fertilización. Actas CD XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná, Entre Ríos. AACS.
- Fixen, P.E., y J. Grove.** 1990. Testing soils for phosphorus. p141- 180. In: R.L. Westerman (ed.) *Soil testing and plant analysis*. 3a. edición. SSSA Book Number 3. Madison, Wisconsin, EE.UU.
- García, F.O. e I.A. Ciampitti.** 2010. Enfoques alternativos para el diagnóstico de fertilidad de suelos: El enfoque tradicional. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 31 de Mayo al 4 de Junio de 2010. Rosario, Argentina. AACS. Cd-rom
- García, F.O., L.I. Picone, y A. Berardo.** 2005. Capítulo 5: Fósforo. En: Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Echeverría H.E. y García F.O. (Eds.). 99-121. INTA.

- García, F.O., M. Boxler, J. Minteguiaga, R. Pozzi, L. Firpo, I.A. Ciampitti, A.A. Correndo, F. Bauschen, A. Berardo, y N. Reussi Calvo.** 2010. La Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe: Resultados y conclusiones de los primeros diez años 2000-2009. AACREA. 64p.
- González, M. M. López, G. Moreno, R. Comese, y M. Madero.** . 2007. Comparación de los métodos de Bray & Kurtz nº I y Mehlich III en la determinación de la disponibilidad de fósforo en suelos con fertilizaciones continuas. *Ci. Suelo* 25(1):23-29.
- González Montaner, J., G. Maddoni, N. Mailland, y M. Porsborg.** 1991. Optimización de la respuesta a la fertilización nitrogenada en el cultivo de trigo a partir de un modelo de decisión para la Subregión IV (Sudeste de la Provincia de Buenos Aires). *Ciencia del Suelo* 9 (1-2):41-51.
- Gutiérrez Boem, F., G. Rubio, y R. Alvarez.** 2005. Diagnóstico de la disponibilidad de nutrientes. *En R. Alvarez (Coord.). Fertilización de Cultivos de Granos y Pasturas. Diagnóstico y Recomendación en la Región Pampeana.* Ed. Facultad de Agronomía (UBA). Buenos Aires, Argentina. pp.27-36.
- Havlin, J., J. Beaton, S. Tisdale, y W. Nelson.** 2005. *Soil Fertility and Fertilizers.* Pearson Education Inc. Upper Saddle River, New Jersey, EE.UU. 7a. edición. 515p.
- Hatfield, J.L., A.A. Gitelson, J.S. Schepers, y C.L. Walthall.** 2008. Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. *Agronomy Journal* 100:117–131.
- Holland, K.H., y J.S. Sxhepers.** 2010. Derivation of a variable rate nitrogen application model for in-season fertilization of corn. *Agronomy Journal* 102:1415-1424.
- Hoogenboom, G., J.W. Jones, C.H. Porter, P.W. Wilkens, K.J. Boote, W.D. Batchelor, L.A. Hunt, y G.Y. Tsuji. (Eds).** 2003. *Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0.* University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, EE.UU.
- IPNI.** 2012. 4r Plant Nutrition Manual: A Manual for Improving the Management of Plant Nutrition, Metric Version, (T.W. Bruulsema, P.E. Fixen, G.D. Sulewski, eds.), International Plant Nutrition Institute, Norcross, GA, USA.
- Janssen, B.H., F.C.T. Guiking, D. van der Eijk, E.M.A. Smaling, J. Wolf, y H. van Reuler.** 1990. A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS). *Geoderma*, 46:299-318.
- Jones, J.B., Jr.** 1993. Modern interpretation systems for soil and plant analyses in the United States of America. *Australian Journal of Experimental. Agriculture.* 33 (8):1039-1043.
- Jones Jr. J.B.** 1998. *Plant Nutrition Manual.* CRC Press. Boca Raton. Florida. USA. 149 pp.
- Leikam, D., R. Lamond, y D. Mengel.** 2003. *Soil Test Interpretations and Fertilizer Recommendations.* Department of Agronomy, Kansas State University. MF-2586. Manhattan, Kansas, EE.UU. Disponible en <http://www.agronomy.ksu.edu/SOILTESTING/DesktopModules/ViewDocument.aspx?DocumentID=1813>.
- MAGyP.** 2010. Disponible en http://www.minagri.gov.ar/SAGPyA/agricultura/agua_y_suelos/01=SAMLA/01-institucional/index.php?PHPSESSID=e154f48eff5ec48f024a537531c6acc5
- Mallarino, A.P.** 2012. Nutrient management for increased crop productivity and reduced environmental impacts. *Actas XIX Congreso Latinoamericano - XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo: "Latinoamérica unida protegiendo a sus suelos".* 16-20 de Abril de 2012. Mar del Plata, Argentina. AACCS-SLCS. Cd-rom.
- Mallarino, A.P., y A.M. Blackmer** 1992. Comparison of Methods for Determining Critical Concentrations of Soil Test Phosphorus for Corn. *Agron. J.* 84:850-856.
- Marban, L., y S. Ratto.** (Eds.). 2005. *Tecnologías en análisis de suelos.* AACCS. Buenos Aires. 215p.
- Melchiori, R.J.M.** 2007. Estado actual del manejo sitio específico de nitrógeno en Argentina. En: F. García e I. Ciampitti (ed.). *Actas Simposio "Fertilidad 2007".* IPNI Cono Sur-Fertilizar AC. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- Melchiori, R.J.M.** 2010. Enfoques alternativos para el diagnóstico de fertilidad de suelos: una mirada desde el cultivo para el manejo de nitrógeno. *Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.* 31 de Mayo al 4 de Junio de 2010. Rosario, Argentina. AACCS. Cd-rom.
- Melchiori, R.J.M.** 2012. Fertilización variable con N: herramientas, criterios y recomendaciones. 19th ISTRO Conference – IV SUCS Meeting. *Striving for Sustainable High Productivity.* 24-28 Septiembre 2012. Montevideo, Uruguay.
- Melchiori, R.J.M., O.P. Paparotti, y P.A. Barbagelata.** 2002. Fertilización fosfatada en soja: validación del nivel crítico. INTA EEA Paraná. En: www.parana.inta.gov.ar
- Melgar, R., G. Vitti, y V. de Melo Benites.** 2011. Fertilizando para altos rendimientos. *Soja en Latinoamérica.* IIP Boletín No. 20. 179 p.
- Mercau, J.** 2010. Enfoques alternativos para el diagnóstico de fertilidad de suelos: una mirada con lentes de modelos funcionales de cultivo. *Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.* 31 de Mayo al 4 de Junio de 2010. Rosario, Argentina. AACCS. Cd-rom.
- Munson, R.D., y W.L. Nelson.** 1986. Principles and Practices in Plant Analysis. En: Walsh L.M. y J.D. Beaton (Eds.). *Soil Testing and Plant Analysis.* 6th Ed. SSSAJ. Madison, Wisconsin, USA: 223-248.

- Munson, R.D. and W.L. Nelson.** 1990. Ch. 14 In, Soil Testing and Plant Analysis, 3rd ed. SSSA Book Series, No. 3.
- Passioura, J.B.** 1996. Simulation Models: Science, Snake Oil, Education, or Engineering? *Agronomy Journal* 88:690-694.
- Peck, T., J. Cope, y D. Whitney.** 1977. Soil Testing: Correlating and interpreting the analytical results. ASA Spec. Pub. 29. ASA. Madison, Wisconsin, EE.UU. 117p.
- Reussi Calvo, N., y H. Echeverría.** 2009. Azufre: Marco conceptual para definir las mejores prácticas de manejo en los cultivos. *En* F. García e I. Ciampitti (ed.). Simposio Fertilidad 2009: Mejores prácticas de manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de cultivos. IPNI Cono Sur-Fertilizar AC. pp.52-59.
- Rice, C., y J. Havlin.** 1994. Integrating mineralizable nitrogen indices into fertilizer nitrogen recommendations. *In* J. Havlin y J. Jacobsen (ed.). Soil testing: Prospects for improving nutrient recommendations. SSSA Spec. Pub. 40. SSSA. Madison, Wisconsin, EE.UU. pp.1-13.
- Ruiz R., E. Satorre, G. Maddoni, J. Carcova, y M. Otegui.** 2001. Umbrales de decisión para la fertilización nitrogenada en maíz. VII Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino, Buenos Aires, Argentina.
- Sainz Rozas, H., H. Echeverría, G. Studdert, y G. Domínguez.** 2000. Evaluation of the presidedress soil nitrogen test for no-tillage maize fertilized at planting. *Agron. J.* 92:1176-1183.
- Sainz Rozas, H., P. Calviño, H. Echeverría, M. Redolatti, y P. Barbieri.** 2008. Contribution of anaerobically mineralized nitrogen to reliability of planting or presidedress soil nitrogen test in maize. *Agronomy Journal* 100:1020-1025.
- Satorre, E., F. Menéndez, y G. Tinghitella.** 2005. El modelo Triguero: Recomendaciones de fertilización nitrogenada en trigo. Simposio "Fertilidad 2005: Nutrición, Producción y Ambiente". Rosario, 27-28 Abril. INPOFOS Cono Sur-Fertilizar A.C. pp.3-11.
- Scharf, J.C., J.P. Schmidt, N.R. Kitchen, K.A. Sudduth, S.Y. Jong, J.A. Lory, y J.G. Davis.** 2002. Remote sensing for nitrogen management. *Journal of Soil and Water Conservation.* Nov-Dec 2002: 518-524.
- Shanahan, J.F., N.R. Kitchen, W.R. Raun, y J.S. Schepers.** 2008. Responsive in-season nitrogen management for cereals, computers and electronics in agriculture 6 1:51-62.
- Sims, J.T.** 2000. Soil fertility evaluation. *En* M.E. Sumner (ed.). Handbook of Soil Science. CRC Press. Boca Raton, FL. pp.113-153.
- Sumner, M.E.** 1977. Applications of Beaufils diagnostic indices to maize data published in the literature irrespective of age and conditions. *Plant Soil* 46:359-369.
- Terrazas, J.; G. Guaygua,, G.; E. Juárez, y F. O. García.** 2012. Respuesta a la fertilización en cultivos de las planicies del este de Bolivia. Actas XIX Congreso Latinoamericano - XXIII Argentino de la Ciencia del Suelo. "Latinoamérica unida protegiendo a sus suelos". 16-20 de Abril de 2012. AACs-SLCS. Mar del Plata, Argentina. Cd-rom
- Walsh, L., y J. Beaton.** 1973. Soil Testing and Plant Analysis. Revised edition. SSSA. Madison, Wisconsin, EE.UU. 491p.
- Zamuner, E., L. Picone, y H. Echeverria.** 2004. Comparación de métodos de extracción de fosforo disponible Bray 1 sobre la respuesta de la fertilización fosfatada en trigo. *Ciencia del Suelo* 22(2):57-63.