

TECNICAS DE DIAGNOSTICO UTILES EN LA MEDICION DE LA FERTILIDAD DEL SUELO Y EL ESTADO NUTRIMENTAL DE LOS CULTIVOS

Useful Techniques of Diagnosis in the Measurement of the Soil Fertility and the Nutrient Status of Crops

Jorge D. Etchevers Barra¹

RESUMEN

Para obtener rendimientos cercanos a los máximos posibles, en el caso de cualquier cultivo y agroecosistema, se requiere que las necesidades nutrimentales básicas de los cultivos sean satisfechas. Estos rendimientos deben ser económicamente viables. Las necesidades indicadas pueden verse desde dos puntos de vista: (1) la concentración mínima, o la óptima, que un nutriente debe tener en toda la parte aérea, en un órgano seleccionado con anterioridad como indicador del estado nutricional o en la savia y (2) la cantidad de nutriente (en kg ha⁻¹) que la planta debe contener en cada etapa de su vida para aspirar a alcanzar esos rendimientos. La primera es un valor constante para cada edad de la planta, proporcional a la cantidad de materia seca (carbono principalmente) que ésta contenga en un momento determinado, y por lo tanto dependiente de las etapas de desarrollo del cultivo, pero independiente del rendimiento; esto es, para aspirar a obtener el rendimiento máximo que el medio ambiente permita, es necesario que esa concentración sea satisfecha; de no ser así, los rendimientos posibles que pudieran alcanzarse no serán obtenidos. El segundo criterio, es decir, la cantidad de nutriente que la planta requiere en cada etapa de su desarrollo, es dependiente, en general, de los rendimientos y, en particular, de los rendimientos máximos posibles de obtener en cada condición específica; cuando ésta permite la obtención de mayores rendimientos, las cantidades de nutrientes que requerirá el cultivo serán mayores.

Para verificar que las concentraciones mínimas requeridas en cada momento del ciclo de desarrollo del cultivo se están satisfaciendo, se cuenta con la herramienta del análisis químico de tejidos vegetales.

Dichas concentraciones (niveles críticos, rangos de concentración, valores DRIS, índices de distintas naturaleza) deben ser determinadas con anterioridad a la aplicación del instrumento de diagnóstico indicado. Hoy sólo se conocen algunos de estos valores, pero cada día se agregan más a la lista; por lo general, la información disponible se refiere a concentraciones que se deben satisfacer en ciertos órganos de la planta en momentos muy específicos de su desarrollo. La determinación de estas concentraciones de referencia puede hacerse directamente en el campo o en el laboratorio por diversos procedimientos claramente establecidos, pero que requieren de un buen control de la calidad de los análisis. El principal órgano observado es la hoja, de ahí que a la técnica se le llame diagnóstico foliar, sin embargo, es posible analizar cualquier otro órgano para el que se cuente con información sobre sus concentraciones de referencia o la savia.

El segundo enfoque, es decir, la estimación de las cantidades de nutrimentos requeridas para alcanzar cierto rendimiento (establecido por las condiciones particulares de suelo y clima del sitio y por la planta y manejo en cuestión) precisa de ciertos conocimientos teóricos y el empleo de técnicas de análisis químico de suelo y planta. Estas últimas se emplean para medir los contenidos totales de nutrimentos en la planta al momento de la colecta (cualquiera que éste sea), y son análisis que se realizan con anterioridad y sus valores son conocidos. Este dato, junto con los rendimientos esperados o posibles y los índices de cosecha respectivos, se emplea para calcular la demanda nutrimental, esto es, los kilos por hectárea de un nutrimento que la planta debe poder extraer desde el suelo e incorporar a sus tejidos para alcanzar los rendimientos indicados. Los análisis de suelo se emplean para estimar la disponibilidad de un elemento en particular. Los análisis de suelo son índices de disponibilidad y no las verdaderas cantidades disponibles de un elemento. Para la adecuada interpretación de este análisis, es preciso o contar con calibraciones, que se obtienen a través de la ejecución de costosos y complejos experimentos de campo (los

¹ Colegio de Postgraduados, Instituto de Recursos Naturales, Especialidad de Edafología, Area de Fertilidad de Suelos, Km. 35.5 Carr. México- Texcoco, 56230 Montecillo, Texcoco, Edo. de México, México.

Recibido: Febrero de 2000.

Aceptado: Junio de 2000.

cuales han sido escasamente realizados en México) o el uso de otro tipo de información también previamente establecida. La interpretación de los análisis químicos de suelos requiere de un necesario conocimiento de la teoría que los soportan, base del éxito de la misma. Una variante de los análisis químicos de suelo es la medición de las concentraciones nutrimentales en la solución de éste, que está recibiendo una atención preferente en sistemas de producción con fertirrigación. En resumen, se puede decir que los productores y técnicos de agro cuentan con una gran variedad de medios analíticos que permiten reducir el riesgo de que los cultivos no se desempeñen óptimamente por falta de una nutrición adecuada.

Palabras clave: *Nutrición óptima, análisis de tejido, análisis de savia, análisis de suelo.*

SUMMARY

To obtain yields near the possible maximums, in the case of any crop and agroecosystem, it is required that the basic nutrimental necessities of the crops are satisfied. These yields must be economically viable. The indicated necessities can be seen from two points of view: (1) the minimum concentration, or the optimal one, that a nutrient must have in all the aerial part, in an organ previously selected as an indicator of the nutritional stage or in the sap, and (2) the amount of nutrient (in kg ha^{-1}) that the plant must contain in each stage of its life to aspire to reach those yields. The first one is a constant value for each age of the plant, proportional to the amount of dry matter (carbon mainly) that this contains at a certain moment, and therefore is dependent on the stages of development of the crop, but not dependent on the yield; this is, it is necessary that the concentration is satisfied to aspire to obtain the maximum yield that the atmosphere allows; otherwise, the possible yields that could be reached will not be obtained. The second criterion, that is to say, the amount of nutrient that the plant requires in each stage of its development, depends, in general, on the yields, and particularly, on the maximum possible yields to obtain in each specific condition; when this allows the obtaining of high yields, the amounts of nutrients that the crop will require will be high.

In order to verify that the required minimum concentrations are being satisfied at every moment of

the development cycle of the crop, it is counted on the tool of the chemical vegetal tissue analysis. These concentrations (critical levels, ranks of concentration, DRIS values, and indices of different nature) must be determined prior to the application of the instrument of indicated diagnosis. Today only some of these values are known, but every day more values are added to the list; generally, the available information refers to concentrations that are due to satisfy in certain organs of the plant at very specific moments of its development. The determination of these reference concentrations can be made directly on the field or at the laboratory by diverse clearly established procedures, but that requires a good control of the analyses quality. The main organ observed is the leaf, for that reason the technique is called foliar diagnosis, nevertheless, it is possible to analyze any other organ for which information on its reference concentrations or on the sap exists.

The second focus, that is to say, the estimation of the amounts of nutrients, required to reach a certain yield (established by the particular conditions of soil and climate of the site and by the plant and handling), needs certain theoretical knowledge and the use of techniques of chemical soil and plants analysis. These last ones are used to measure the total contents of nutrients in the plant at the time of collection (whatever that time is), and these are analyses that are made previously and their values are known.

This data, along with the expected or possible yields and the respective harvest indices, is used to calculate the nutrimental demand, that is to say, the kilos per hectare of a nutrient that the plant must be able to extract from the soil and to incorporate to its tissues to reach the indicated yields. Soil analyses are used to estimate the availability of a particular element. Soil analyses are availability indices and not the real available amounts of an element. To interpret adequately this analysis, it is necessary to count on calibrations, which are obtained through the execution of expensive and complex field experiments (which have scarcely been made in Mexico), or to use an other type of information also previously established. The interpretation of the chemical soil analyses requires a necessary knowledge of the theory that supports them. A variant of the chemical soil analyses is the measurement of the nutrient concentrations in the soil solution that is receiving a preferred attention in production systems with fertigation. In short, it is possible to say that the land producers and technicians

count on a great variety of analytical means that allow to reduce the risk that crops do not evolve optimally by lack of a suitable nutrition.

Index words: *Optimal nutrition, tissue analysis, sap analysis, soil analysis.*

INTRODUCCION

Los rendimientos que puede alcanzar un cultivo que se establece en una condición dada, generalmente no son predichos con gran exactitud. Dicha imprecisión se debe, en parte, a la escasa comprensión que tenemos de la manera como los rendimientos son determinados por los diferentes componentes del sistema planta-suelo-clima. La falta de exactitud en la predicción de los rendimientos afecta la calidad de la recomendación de fertilización que se hace para un cultivo. Esto se debe a que las necesidades nutrimentales de los cultivos son función de los rendimientos que éstos puedan alcanzar. Si el agroecosistema tiene un potencial de rendimiento elevado, las necesidades nutrimentales serán consecuentemente más elevadas y *viceversa* (Rodríguez, 1993). Este hecho, aunque bien entendido en los círculos técnicos, es escasamente reconocido por ciertos sectores. Su aceptación se considera importante, particularmente cuando se aspira a que el manejo que se haga de los fertilizantes sea conducente a una agricultura sustentable.

NUTRICION OPTIMA

Un especialista en nutrición de cultivos se preocupa de que ninguno de los elementos esenciales para el crecimiento de las plantas sea o se vaya a constituir en un factor limitativo para que las plantas alcancen los rendimientos máximos posibles en un ambiente dado.

Ello exige conocer cuál es el rendimiento máximo posible (Galvis *et al.*, 1993). Es obvio, desde un punto de vista agronómico, que la demanda nutrimental de un cultivo aumentará a medida que aumentan el rendimiento y la producción de biomasa asociada con éste.

Consecuentemente, el primer paso en el diseño de un plan de manejo nutrimental de un cultivo debe ser definir los rendimientos máximos posibles.

El segundo aspecto que debe ser dilucidado al estructurar el plan de manejo nutrimental es: qué proporción de dicha demanda puede ser cubierta por

el suelo, es decir, el suministro nutrimental en las condiciones en que se encuentra el suelo. Es conocido que la demanda de muchos de los elementos esenciales puede ser satisfecha por la fertilidad intrínseca de los suelos, particularmente cuando los rendimientos esperados son bajos, así como, que el abastecimiento que hace el suelo de varios elementos esenciales, particularmente de los macronutrientes primarios, no es suficiente para satisfacer la demanda de los cultivos. Entre los elementos que con mayor frecuencia se encuentra en déficit en los suelos, están: el nitrógeno, el fósforo, el potasio y con menor frecuencia el boro y el magnesio. En los suelos de carácter alcalino es común observar problemas de abastecimiento de algunos micronutrientes. El calcio sólo es deficiente en ambientes ácidos. En el caso específico de las hortalizas, flores y frutales, además de los aspectos de rendimientos relacionados con la nutrición, debe considerarse el efecto que tiene la nutrición en la calidad de los productos.

Gran parte del esfuerzo en el área de nutrición de cultivos, en el pasado, ha sido dedicado a evaluar la capacidad de abastecimiento nutrimental que poseen los suelos y los requerimientos nutrimentales de los cultivos (Westerman, 1990). Esta tarea cae dentro del área llamada diagnóstico de la fertilidad del suelo y estado nutrimental de los cultivos. En la actualidad, además de medir esa capacidad de abastecimiento, es común que en la agricultura de altos insumos, de carácter empresarial, se haga un seguimiento del estado nutrimental de los cultivos a lo largo del ciclo de crecimiento, para evitar que la nutrición pudiese ser un factor limitativo para la producción (Reuter y Robinson, 1986).

Si el diagnóstico señala que el abastecimiento nutrimental es deficiente, es necesario balancear dicho abastecimiento mediante la aplicación de sustancias denominadas fertilizantes o corregir directamente el desabasto con aplicaciones al cultivo. Las relaciones entre producción y calidad, y la cantidad y tipo de fertilizante que se debe aplicar, son parte del dominio de lo que se llama la fertilidad cuantitativa. En ocasiones, como en la ferti-irrigación, se da la oportunidad de calcular y abastecer día a día las necesidades de nutrimentos que tendrá la planta aumentando dramáticamente la eficiencia de uso y disminuyendo las probabilidades de contaminación que se generan cuando todo el fertilizante es aplicado en una o dos exhibiciones.

Se sabe que las aplicaciones de fertilizantes no son cien por ciento efectivas. Esto quiere decir que la

planta sólo puede utilizar una parte de lo aplicado. De aquí que haya la necesidad de conocer la eficiencia de uso de los distintos fertilizantes en los diferentes cultivos. Esta eficiencia depende de la naturaleza de los fertilizantes, del tipo de cultivo, del suelo y de la tecnología de aplicación. Los aspectos relacionados con la aplicación de fertilizantes se abordan en el ámbito de la tecnología de uso de fertilizantes.

En resumen podemos decir, que el plan de manejo nutrimental de un cultivo depende de la demanda nutrimental de éste, del suministro que pueda hacer el suelo y de la eficiencia de uso de fertilizante. Todo lo cual se expresa en un modelo simplificado (Rodríguez, 1993), que dice:

$$\text{Dosis de fertilizante} = \frac{\text{Demanda del cultivo} - \text{Suministro del suelo}}{\text{Eficiencia de recuperación del fertilizante}}$$

Si la demanda del cultivo es menor o igual al suministro, la dosis de fertilizante a aplicar sería cero, aunque, en estos casos agrónomicamente es aconsejable aplicar una fertilización de mantenimiento equivalente a la exportación de nutrientes por el producto de la cosecha más una pequeña cantidad.

Si la demanda nutrimental es mayor que el suministro por el suelo, será necesario fertilizar. La dosis de fertilizante que se aplicará será proporcional a la magnitud del déficit encontrado.

Para medir demanda, suministro y eficiencia de recuperación del fertilizante, así como para analizar los problemas de carácter nutrimental que se presentan o pudiesen presentar durante la producción de un cultivo, y para determinar algunos aspectos relacionados con la calidad del agua y del suelo es necesario contar con procedimientos químicos adecuados. Estos se discuten a continuación.

Analizaremos a continuación algunas ideas referentes a los rendimientos máximos posibles de los cultivos y a su relación con la nutrición, para de allí derivar algunas prácticas que nos permitan realizar un mejor control de la nutrición de los cultivos.

RENDIMIENTOS Y NECESIDADES NUTRIMENTALES

Un cultivo puede alcanzar un rendimiento cercano al máximo que se le permite en una condición determinada (agroecosistema), cuando los niveles de todos los factores de crecimiento necesarios para su crecimiento y desarrollo son ideales. Entre ellos, los niveles que se refieren a sus necesidades

nutrimentales básicas deben estar plenamente satisfechos. Es preciso aclarar que los rendimientos máximos posibles que son de real interés son aquellos económicamente viables más que los fisiológicos, pero que primero hay que definir estos últimos.

Lo anterior implica algunas ideas que es preciso recalcar: (1) que existe un rendimiento máximo que los cultivos podrían alcanzar, pero que éste es un nivel teórico; (2) que en la práctica es imposible alcanzar dichos rendimientos, ya que no se puede contar naturalmente con niveles ideales de todos y cada uno de los factores de crecimiento; algunos, los menos, pueden ser controlados por el hombre, pero la intensidad de los no controlables depende de cada sistema ecológico en particular; (3) que si se optimizasen todos aquellos factores que el hombre puede controlar, todavía se tendrían factores (factores no controlables) que dependen del ecosistema, que se ubicarían en niveles inferiores a los ideales; la intensidad de estos factores no controlables sería la que determinaría el rendimiento que un cultivo puede alcanzar bajo una condición dada, partiendo de la base que todos los factores controlables fueron llevados a un óptimo; (4) como corolario de todo lo anterior surge, que un mismo cultivo puede alcanzar distintos rendimientos dependiendo del lugar donde se siembre y que se podrán obtener rendimientos cercanos a los máximos para esa condición específica, si todos los factores controlables son llevados a niveles cercanos a sus óptimos.

De inmediato surge la pregunta ¿cómo se pueden establecer estos rendimientos cercanos a los máximos? Hay varias maneras que se describen a continuación.

Los rendimientos máximos alcanzables en una zona cualquiera se pueden establecer a partir de una encuesta que se realiza entre los mejores agricultores de la zona. En ésta se debe obtener información acerca de los rendimientos máximos que logran y la frecuencia con que éstos son alcanzados. También pueden estimarse con base en los rendimientos máximos alcanzados en redes de ensayos experimentales conducidos en el área. Se supone en este caso, que los experimentos son conducidos de manera tal que el rendimiento obtenido por el mejor tratamiento es cercano al máximo posible (en numerosas ocasiones se han introducido en estos experimentos tratamientos para medir el rendimiento máximo posible). Para dar respuesta a la pregunta inicial, también es factible establecer algunas funciones empíricas en que se relacionen éstos con

alguna variable medible o estimable que tenga gran influencia en su expresión (por ejemplo, cantidad de agua caída, disponibilidad de agua en el suelo, algún estimador del déficit evapotranspirativo, etc.) (Galvis *et al.*, 1993). En otros casos, es posible usar modelos predictivos desarrollados especialmente para este objetivo. El problema con estos últimos es que generalmente requieren de una gran cantidad de información que no siempre está disponible (Volke y Etchevers, 1994).

Conocido el rendimiento es posible calcular la biomasa asociada con dicho rendimiento y con ello la demanda nutrimental.

La demanda nutrimental se puede estimar una vez que se conozca la biomasa de la parte aérea (biomasa) y el llamado requerimiento nutrimental interno de un cultivo (Rodríguez, 1993).

$\text{Demanda} = \text{Biomasa} \times \text{Requerimiento Interno}$

La biomasa se relaciona de una manera bastante definida, bajo condiciones de normalidad, con los rendimientos de la parte útil (rendimiento) mediante la siguiente expresión:

$\text{Biomasa} = \text{Rendimiento} / \text{Índice de Cosecha}$

donde

$\text{Índice de Cosecha} = \text{Rendimiento} / \text{Biomasa}$

CONTROL DEL ESTADO NUTRIMENTAL DEL SUELO

Si los nutrientes que la planta demanda en una condición dada son proporcionados por el suelo y/o la fertilización, no habrá restricción para que, dada las otras condiciones óptimas, los rendimientos se acerquen a los posibles de alcanzar en el ecosistema. Si, por el contrario, la cantidad de nutrientes disponible es inferior a la que la planta demanda, aunque existan las otras condiciones ideales para acercarse a los rendimientos máximos del ecosistema, esto no ocurrirá. Los nutrientes se habrán transformado en el factor limitativo para el desarrollo.

Afortunadamente entre los factores que se pueden controlar está la nutrición de las plantas. Y como existe una estrecha relación entre las necesidades cuantitativas de nutriente y los rendimientos que se pueden alcanzar, es preciso prestar atención a este

factor. Si no se satisface la demanda nutrimental o necesidad nutrimental que la condición particular de crecimiento del cultivo impone, no será posible acercarse a los rendimientos máximos posibles para esa condición.

Las necesidades indicadas pueden verse desde los puntos de vista: (1) la concentración mínima, o la óptima, que un nutriente debe tener, ya sea en la parte aérea, en un órgano seleccionado con anterioridad como indicador del estado nutricional o en la savia y (2) la cantidad de nutriente que la planta debe contener en cada etapa de su vida para aspirar a alcanzar esos rendimientos.

La primera es un valor constante para cada edad de la planta, proporcional a la cantidad de materia seca (carbono principalmente) que ésta contenga en un momento determinado y, por lo tanto, dependiente de las etapas de desarrollo del cultivo, pero independiente del rendimiento; esto es, para aspirar a obtener el rendimiento máximo que el medioambiente permita, es necesario que esa concentración sea satisfecha; de no ser así, los rendimientos posibles que pudieran alcanzarse no serán obtenidos.

El segundo criterio, es decir, la cantidad de nutriente que la planta requiere en cada etapa de su desarrollo, es dependiente, en general, de los rendimientos y, en particular, de los rendimientos máximos posibles de obtener en cada condición específica; cuando ésta permite la obtención de mayores rendimientos, las cantidades de nutrientes que requerirá el cultivo serán mayores.

DIAGNOSTICO DE CAMPO

El diagnóstico de campo es una técnica accesible y todos los técnicos del agro deberían estar familiarizados con ella. Se considera como el equivalente de la medicina de guerra, se ejerce en el lugar de los hechos y se cuenta con pocos recursos, pero por lo general son suficientes para salvar un cultivo.

Los otros dos niveles, invernadero y laboratorio, son importantes para confirmar los diagnósticos de campo, o en situaciones particularmente complejas, donde los recursos con que se cuenta no permiten profundizar en las causas de algún fenómeno.

El diagnóstico de campo debería ser suficiente, en la mayoría de los casos, para resolver las situaciones que se presentan con mayor frecuencia. La gran mayoría de los problemas de producción se

concentran en unas pocas causas que, bien entendidas y estudiadas, deberían ser fácilmente identificables y solucionables.

El análisis global del comportamiento de un cultivo en condiciones reales de campo, o diagnóstico del sistema de producción, es la herramienta primaria de que disponen los especialistas en producción para evaluar el desempeño de un cultivo. Este análisis está destinado a identificar él o los factores restrictivos que pudiesen presentarse. El diagnóstico del sistema se realiza mediante la inspección, generalmente visual, de los principales componentes del sistema de producción y de los factores que los influyen. Estos componentes y factores son: el suelo (su estado general, profundidad, textura, estructura, capacidad de retención de agua, presencia de sales, drenaje interno, capacidad para suministrar nutrientes, etc.); la planta (variedad, desempeño, vigor, adaptación, estado nutricional, abastecimiento de agua, etc.); el clima (temperaturas diurnas y nocturnas, radiación, probabilidad de lluvias y heladas, etc.); y el hombre, quien interviene a través del manejo general del cultivo (oportunidad de establecimiento, control de malezas, podas, etc.); el manejo del agua (cantidad y calidad del agua, salinidad, sistema de riego, drenaje, etc.); el manejo sanitario (control de plagas y enfermedades), y el manejo nutricional (deficiencias, toxicidades, desbalances).

MEDICIONES DEL ESTADO NUTRIMENTAL

Para verificar que el estado nutricional de un cultivo sea el ideal en cada momento de su ciclo de desarrollo, se cuenta con herramientas analíticas químicas que sirven para medir concentraciones nutricionales en los tejidos vegetales y en el suelo. Las herramientas de diagnóstico que requieren de laboratorios se refieren a los análisis químicos de suelo, solución de suelo, tejido vegetal, savia, agua de riego (Reuter y Robinson, 1986; Westerman, 1990).

Análisis de Tejido

Los valores medidos en la planta pueden ser transformados en índices o utilizados directamente y comparados con criterios previamente establecidos como: niveles críticos, rangos de concentración, valores DRIS, y otros índices de distinta naturaleza deben ser determinados con anterioridad a la aplicación del instrumento de diagnóstico indicado (Westerman, 1990). Hoy sólo se conocen algunos de

estos valores, pero cada día se agregan más a la lista; por lo general, la información disponible se refiere a concentraciones que se deben satisfacer en ciertos órganos de la planta en momentos muy específicos de su desarrollo. La determinación de estas concentraciones de referencia puede hacerse directamente en el campo o en el laboratorio por diversos procedimientos claramente establecidos, pero que requieren de un buen control de la calidad de los análisis. El principal órgano observado es la hoja, de ahí que a la técnica se le llame diagnóstico foliar, sin embargo, es posible analizar cualquier otro órgano para el que se cuente con información sobre sus concentraciones de referencia o la savia.

El segundo enfoque, es decir, la estimación de las cantidades de nutrientes requeridas para alcanzar cierto rendimiento (establecido por las condiciones particulares de suelo y clima del sitio y por la planta y manejo en cuestión) precisa ciertos conocimientos teóricos y el empleo de técnicas análisis químico de suelo y planta. Estas últimas se emplean para medir los contenidos totales de nutrientes en la planta al momento de la colecta (cualquiera que éste sea), y son análisis que se realizan con anterioridad y sus valores son conocidos. Este dato, junto con los rendimientos esperados o posibles y los índices de cosecha respectivos, se emplea para calcular la demanda nutricional, esto es, los kilos por hectárea de un nutrimento que la planta debe poder extraer desde el suelo e incorporar a sus tejidos para alcanzar los rendimientos indicados.

El análisis de tejido vegetal tiene tres variantes bien definidas, cuyos objetivos son, en general, distintos. Estas variantes son: el análisis del total de la parte aérea de la planta, el análisis de hojas u otros órganos de referencia y el análisis de savia.

Análisis de la parte aérea de la planta. Los análisis de la parte aérea de la planta proporcionan información acerca de la concentración de los nutrientes en ésta y, cuando debidamente relacionados con la producción de materia seca, sobre la cantidad de cada nutriente en ella. Existen dos variantes, el análisis secuencial o en varias etapas del crecimiento y el análisis al final del ciclo de crecimiento.

Análisis secuencial. El análisis secuencial se hace periódicamente desde el inicio del crecimiento hasta su madurez de la planta. Se emplea para establecer la dinámica de la absorción, esto es, cuáles son las concentraciones nutricionales que se observan en distintas fases del desarrollo de la planta y las demandas particulares de nutrientes (cantidades de

nutrientes presentes en la parte aérea) en los diversos estados fisiológicos de la planta. Esta última información sirve para determinar los momentos más adecuados para la adición de fertilizantes dentro del ciclo de desarrollo del cultivo. Al estudio secuencial de nutrientes también se le conoce con el nombre de marcha de absorción nutrimental.

Análisis al final del ciclo de crecimiento. Los resultados de este análisis se emplean para obtener información sobre la cantidad total de elementos absorbida por la planta (exportación de nutrientes desde el suelo) y también para determinar el requerimiento interno, esto es, la concentración mínima de nutrientes que se requiere para alcanzar el rendimiento máximo posible. También se usa como indicador primario de la necesidad de fertilizantes que tiene un cultivo determinado. En general, la demanda nutrimental así medida menos la cantidad de nutriente que puede proporcionar el suelo, considerando un apropiado factor de eficiencia de uso de fertilizante, debería ser lo que se agregase como complemento nutrimental, es decir, la dosis de fertilización.

El análisis del total de la parte aérea de la planta es impráctico para frutales, especies forestales y otros cultivos similares de naturaleza perenne, por lo que el uso de órganos de referencia ha ganado popularidad con el fin de diagnosticar el estado nutrimental.

Análisis de hojas u otros órganos de referencia. El análisis foliar se emplea para evaluar el estado nutrimental de las plantas e indirectamente la disponibilidad de nutrimentos por el suelo. Se puede medir la concentración total de un elemento en la planta o una fracción de ésta. El análisis de plantas se emplea principalmente para diagnosticar deficiencias nutrimentales y como base para formular recomendaciones de fertilización.

El órgano que se usa con mayor frecuencia con el propósito de diagnosticar el estado nutrimental de los cultivos es la hoja, de ahí que también se le llame análisis foliar. Otros órganos pueden prestar igual utilidad, como por ejemplo: los tejidos meristemáticos nodales, los frutos, etc. El análisis foliar requiere de definiciones precisas en cuanto a la edad de la hoja a observar, orientación, altura, posición, cultivar y, en ciertos casos, hasta de la hora del día en que se hace el muestreo. La interpretación de los resultados requiere de una investigación previa para establecer niveles de referencia. De estos aspectos hablaremos en detalle cuando tratemos este tema más adelante.

El fundamento del análisis foliar es la relación que existe entre la concentración de un nutrimento en un

órgano específico de la planta, colectado en un momento también específico de su desarrollo y el rendimiento de ésta. En la Figura 1 se muestra la naturaleza de esta relación y las distintas zonas en que se ha dividido la curva de asociación. De esta división se derivan los criterios interpretativos del análisis químico vegetal.

Los principales criterios para la interpretación de los análisis de tejido vegetal son el nivel crítico de deficiencia y toxicidad y los rangos de concentración.

Se define como nivel (valor o concentración) crítico de deficiencia de la parte especificada, la concentración de un nutriente en particular, determinada en condiciones experimentales, donde todos los factores de crecimiento se encuentran en un nivel óptimo, que se asocia con un valor predeterminado del rendimiento (o calidad) máximo. Este valor predeterminado corresponde a 90 ó 95 % del rendimiento máximo y está comprendido dentro del rango bajo o marginal. La concentración nutrimental de un cultivo siempre debería mantenerse ligeramente arriba del nivel crítico.

El nivel (valor o concentración) crítico de toxicidad es el que se asocia con una reducción, por exceso nutrimental, de 5 a 20 % del rendimiento máximo.

Los rangos de concentración se han dividido en deficiente, bajo o marginal, adecuado o suficiente, alto y tóxico o excesivo. A continuación se define cada uno de ellos.

Deficiente. Es el rango de concentración, en la parte especificada, que se asocia con síntomas visibles de deficiencia en plantas y con una severa reducción del crecimiento y la producción. Cada vez que se encuentren valores en este rango es preciso tomar medidas correctivas inmediatas.

Bajo o Marginal. Este es el rango de concentraciones, en la parte especificada que se asocia con una reducción del crecimiento o producción, pero en el cual la planta no muestra síntomas visibles de deficiencia. Cuando se observan niveles de este tipo, es preciso efectuar algunos cambios en las prácticas de fertilización. Sin embargo, para ciertos cultivos pudiera ser conveniente operar en este nivel, por ejemplo en el caso de las flores.

Adecuado o Suficiente. Dentro de este rango de concentración, en la parte especificada, los cambios que ocurren no provocan aumentos o disminución del crecimiento o producción. Esta clase también se conoce como intermedia, normal, o satisfactoria. Si los valores de un análisis de planta caen en esta clase

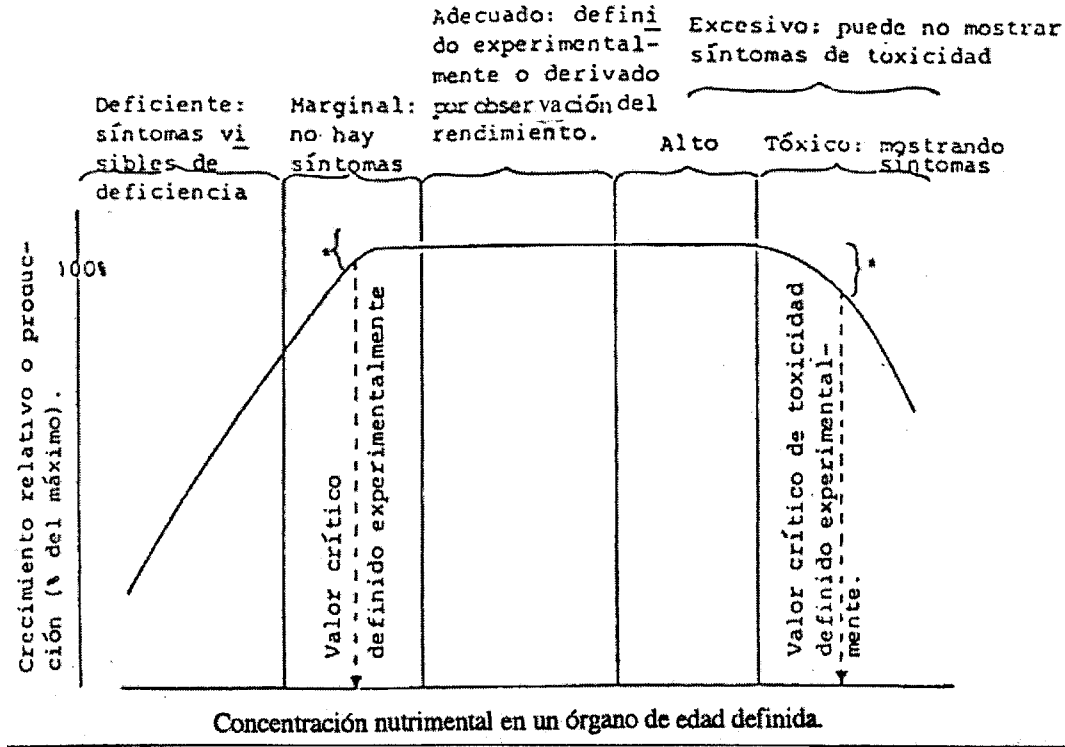


Figura 1. Diagrama que ilustra la relación entre el crecimiento y la concentración nutrimental de un cultivo y el significado de los términos usados para clasificar el estado nutrimental de las plantas.

no es necesario realizar ningún cambio en las prácticas de fertilización.

Alto. Esta clase representa el rango de concentración, de la parte especificada, comprendido entre los rangos adecuados y tóxico o excesivo. En algunos cultivos esta clase puede definirse objetivamente por su asociación con una tendencia hacia la producción de calidad o vigor indeseables. El uso de fertilizantes en las plantas que muestren concentraciones nutrimentales en este rango debe reducirse o suspenderse hasta que éstas se establezcan en el rango adecuado o suficiente.

Tóxico o Excesivo. La presencia de concentraciones tóxicas de un nutriente, en la parte especificada, se asocia generalmente con síntomas de toxicidad y algunas veces con reducción en el rendimiento y casi siempre con reducción de calidad y vigor excesivo. Cuando se encuentran valores en este rango, es preciso tomar medidas correctivas inmediatas.

Existen otras formas de interpretar los resultados de los análisis químicos de planta, como son el DRIS (Sistema Integrado de Diagnóstico y Recomendación),

los Índices de Balance, las Relaciones Ternarias, que no discutiremos aquí.

El análisis químico de planta es de particular ayuda para diagnosticar el estado nutrimental de cultivos permanentes (frutales, forestales, viñedos), pero su utilidad para cultivos anuales es limitada. La razón fundamental es que los ciclos de crecimiento de estos últimos son muy cortos y el diagnóstico ocurre muy tarde en la vida de la planta. Sin embargo, el análisis químico de plantas en especie anuales tiene amplio empleo, pero con otros propósitos, como son medir la eficiencia de uso de los fertilizantes, indicadores de calidad, etc.

Una variante del análisis químico vegetal clásico que se realiza en el laboratorio, generalmente con muestras secas, es el análisis rápido que se practica en el campo sobre muestras frescas, que por lo común emplea la savia de las plantas. Esta técnica, cuando bien empleada y calibrada, permite tomar decisiones rápidas, en el momento del diagnóstico, que contribuyen a aminorar las pérdidas de rendimiento causadas por concentraciones sub-normales de un elemento.

Análisis de Savia

El análisis de savia consiste en extraer este líquido de toda la planta o algún órgano de referencia y determinar en él los elementos minerales y sustancias orgánicas de interés para la nutrición de la planta (Hernando y Cadahia, 1973). El análisis de savia permite conocer la situación nutrimental de una planta en un momento dado de su desarrollo. Esta es una diferencia con el análisis foliar o de planta entera, en el cual se reflejaría la situación nutrimental pasada del cultivo

Existen dos variantes principales de esta técnica: la que permite hacer análisis rápido en el campo y otra que precisa de equipos complejos y facilidades de laboratorio, aunque el progreso tecnológico ha tendido a borrar esas diferencias y hoy se puede hacer un gran número de análisis en condiciones de campo. Aquí sólo hablaremos de los primeros.

Análisis rápido de savia en el campo. El objetivo principal del análisis rápido de savia en el campo es determinar una deficiencia nutrimental cuyos síntomas visuales no son aún aparentes, pero lo suficientemente intensos para provocar una disminución del crecimiento o rendimiento. Se ha empleado también para controlar prácticas de fertilización y la calidad industrial de ciertos cultivos, además de ser una herramienta útil en la diferencia entre desorden nutrimental y problema patológico.

El análisis rápido de savia se basa en reacciones colorimétricas que se producen cuando un elemento presente en la savia o un compuesto químico que contiene el elemento de interés reacciona con un reactivo específico. El color desarrollado se compara con un patrón de colores preparado y calibrado de antemano. La aceptación de esta técnica fue relativamente lenta, debido principalmente a la falta de comprensión de sus alcances cuantitativos, la falta de precisión provocada por las limitaciones visuales de detectar cambios de color y, por último, por la escasez de estudios que permitiesen relacionar los niveles nutrimentales así determinados con los rendimientos y la fertilidad del suelo.

Syltie *et al.* (1972) presentaron algunos resultados que indican que la técnica del análisis rápido de savia podía emplearse con éxito en ciertos casos y que en otros se requería de mayor estudio.

La correcta interpretación del análisis de planta no depende exclusivamente del análisis químico de su savia sino de muchos factores que influyen en su desarrollo. Entre los aspectos ligados a la nutrición

podemos señalar: absorción y transformación, fenómenos de dilución y concentración, desequilibrios, interacciones, propiedades químicas y físicas del suelo y condiciones ecológicas.

El objetivo fundamental de un diagnóstico es identificar el factor responsable del problema y su causa. Debemos recordar que una vez subsanado este problema, otro factor diferente es posible que se transforme en limitación. Esta afirmación se basa en la ley del mínimo.

Análisis de Suelo

Los análisis de suelo se emplean para estimar la disponibilidad nutrimental de un elemento particular. Los análisis de suelo son índices de disponibilidad y no las verdaderas cantidades disponibles de un elemento (Westerman, 1990). Para la adecuada interpretación de este análisis, es preciso o contar con calibraciones, que se obtienen a través de la ejecución de costosos y complejos experimentos de campo (los cuales han sido escasamente realizados en México) o el uso de otro tipo de información también previamente establecida. La interpretación de los análisis químicos de suelos requiere de un necesario conocimiento de la teoría que los soportan, base del éxito de la misma. Una variante de los análisis químicos de suelo es la medición de las concentraciones nutrimentales en la solución de éste, que está recibiendo una atención preferente en sistemas de producción con fertirrigación. En resumen, se puede decir que los productores y técnicos de agro cuentan con una gran variedad de medios que le permiten reducir el riesgo de que los cultivos no se desempeñen óptimamente por falta de una nutrición adecuada. Este diagnóstico se realiza en varios niveles: el campo, el invernadero y el laboratorio.

Los análisis químicos de suelos que se emplean para el diagnóstico del estado nutrimental de los suelos son de dos tipos.

Los primeros miden una característica que se asocia con la fertilidad de los suelos (pH, CE, materia orgánica, capacidad de intercambio de cationes, porcentaje de saturación de bases, porcentaje de carbonato de calcio, relación de adsorción de sodio, porcentaje de sodio intercambiable, acidez y aluminio intercambiable). La interpretación de estos análisis es directa, esto es, se cuentan con tablas que tienen una validez casi universal.

Los segundos miden lo que puede llamarse un índice de la disponibilidad de un nutrimento en el suelo. Estos índices de disponibilidad pueden ser la fracción soluble, intercambiable, extraíble, fijada o mineralizable. Ejemplos de determinaciones de fracciones son: el N-nítrico, que es esencialmente una fracción soluble, el P soluble o extractable, la concentración de K, Ca, Mg, Na solubles, intercambiables o extractables, la concentración de Fe, Mn, Zn, Cu y Mo extractable, y el B soluble en agua. Cabe aclarar que ninguna de las cantidades medidas por estos métodos es la que realmente la planta puede utilizar, sino que éstas son cantidades que se relacionan de una manera definida con la parte disponible en el suelo, que es a la que la planta puede tener acceso. Para la interpretación de estos resultados es preciso contar con calibraciones que, en estricto rigor, deberían ser hechas para cada cultivo y tipo de suelo. La calibración se realiza estableciendo experimentos en el campo de respuesta a la aplicación de fertilizantes, en la zona y con cultivos de interés, lo cual es oneroso y requiere de tiempo. Como una forma aproximada de resolver la falta de datos de calibraciones, puede recurrirse al empleo de valores que se han generado en otras zonas y aún para otros cultivos (extrapolación), pero la precisión que se alcanza con este procedimiento es mucho más baja que la que se obtiene con el procedimiento anterior. Las extrapolaciones deben hacerse considerando el tipo de cultivo para el cual se generó la información, las características de los suelos experimentales, las condiciones climáticas de la zona, además, de los rendimientos del cultivo para los cuales se generó la información.

Una excepción a la regla anterior está constituida por la fracción soluble, la cual da una idea directa de la concentración de un elemento en la solución del suelo, es decir, del factor intensidad del nutrimento. La fracción soluble es altamente dinámica y no da idea de la capacidad de abastecimiento potencial o factor de capacidad que exhiben los suelos. El que dicha fracción dé una idea de la capacidad actual de suministro de nutrientes, ha hecho este procedimiento popular en sistemas donde la nutrición puede ser fácilmente controlada, como es el caso de la ferti-irrigación y producción en invernaderos, así como en otras circunstancias en que se trabaja en medios de alta concentración nutrimental donde no es importante contabilizar la capacidad de abastecimiento nutrimental que pudiese hacer el suelo al cultivo.

El análisis de los elementos solubles en el suelo se puede realizar directamente en la solución de suelo, en el extracto obtenido a partir de la pasta de saturación ó extracto de saturación o en una solución acuosa equilibrada con el suelo en diversas relaciones suelo:solución. El primer procedimiento se emplea generalmente para hacer análisis a nivel de campo, en tanto que los dos últimos se usan en laboratorio para estudiar muestras de suelos afectados por sales o muestras provenientes de camas de invernadero.

La solución de suelo puede ser extraída directamente, *in situ*, mediante tubos provistos de cápsulas porosas en un extremo, los cuales son enterrados a la profundidad deseada (20, 35, 50 cm), generalmente la zona de máximo crecimiento y/o abastecimiento de agua y nutrimentos. En el caso de la ferti-irrigación la cápsula porosa es colocada en la zona del suelo humedecida por el gotero o microaspersor. La solución que penetra al interior del bulbo poroso, que es hueco, se extrae por succión. En esta solución se pueden analizar las concentraciones nutrimentales en el suelo y, a partir de estos valores, establecer relaciones entre ellos.

En años recientes se han introducido nuevos conceptos para interpretar los índices de disponibilidad, como es considerar un parámetro de eficiencia del cultivo para adquirir los nutrimentos del suelo, el cual permite transformar el índice de disponibilidad medido, en el verdadero aporte que puede hacer el suelo al cultivo, es decir, la cantidad de un elemento que la planta puede absorber por cada unidad del índice químico en el suelo (Rodríguez, 1993).

Una de las ventajas del análisis químico de suelos es que el diagnóstico con esta técnica se puede hacer generalmente con antelación al establecimiento del cultivo. Sin embargo, la interpretación de su resultado precisa, como ya se indicó, de calibraciones o de la aplicación de conceptos modernos en cuanto al significado de los índices. Las calibraciones son costosas, requieren generalmente de varios años de trabajo, e idealmente deben hacerse para cada cultivo con características absortivas distintas (cereales, tubérculos, praderas, etc.). En México, las calibraciones son escasas, pero se ha hecho trabajo de selección de métodos al menos para fósforo (Etchevers *et al.*, 1986). Una desventaja del análisis químico de suelos es la necesidad de contar con una red eficiente de laboratorios químicos confiables, de la cual no siempre se dispone, vías de comunicación

eficientes, y finalmente su costo, que en el país es mucho mayor que en las naciones desarrolladas.

Una alternativa de orden semicuantitativa al análisis de suelo tradicional, es el empleo de los análisis rápidos de campo. Estos pueden funcionar si los extractantes empleados representan una fracción del nutrimento que la planta puede absorber. Desgraciadamente esta información es escasa en el país y el uso de "kits" fabricado para condiciones distintas de las prevalientes tiene que hacerse con la debida consideración de las limitaciones que este hecho implica. Cuando el análisis se practica por esta vía, con sólidas bases teóricas, puede llegar a construir una alternativa eficaz, para decidir si hay o no que aplicar fertilizante. Cuánto aplicar, en materia de experiencia que se gana por otro conducto.

LITERATURA CITADA

- Etchevers, J.D., P. Anzástiga, V. Volke y G. Etchevers. 1986. Correlación y calibración de métodos químicos para la determinación de fósforo disponible en suelos del estado de Puebla. *Agrociencia* 65: 161-178.
- Galvis, S.A., J.D. Etchevers y J. Rodríguez S. 1993. Estimación de los rendimientos máximos alcanzables de maíz en áreas de temporal del estado de Tlaxcala. *Terra* 11: 93-99.
- Hernando, V. y C. Cadahia. 1973. El análisis de savia como índice de fertilización. Consejo Superior de Investigaciones de España, Instituto Edafología y Biología Vegetal, Madrid, España.
- Reuter, D.J. y J.B. Robinson. 1986. *Plant analysis and interpretation manual*. Inkata Press. Sydney, Australia.
- Rodríguez S., J. 1993. La fertilización de los cultivos. Un método racional. Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronomía, Santiago, Chile.
- Syltie, P.W., S.W. Melsted y W.M. Walker. 1972. Rapid tissue test as indicators of yield plant composition and soil fertility for corn and soybeans. *Comm. Soil Science Plant Anal.* 3: 37-49.
- Volke H., V. y J.D. Etchevers. 1994. Recomendaciones de fertilización de cultivos: necesidades y perspectivas de una mayor precisión. Cuaderno de Edafología 21. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Westerman, R.L. (ed.). 1990. *Soil testing and plant analysis*. Third ed. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.