



SECRETARÍA DE
AGRICULTURA, GANADERÍA,
DESARROLLO RURAL, PESCA Y ALIMENTACIÓN

SAGARPA

inifap

Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias

f



La Fertilización

en los cultivos de maíz, sorgo y trigo en México



Estudios de Nutrición Vegetal de los Principales Cultivos Básicos de México

**SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA,
DESARROLLO RURAL, PESCA Y ALIMENTACIÓN**

Sr. Javier Usabiaga Arroyo

Secretario de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación

Ing. Francisco López Tostado

Subsecretario de Agricultura

Ing. Eduardo Benítez Paulín

Director General de Vinculación y Desarrollo Tecnológico

Ing. Joaquín A. Casto Bautista

Director General de Sustentabilidad

**INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES
FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS**

Dr. Pedro Brajcich Gallegos

Director General

Dr. Sebastián Acosta Núñez

Coordinador de Planeación y Desarrollo

Dr. Edgar Rendón Poblete

Coordinador de Investigación, Innovación y Vinculación

Dra. Emilia A. Janetti Díaz

Coordinadora de Administración y Sistemas

CENTRO DE INVESTIGACIÓN REGIONAL DEL CENTRO

Dr. Arturo Tijerina Chávez

Director Regional

Dr. Eduardo Espitia Rangel

Director de Investigación

Dr. Alfredo Tapia Naranjo

Director de Coordinación y Vinculación en el Estado de Guanajuato

CAMPO EXPERIMENTAL BAJÍO

M.C. Simón Alvarado Mendoza

Jefe de Campo

La fertilización en los cultivos de maíz, sorgo y trigo en México

Dr. Javier Z. Castellanos Ramos
Campo Experimental Bajío-INIFAP

Dr. José A. Cueto Wong
CENID RASPA-INIFAP

M. C. Jaime Macías Cervantes
Campo Experimental Valle del Fuerte-INIFAP

Dr. Jaime Roel Salinas García
Campo Experimental Río Bravo-INIFAP

Dr. Luis Mario Tapia Vargas
Campo Experimental Uruapan-INIFAP

M. C. Juan Manuel Cortés Jiménez
Campo Experimental Valle del Yaqui-INIFAP

M. C. Irma Julieta González Acuña
Campo Experimental Santiago Ixcuintla-INIFAP

Dr. Horacio Mata Vázquez
Campo Experimental Sur de Tamaulipas-INIFAP

Dr. Manuel Mora Gutiérrez
Campo Experimental Querétaro-INIFAP

M. C. Andrés Vásquez Hernández
Campo Experimental Cotaxtla-INIFAP

Dr. César Valenzuela Solano
Campo Experimental Ensenada-INIFAP

Dr. Sergio A. Enríquez Reyes
Consultor

ISBN 968-5580-90-1

**INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES
FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS**

CENTRO DE INVESTIGACIÓN REGIONAL DEL CENTRO

CAMPO EXPERIMENTAL BAJÍO

Celaya, Guanajuato, México.

**Folleto técnico Núm. 1
Septiembre de 2005**

PRESENTACIÓN

Este folleto técnico se ha generado en respuesta a la demanda de información de los productores en el tema del manejo de la nutrición de los cultivos de maíz, sorgo y trigo, los cereales que más se siembran en México. La SAGARPA ha respondido a esta demanda apoyando a los productores con inversión en investigación, capacitación y transferencia de tecnología en el tema de nutrición de los cultivos, con el fin de actualizar los conceptos y de fomentar un uso más eficiente y racional de los fertilizantes. El presente folleto técnico fue elaborado por un grupo de investigadores del INIFAP, y pretende ser una herramienta que permita hacer un mejor uso de los fertilizantes y coadyuve a transformar la agricultura en una actividad rentable y competitiva. Con esta herramienta los productores estarán en posibilidades de lograr ahorros y maximizar sus ganancias por el uso eficiente de los fertilizantes, evitando aplicar lo que ya tiene el suelo y suministrando en las cantidades óptimas lo que le falta.

Javier Usabiaga Arroyo
Secretario de la SAGARPA

ÍNDICE

Presentación.....	3
Introducción.....	7
Los fertilizantes y la producción de cereales.....	7
Los precios de los fertilizantes	7
Respuesta de los cultivos a la fertilización.....	9
Nitrógeno.....	10
Diagnóstico de nitrógeno en el suelo.....	11
Definición de la dosis de fertilización de nitrógeno.....	11
Cálculo de la dosis de fertilización con nitrógeno	17
Fuentes de nitrógeno y criterios de uso	18
Fósforo.....	18
Residualidad del fósforo en el suelo.....	19
Métodos para estimar el fósforo disponible en los suelos de México.....	19
Interpretación de los análisis de fósforo en el suelo.....	20
Contenido de fósforo en el suelo	21
Cálculo de la dosis de fertilización con fósforo	21
Época de fertilización	24
Fuentes de fósforo.....	24
Potasio	25
Diagnóstico de potasio en el suelo	26
Dosis y época de aplicación de potasio	28
Fuentes de potasio.....	28
Calcio.....	29
Diagnóstico de calcio en el suelo	29
Fuentes de calcio.....	30
La acidez del suelo y el suministro de calcio	30
Magnesio	32
Diagnóstico de magnesio en el suelo.....	32
Dosis y formas de aplicación de magnesio.....	32
Fuentes de magnesio.....	33
Azufre	33
Micronutrientes	34
Diagnóstico de los micronutrientes en el suelo.....	34
Hierro	35
Zinc	35
Manganeso	36
Cobre.....	37
Boro	37
Molibdeno	38
El diagnóstico foliar en maíz, sorgo y trigo	39
Epílogo	40
Literatura citada.....	41
Agradecimientos.....	43
Apéndice.....	44

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Macronutrientes aplicados por grupos de cultivos en México en 1997	7
Cuadro 2. Extracciones unitarias de N propuestas para calcular la demanda nutrimental de maíz, trigo y sorgo.....	12
Cuadro 3. N disponible a partir de 1 t de abono orgánico en base seca, en función de su concentración de N, para un ciclo de cultivo.....	14
Cuadro 4. Suministro de N al subsiguiente cultivo como resultado de la incorporación de residuos de varios cultivos.....	15
Cuadro 5. Fuentes de nitrógeno mineral, concentraciones y su efecto sobre las condiciones de pH del suelo donde se aplica.....	18
Cuadro 6. Residualidad de fósforo en suelos cultivados después de varios años sin fertilización en diferentes sitios experimentales.....	19
Cuadro 7. Contenido de fósforo en el suelo de acuerdo al método de análisis utilizado y su interpretación.	20
Cuadro 8. Extracciones unitarias de P_2O_5 propuestas para calcular la demanda nutrimental de maíz, trigo y sorgo	23
Cuadro 9. Dosis de fósforo recomendada para maíz de grano con base en el nivel P en el suelo y en función a la meta de rendimiento	23
Cuadro 10. Dosis de fósforo recomendada para sorgo de grano con base en el nivel P en el suelo y en función a la meta de rendimiento	23
Cuadro 11. Dosis de fósforo recomendada para trigo con base en el nivel P en el suelo y en función a la meta de rendimiento	23
Cuadro 12. Fuentes de fósforo y concentraciones de N, P_2O_5 , K_2O y S.....	25
Cuadro 13. Niveles de potasio extraído con acetato de amonio y su interpretación, en suelos de regiones semiáridas y templadas de acuerdo con el grupo textural	26
Cuadro 14. Niveles de potasio extraído con acetato de amonio y su interpretación, en suelos tropicales degradados: Acrisoles, Oxisoles, Cambisoles, Luvisoles y Arenosoles con Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE ¹) menor a 5 cmol _c /kg	26
Cuadro 15. Dosis de potasio sugeridas de acuerdo con el nivel del nutrimento en el suelo, el cultivo y la meta de rendimiento	28
Cuadro 16. Fuentes de potasio y concentraciones de N, P_2O_5 , K_2O , S y Mg	28
Cuadro 17. Niveles de calcio intercambiable en el suelo extraído por el método acetato de amonio y su interpretación, en función de la textura del mismo.....	29
Cuadro 18. Fuentes de calcio y sus concentraciones de Ca, N, P_2O_5 y S	30
Cuadro 19. Requerimientos de cal ($CaCO_3$) en t/ha en suelos cultivados con cereales a partir de un procedimiento empírico que toma en cuenta el pH medido en agua, 1:2, la textura y el contenido de materia orgánica	31
Cuadro 20. Fuentes de magnesio como fertilizantes y sus concentraciones de Mg, N, K_2O y S.....	33
Cuadro 21. Contenido de micronutrientes en el suelo y su clasificación.....	34
Cuadro 22. Respuesta de los cultivos de maíz, sorgo y trigo a la fertilización con micronutrientes.....	34
Cuadro 23. Niveles de referencia nutrimental en la etapa de floración en maíz (en la hoja opuesta al elote) y en sorgo y trigo (en la hoja bandera) para interpretar los análisis foliares	39

Índice de Figuras

Figura 1. Precios de la urea y fosfato diamónico (DAP) en el Golfo y del cloruro de potasio (KCl) en Nuevo México, USA, durante los últimos seis años	8
Figura 2. Proceso de producción de los fertilizantes nitrogenados	8
Figura 3. Rendimiento de maíz a diferentes dosis de N en el Valle del Fuerte, Sin., ciclo 1999 – 2000.....	9
Figura 4. Costos de la fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz a diferentes dosis de N en el Valle del Fuerte, Sin., ciclo 2004 – 2005	9
Figura 5. Utilidad registrada en el cultivo de maíz a diferentes dosis de N en el Valle del Fuerte, Sin., ciclo 2004 – 2005	9
Figura 6. Componentes del ciclo del nitrógeno	10
Figura 7. Curvas de acumulación de N, P_2O_5 , y K_2O por fase fenológica en el cultivo de maíz para un rendimiento de 10 t/ha.....	12
Figura 8. Curvas de acumulación de N, P_2O_5 , y K_2O por fase fenológica en el cultivo de sorgo para un rendimiento de 10 t/ha.....	12
Figura 9. Curvas de acumulación de N, P_2O_5 , y K_2O por fase fenológica en el cultivo de trigo para un rendimiento de 7.5 t/ha.....	13
Figura 10. Frecuencias (%) del contenido de fósforo en suelos analizados en laboratorios del INIFAP por el método Bray 1 para varios estados de la República Mexicana	22
Figura 11. Frecuencias (%) del contenido de K en muestras de suelo analizadas en laboratorios del INIFAP por el método del acetato de amonio para diferentes estados de la República Mexicana.....	27
Figura 12. Variación del rendimiento de maíz con el porcentaje de saturación de aluminio en cinco Ultisoles de Puerto Rico	30

INTRODUCCIÓN

Los fertilizantes son probablemente los insumos de mayor impacto en la producción de alimentos en el mundo. Si éstos se dejaran de usar en la agricultura, seguramente se provocaría la más terrible de las hambrunas. Los altos volúmenes de alimentos que se producen hoy en día en el planeta son totalmente dependientes de los fertilizantes. Por ello, una escasez, e incluso el encarecimiento de éstos, pueden poner en riesgo la seguridad alimentaria de un país. En el presente folleto técnico se analiza la situación de los fertilizantes en el año de 2005 y su papel en la producción de alimentos en México, y tiene por objetivo ser una herramienta útil para los técnicos, de manera que les permita apoyar a los productores para hacer un uso eficiente de estos insumos, que ocupan el primer lugar entre los factores que inciden en el rendimiento de los cultivos y en la seguridad alimentaria del país.

Los fertilizantes y la producción de cereales

En México en 1997 se utilizaron en la agricultura 1.34 millones de toneladas de nitrógeno (N), 0.42 millones de toneladas de fósforo (P_2O_5) y 0.25 millones de toneladas de potasio (K_2O) de diversas fuentes de fertilizantes. Estas cantidades suman 2 millones de toneladas de nutrientes esenciales para las plantas (FAO, 1997), lo que representa una cantidad superior a los 4 millones de toneladas de

fertilizantes. Más de la mitad de los fertilizantes nitrogenados (57%) se utilizan en cereales, a los cuales sólo se les aplica una pequeña cantidad de potasio y el resto (43%) se aplica a frutales, cultivos industriales, hortalizas y leguminosas (Cuadro 1).

Debido a razones comerciales, la industria nacional de los fertilizantes empezó a reducir sus operaciones desde hace casi 10 años. Así, mientras que en 1995 se importaban 9000 toneladas de urea, seis años más tarde, durante 2001, se importaron cerca de 1.5 millones de toneladas (Dr. I. Lazcano, 2005 com. pers.). En la actualidad la planta nacional de fertilizantes funciona a muy baja capacidad y México importa casi el 70% del nitrógeno, el 80% del fósforo y el 100% del potasio (Ing. R. I. Vázquez, 2005, com. pers.). Esta situación hace muy vulnerable a la agricultura nacional, pues depende del exterior para asegurar el suministro del insumo de mayor importancia en la agricultura.

Los precios de los fertilizantes

Durante los últimos años ha ocurrido un aumento sin precedentes en los precios del amoníaco, los cuales están ligados a los precios del gas natural, materia prima fundamental para la elaboración de todos los fertilizantes

Cuadro 1. Macronutrientes aplicados por grupos de cultivos en México en 1997.

<i>Cultivo</i>	<i>N</i>	<i>P₂O₅</i>	<i>K₂O</i>	<i>Total</i>
	miles de toneladas			
Cereales	767	190	47	1004
Frutales	199	65	111	228
Cultivos industriales	160	46	22	375
Hortalizas	136	83	64	283
Leguminosas	79	37	2	118
Total	1341	421	246	2008

nitrogenados. Aunque los incrementos en los precios de los fertilizantes potásicos y fosfatados no han sido paralelos a los de los nitrogenados, también han sufrido aumentos significativos. Tomando como base los precios de los fertilizantes reportados en Estados Unidos (<http://www.greenmarkets.pf.com>), para la urea granulada y el fosfato diamónico (DAP) en el Golfo y el cloruro de potasio (KCl) en Nuevo México, USA, se elaboró el gráfico de la Figura 1. Estos precios son *libre a bordo* (FOB) en estas plazas; faltaría incluir a esos precios el transporte marítimo a puerto mexicano, maniobras, utilidad del importador, arrastre al punto de venta y la utilidad del distribuidor final. Estos costos adicionales pueden ascender a \$ 50 o \$ 75 US Dls. por tonelada de urea, y en los casos extremos pueden llegar a los \$ 100 US Dls. El aumento en los precios de la urea ha sido mucho más elevado en el 2004 y parte del 2005, y tal parece que no se revertirá en el corto plazo. Por esta razón es importante buscar formas de aumentar la eficiencia en el uso de los fertilizantes en general, y en especial de los nitrogenados, para sostener la productividad agrícola y asegurar el abasto nacional de alimentos.

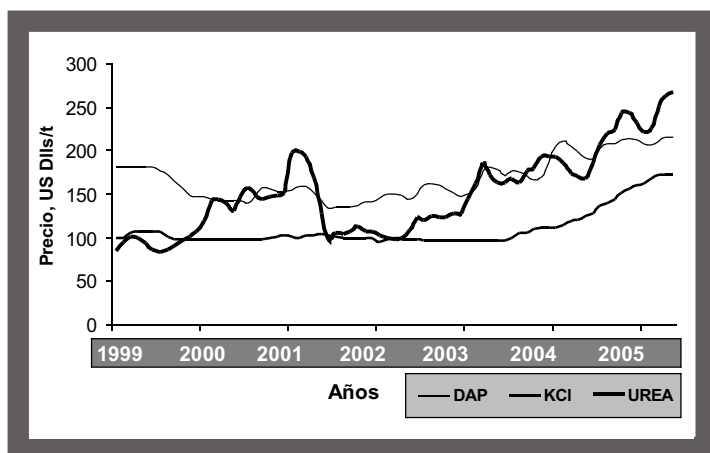


Figura 1. Precios de la urea y fosfato diamónico (DAP) en el Golfo y del cloruro de potasio (KCl) en Nuevo México, USA, durante los últimos seis años. (Fuente: <http://www.greenmarkets.pf.com>).

Debido al aumento en los precios de los fertilizantes, los costos de producción de los cultivos han tenido fuertes incrementos. Por ejemplo, en el 2003 el costo de 1 kg de nitrógeno era de \$ 6.00, mientras que en 2005 se ha incrementado a casi \$ 9.00/kg. Estos costos unitarios fueron calculados en base a la urea, a partir de los precios reportados en el mercado mexicano. Cuando se usa

amoníaco como fuente de nitrógeno, el precio de cada kilogramo de nitrógeno se reduce a \$ 4.50 o \$ 7.00. Por otro lado, el fósforo (P_2O_5) se está vendiendo en el 2005 entre \$ 6.00 y \$ 7.00/kg, dependiendo de la fuente. Estos son los aumentos de precios reales más altos de los fertilizantes, registrados en México, e indican la importancia de hacer un buen uso de estos insumos. En 2005 el costo de los fertilizantes representa hasta el 30% de los costos totales de producción de los cultivos de cereales, cuando tradicionalmente este porcentaje no rebasaba el 20% en el pasado reciente.

En la Figura 2 se presentan los procesos generales para la producción de fertilizantes así como la participación del amoníaco en todos ellos.

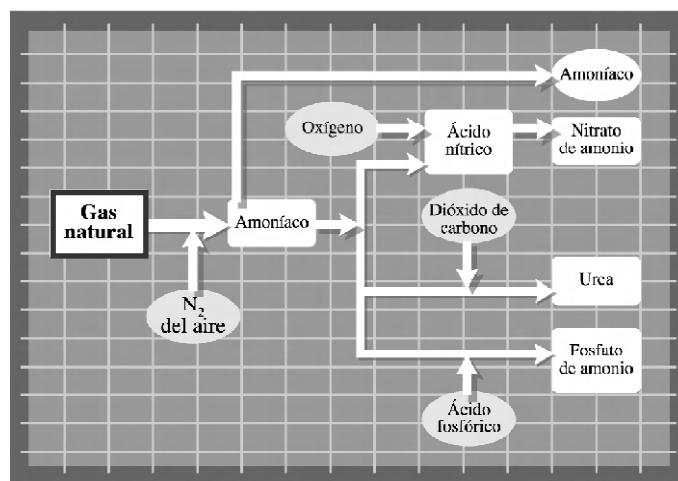


Figura 2. Proceso de producción de los fertilizantes nitrogenados (Mortvedt, *et al.*, 1999).

El incremento en los precios de los fertilizantes ha provocado inquietud en los productores agropecuarios, quienes han visto mermados sus márgenes de utilidad. En otros casos, cuando los productores han optado por reducir la dosis de N como estrategia de ahorro, sin un análisis racional, han provocado una merma en el rendimiento de sus cultivos y como consecuencia de ello en sus utilidades. En tales circunstancias, la definición de la dosis de fertilización adquiere gran relevancia, que es el objetivo fundamental de este folleto técnico, pues si el productor se queda corto en la dosis, podría tener una grave pérdida en sus utilidades y si sobredosifica la fertilización, sus beneficios netos también se verían mermados.

Respuesta de los cultivos a la fertilización

Los cultivos requieren de 16 nutrimentos esenciales (N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Zn, Cu, B, Cl, Mo, C, H y O), trece de ellos disponibles en el suelo y los otros tres (C, H y O) se obtienen del aire y del agua. En este folleto se ofrecen opciones encaminadas a lograr un uso eficiente del N y el P en los principales cereales cultivados en México, y con menor intensidad se aborda el uso del resto de los nutrimentos. Los otros nutrimentos se pueden revisar con mayor detalle en diversas obras de fertilidad de suelos.

En las Figuras 3, 4 y 5 se presentan datos del impacto de la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento y la rentabilidad de esta acción en el proceso de producción de los cereales. Estos datos provienen de una investigación en el cultivo de maíz que se realizó en la región del Valle del Fuerte, Sin. Es evidente que una sub-fertilización ocasiona pérdidas para el productor, pero un exceso de fertilizante, por encima de la dosis óptima económica, reduce las utilidades. La definición de la dosis de fertilización es, por lo tanto, un asunto de gran trascendencia en la agricultura.

A continuación se describen los conceptos más importantes que se deben conocer para definir la dosis de fertilización en maíz, sorgo y trigo para cada uno de los nutrimentos requeridos por las plantas, tales como la demanda de nutrimentos por el cultivo, el suministro que hace el suelo de estos elementos y los factores que participan en su eficiencia de aprovechamiento.

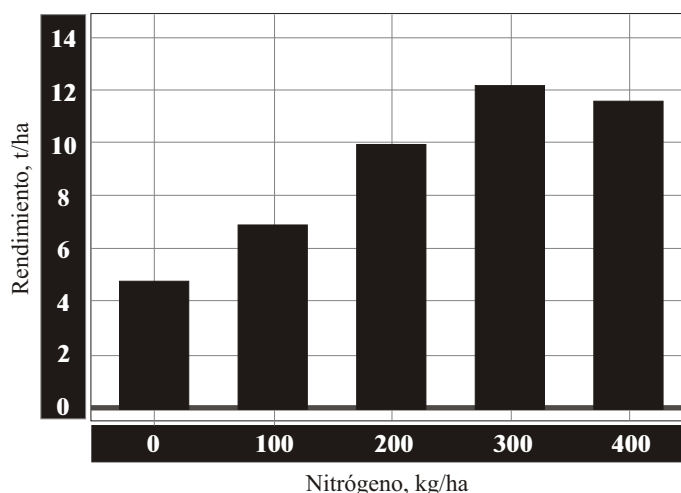


Figura 3. Rendimiento de maíz a diferentes dosis de N en el Valle del Fuerte, Sin., ciclo 1999 – 2000.

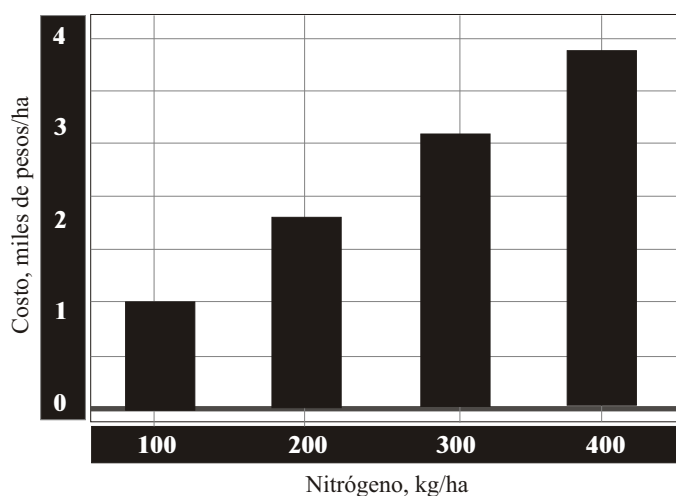


Figura 4. Costos de la fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz a diferentes dosis de N en el Valle del Fuerte, Sin., ciclo 2004 – 2005.

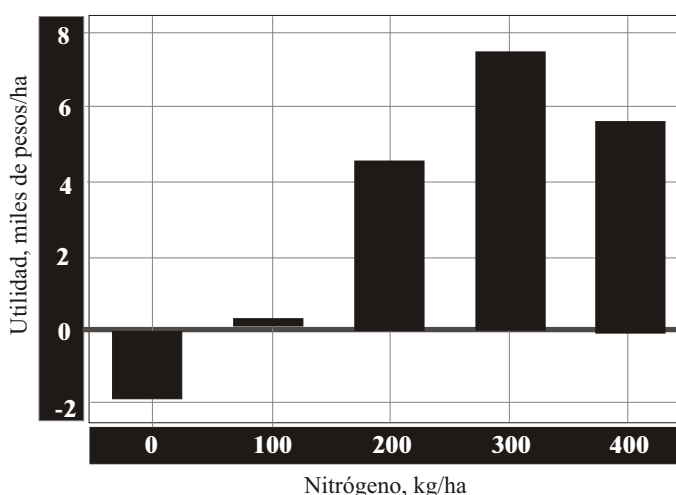


Figura 5. Utilidad registrada en el cultivo de maíz a diferentes dosis de N en el Valle del Fuerte, Sin., ciclo 2004 – 2005.

NITRÓGENO

El nitrógeno mineral, que es el disponible para las plantas, está presente en todos los suelos agrícolas pero en cantidades limitadas, por lo que prácticamente siempre es necesario suministrarlo en diferentes formas. A pesar de que hay una gran reserva de N orgánico en el suelo, aquél no está disponible para las plantas, y es sólo el N inorgánico o mineral el que pueden usar los cultivos, ya sea en la forma de NH_4^+ (amonio) o de NO_3^- (nitrato). Esta última es la forma de N preferida por las plantas. El nitrógeno es un elemento muy dinámico que entra y sale de la zona radicular de varias maneras. Entre las pérdidas de N disponible de la zona radicular destacan la volatilización amoniacal, la desnitrificación, la lixiviación y la inmovilización. Entre las ganancias está la fijación biológica de nitrógeno y la mineralización de N orgánico (Castellanos *et al.*, 2000b). Para una mejor comprensión

del comportamiento de este nutriente en el sistema suelo, en la Figura 6 se presenta el ciclo del nitrógeno con sus principales componentes.

En el ciclo del nitrógeno ocurre la transformación del N a formas minerales o inorgánicas (proceso de mineralización). Este N es tomado por las plantas y es transformado nuevamente en N orgánico el cual regresa al suelo vía residuos de cultivo. En la Figura 6 los compartimentos indican las reservas de N, y las flechas indican los procesos de transformación. El N amoniacal (NH_4^+) en el suelo está sujeto a cinco posibles destinos: 1) inmovilización por los microorganismos del suelo, transformándose así a la forma orgánica; 2) absorción por las plantas; 3) fijación por las arcillas del suelo del tipo 2:1, fenómeno conocido como fijación de amonio; 4) transformación a NH_3 , proceso conocido como volatilización amoniacal; y 5) transformación a NO_3^- , proceso conocido como nitrificación. El N nítrico (NO_3^-) es altamente móvil en el suelo y en el ambiente. El ión

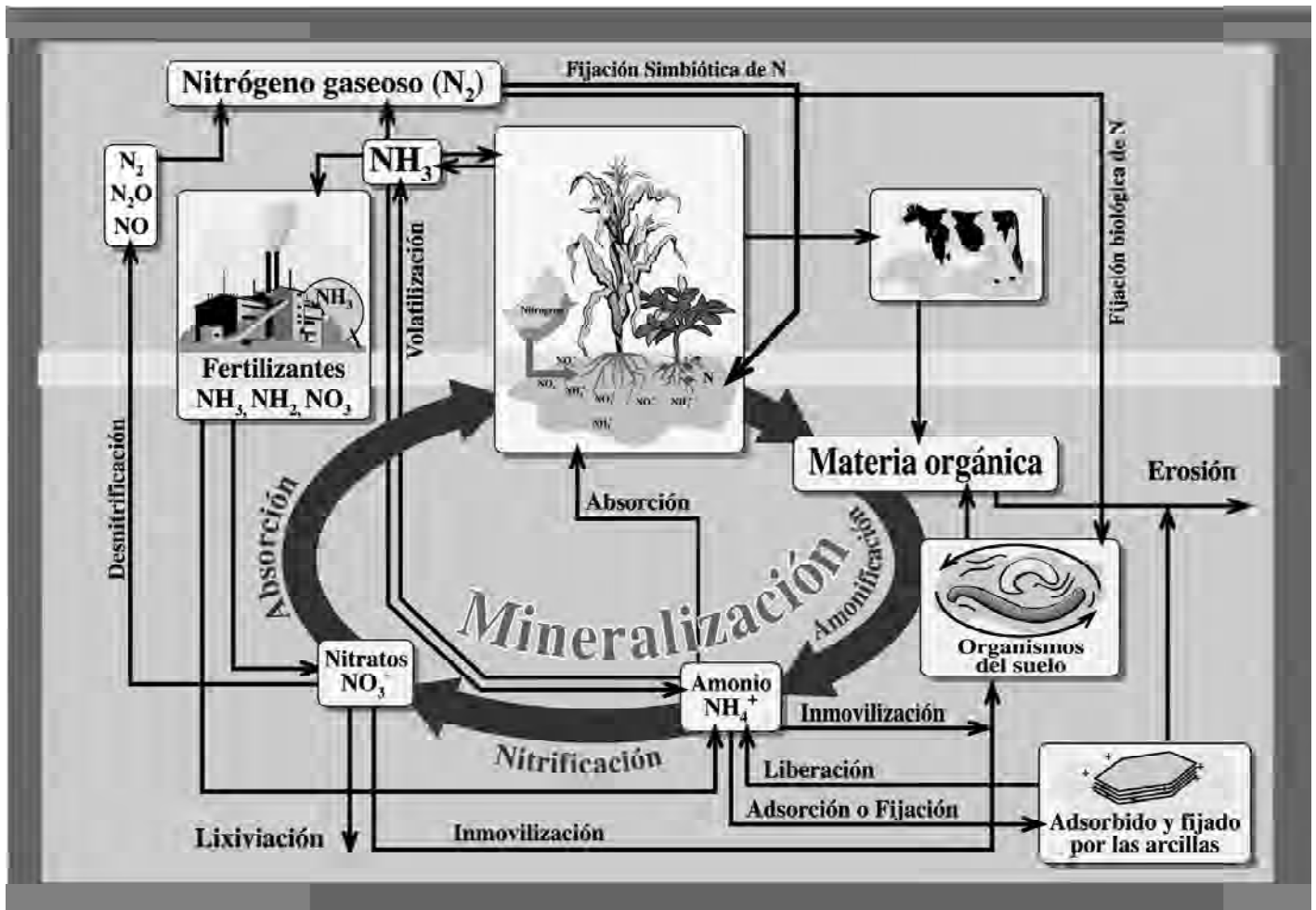


Figura 6. Componentes del ciclo del nitrógeno.

NO₃, ya sea que provenga de los fertilizantes o de la mineralización del N inorgánico, está sujeto a cuatro posibles destinos: 1) inmovilización por los microorganismos del suelo; 2) absorción por las plantas; 3) lixiviación por acción del riego y la lluvia; 4) desnitrificación o volatilización atmosférica al transformarse a las formas de N₂, N₂O y NO. Por último, el N₂ que existe en la atmósfera está sujeto a dos posibles destinos: 1) fijación biológica, que es el proceso mediante el cual los microorganismos simbióticos y asimbióticos lo transforman a N orgánico que puede ser utilizado por las plantas, y 2) fijación industrial para la fabricación de fertilizantes, proceso en el que el N₂ es sometido a altas presiones y temperaturas para ser transformado a NH₃, materia prima de todos los fertilizantes nitrogenados de síntesis (Brady y Weil, 1996).

Diagnóstico de nitrógeno en el suelo

En el diagnóstico de la fertilidad del suelo, la forma de N que se analiza es el nitrato, que es la forma final en que este nutrimento se acumula en el suelo, aunque a veces también se analiza la concentración NH₄ + NO₃. Los nitratos en el suelo, a diferencia de otros nutrimentos, se encuentran disponibles, por lo que su cuantificación total al momento del muestreo es real; sin embargo, una parte se puede perder antes de ser utilizado por el cultivo, ya sea por lixiviación o desnitrificación a través de la dinámica del agua en el suelo. El análisis de N inorgánico, básicamente de N-NO₃ en el estrato de 0-60 cm de suelo, es tal vez la prueba de mayor confiabilidad para definir la disponibilidad de nitrógeno del suelo, la cual ha sido correlacionada positivamente con el rendimiento de varios cultivos. Debido a que en condiciones normales la nitrificación realizada por las bacterias de los géneros *Nitrosomonas* y *Nitrobacter* conduce a la transformación de todo el NH₄⁺ a la forma final de NO₃⁻, la determinación de amonio normalmente no se realiza en las pruebas rutinarias de análisis del suelo con fines de recomendación.

Definición de la dosis de fertilización de nitrógeno

La definición de la dosis de fertilización nitrogenada es un problema complejo que no tiene una solución precisa, ya que depende de la influencia de muchas variables, algunas de las cuales ocurrirán *a posteriori* de tomada la decisión. Para determinar la dosis de fertilización nitrogenada es indispensable conocer los requerimientos nutrimentales del cultivo según la etapa de desarrollo y su potencial

productivo, así como las características de su sistema radical, el contenido de nitratos en el suelo, el contenido de materia orgánica, las condiciones físicas y químicas del suelo, las condiciones climáticas durante el desarrollo del cultivo, la eficiencia en el manejo del agua y el manejo agronómico, que en conjunto tienen una enorme influencia en la eficiencia de uso del nitrógeno, tanto del que está disponible en el suelo como del que se mineraliza durante el desarrollo del cultivo, así como del que proviene de la fertilización.

Así pues, para calcular la dosis de nitrógeno a aplicar en una hectárea de cultivo es necesario conocer la demanda del cultivo y el suministro de N del suelo, y aplicar un factor de eficiencia de uso del nitrógeno, como se indica en la ecuación 1.

$$Dosis\ de\ N = \frac{Demanda - Suministro}{Eficiencia}$$

Ecuación 1

Demanda de nitrógeno por el cultivo.

La extracción total de nitrógeno por el cultivo está en función de la concentración del nutrimento en la materia seca y del rendimiento de grano y de paja del cultivo. El potencial de rendimiento es el producto de la interacción entre la genética de la planta, el ambiente (temperatura, radiación solar y precipitación pluvial o suministro de riego), y el manejo fitosanitario y agronómico en general. Para calcular la dosis de fertilización nitrogenada primeramente es necesario definir la meta de rendimiento que el productor puede alcanzar según el agro-ecosistema en que se encuentra. Para definir la meta de rendimiento se toma en cuenta la experiencia del productor, el historial de rendimiento del cultivo, las condiciones físicas y químicas del suelo (compactación, conductividad hidráulica, presencia de sales o sodio, etc.), el sistema de labranza, y la presencia de factores bióticos (plagas, enfermedades y maleza) o físicos. Estos factores permiten definir una meta de rendimiento y a partir de ella se obtiene la demanda real del nutrimento.

El dato más importante en el cálculo de la demanda de N es la extracción unitaria, es decir, la cantidad de nitrógeno que requiere el cultivo para producir una tonelada de grano. En realidad este valor no es fijo, sino que se trata de un intervalo, que en el caso de maíz puede ir de 20 a 29 kg de N por tonelada de grano producido, en el caso de sorgo de 20 a 28 y en el caso de trigo este valor va de 22 a 32 kg de N por tonelada de grano (Mora, 2001; PPI/PPIC/FAR, 2002). La extracción unitaria del nutrimento está en función del rendimiento; así, Reyes (1997) reporta para trigo

cristalino una extracción unitaria de 18.7 kg de N/t de grano para un rendimiento de 3.8 t/ha, 22.9 para 8.4 t/ha y 26.8 para 9.4 t/ha. Este valor incluye el N que se va al grano y el que se va a la paja, y puede variar con el genotipo, rendimiento, fecha de siembra, suministro de agua, etc. En el Cuadro 2 se presentan los valores típicos para el cálculo de la demanda de N de estos tres cultivos. Conforme se desarrolle más investigación se tendrán valores más confiables sobre la extracción unitaria nutrimental.

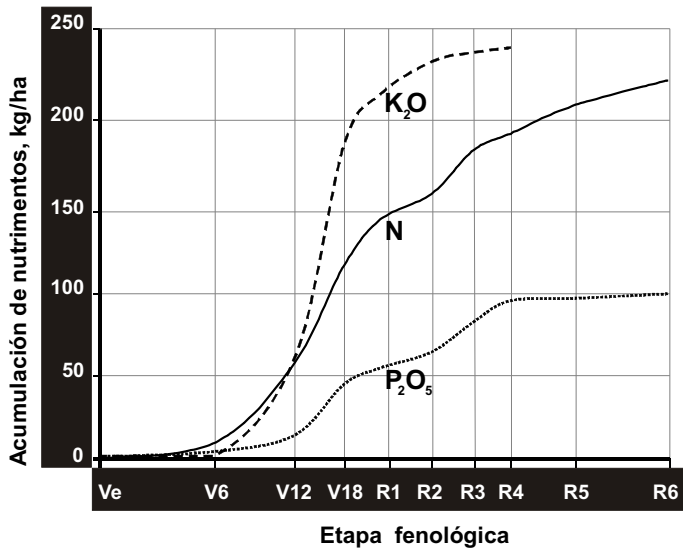
En las Figuras 7, 8 y 9 se presentan las curvas de acumulación de N, P y K de los cultivos de maíz, sorgo y trigo, respectivamente, las cuales indican las épocas de mayor demanda de los nutrimentos de estos cultivos. En

los casos de maíz y sorgo se calcularon para un rendimiento de grano de 10 t/ha, con el fin de facilitar la interpretación y de extrapolar más fácilmente los datos a otros rendimientos. En el caso de trigo se calcularon para un rendimiento de grano de 7.5 t/ha. Es importante destacar que en el caso de fósforo, por sus características de escasa movilidad, la aplicación se debe de realizar antes o durante la siembra, y en el caso de N se realizan dos o tres aplicaciones, tomando en cuenta las etapas de mayor demanda del cultivo. En cuanto al potasio, éste se aplica en función de su disponibilidad en el suelo, pues hay que tener en cuenta que la mayoría de los suelos de México donde se cultivan cereales son capaces de suministrar las demandas de este nutrimento.

Cuadro 2. Extracciones unitarias de N propuestas para calcular la demanda nutrimental de maíz, trigo y sorgo.

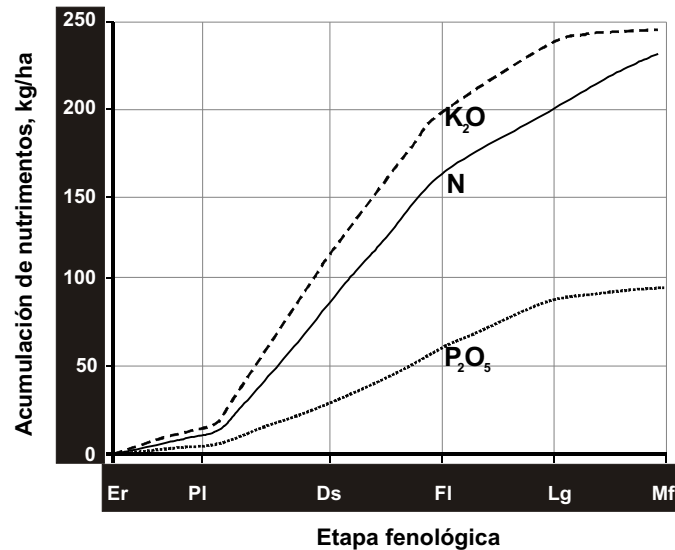
Cultivo	Grano	Paja	Total
	N (kg/t)		
Maíz	15.0	7.5	22.5
Trigo	20.0	6.0	26.0
Sorgo	15.0	8	23.0

Fuentes: Reyes (1997), Castellanos et al. (2000), Mora (2001).



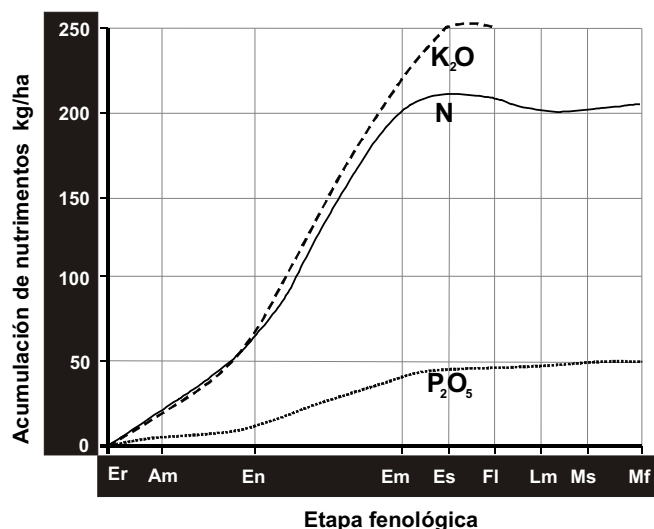
*Ve = Emergencia; V6 = 6ª hoja ligulada; V12 = 12ª hoja ligulada; V18 = 18ª hoja ligulada; R1 = Floración femenina; R2 = Grano perlita; R3 = Grano lechoso; R4 = Grano masoso; R5 = Grano dentado; R6 = Madurez fisiológica.

Figura 7. Curvas de acumulación de N, P₂O₅, y K₂O por fase fenológica en el cultivo de maíz para un rendimiento de 10 t/ha (Adaptado de Herman, 2004).



*Er = Emergencia; Pl = Plántula; Ds = Desarrollo; Fl = Floración; Lg = Llenado de grano; Mf = Madurez fisiológica.

Figura 8. Curvas de acumulación de N, P₂O₅, y K₂O por fase fenológica en el cultivo de sorgo para un rendimiento de 10 t/ha (Adaptado de Stichler et al., 2005).



*Er = Emergencia; Am = Amacollamiento; En = Encañe;
Em = Embuche; Es = Espigamiento; Fl = Floración;
Lm = Lechoso medio; Ms = Masoso suave; Mf = Madurez fisiológica.

Figura 9. Curvas de acumulación de N, P_2O_5 , y K_2O por fase fenológica en el cultivo de trigo para un rendimiento de 7.5 t/ha (Adaptado de Solís y Rodríguez, 2000).

Suministro de nitrógeno del suelo.

El nitrógeno del suelo proviene principalmente de: a) el N mineral en forma de nitratos en el perfil del suelo, b) el N mineralizado de la materia orgánica nativa del suelo, c) el N proveniente de enmiendas orgánicas cuando se aplican al suelo, y d) el N proveniente de los residuos de cultivo, el cual puede ser positivo (N mineralizado), o negativo (N inmovilizado), dependiendo de la relación C/N y del grado de incorporación de los residuos.

N inorgánico en el perfil del suelo. Después de la cosecha en el perfil del suelo queda un remanente de N inorgánico ($N-NO_3$) proveniente del fertilizante o de la mineralización de los residuos del cultivo anterior, el cual estará disponible para el cultivo del siguiente ciclo agrícola. El N inorgánico se determina mediante análisis en el laboratorio y se expresa en ppm o mg/kg, pero si se multiplica por 3.60 se obtiene en kg/ha (se asume una densidad aparente de 1.2 g/cm^3 en promedio para un estrato de 30 cm de profundidad en una hectárea). El N inorgánico es el único nutriente que puede ser expresado en kg/ha, pues su medida es real y no está sujeto a factores de disponibilidad por efecto del procedimiento de extracción, como ocurre con los otros nutrientes. Cuando se detecta un alto contenido de nitratos en la muestra en el estrato de 0 a 30 cm, es conveniente hacer un muestreo hasta una profundidad de 60 cm, para evaluar la cantidad total de N disponible. Es importante recordar que una parte del N inorgánico se

perderá por lixiviación o desnitrificación antes de que la planta lo aproveche. Cuando el N inorgánico en el suelo rebasa la cantidad que se requiere para la primera aplicación, que va de 80 a 100 kg/ha, y teniendo en cuenta la pérdida potencial de N, que podría ser de 30 a 50%, dependiendo del manejo del agua, entonces es factible reducir la primera aplicación de fertilizante nitrogenado. En tal caso se usan dosis bajas de N, entre 15 y 20 kg/ha, consideradas como “arrancador” del cultivo. En ocasiones una cantidad muy elevada de nitratos en el perfil del suelo puede implicar que no se requiera fertilizar con este nutriente en todo el ciclo, cuando se trata de un potencial de rendimiento bajo o medio. Es posible que esta situación se presente en terrenos cultivados con hortalizas en el ciclo anterior, los cuales recibieron grandes cantidades de fertilizantes o estiércoles, o que fueron plantados con leguminosas perennes. Esta posibilidad es realmente reducida, pues el nitrógeno es el nutriente más limitativo en prácticamente todos los suelos (Castellanos *et al.*, 2000b). Es recomendable analizar cada año el contenido de nitratos en el perfil de suelo para ajustar la fertilización con nitrógeno. Este es el único nutriente que por su alta movilidad debe de analizarse con una frecuencia tan corta.

N mineralizado de la materia orgánica nativa del suelo.

En general el suelo tiene una reserva de N orgánico en forma de humus y compuestos muy estabilizados de lenta mineralización. Prácticamente el 98 o 99% de este nitrógeno no está disponible para el cultivo; sólo la cantidad que se mineraliza durante el ciclo del cultivo es la que pasa a formas disponibles. Se puede considerar como un valor razonable el 1% de mineralización del nitrógeno orgánico durante un ciclo de cultivo. Este valor varía con la duración del ciclo del cultivo y con la estación de crecimiento, pues la temperatura del suelo afecta también la tasa de mineralización.

A manera de ejemplo, supongamos que el análisis de suelos indica un contenido de 1% de materia orgánica y una densidad aparente de 1.2 g/cm^3 (1.2 t/m^3). Para este caso asumiremos una tasa de mineralización del N orgánico del 1% para el ciclo de cultivo. Para fines del cálculo se asumirá que la materia orgánica (MO) está constituida en 55% de carbono orgánico (CO) que tiene una relación de masas de C/N de 10/1; es decir, que por cada 10 gramos de carbono orgánico contiene 1 de nitrógeno. Para determinar el contenido de CO en la MO se multiplica el valor de materia orgánica por 0.55. Por lo tanto, la concentración de carbono orgánico en el suelo de este ejemplo es de $1 \times 0.55 = 0.55\%$. El peso del suelo de una hectárea a una profundidad de 0.3 m y una densidad aparente de 1.2 g/cm^3 (1.2 t/m^3) es de 3600 t (3 600 000 kg). De acuerdo con lo anterior, el

contenido de carbono orgánico en una hectárea es = $(0.55 \times 3\,600\,000 \text{ kg}) / 100 = 19,800 \text{ kg de CO/ha}$. Dado que se asumió una relación C/N en peso de 10/1, entonces en dicha masa de suelo hay 1980 kg de N orgánico. Si se mineraliza el 1% en un ciclo de cultivo, entonces existirá una cantidad aproximada de 20 kg de N disponible para el cultivo mediante este proceso de mineralización. Debe entenderse que ésta es sólo una estimación del N mineralizado, ya que el porcentaje real de mineralización lo determinan otros factores entre los que están la humedad del suelo, la temperatura, la textura, el tipo de materia orgánica, el pH y la duración del ciclo de cultivo.

Uso de enmiendas orgánicas. Las enmiendas orgánicas, como estiércoles o compostas, suministran una cantidad considerable de N al suelo, pues su nivel de mineralización es notablemente mayor que el del N orgánico nativo del suelo. Las tasas de mineralización durante un ciclo de cultivo de estas enmiendas varían desde 10 hasta 50%, dependiendo de su contenido de N. Los valores más bajos son para estiércoles muy viejos o compostas de muy baja concentración de N (< 1%) y los más altos son para estiércoles de gallina cuyos contenidos de N son mayores a 4% (Castellanos *et al.*, 2000b). Para calcular el suministro de N disponible de los abonos orgánicos se multiplica la dosis de aplicación de materia seca del abono por la concentración de N que éste contiene, y luego por el porcentaje de mineralización estimado para el ciclo, el cual varía de 10 a 60% (Castellanos y Pratt, 1981). En el Cuadro 3 se muestran las cantidades de N que se pueden mineralizar o pasar a formas disponibles para el cultivo, a partir de una tonelada de abono orgánico en base seca en función de su concentración de N.

N en el agua de riego. Algunas aguas de riego en México contienen cantidades apreciables de nitratos (Castellanos y Peña Cabriales, 1990). En tales casos es necesario considerar este aporte, que sólo se puede detectar mediante análisis químico. No obstante, en la gran mayoría de las regiones de México el contenido de nitratos en el agua de riego es inapreciable.

Efecto del cultivo del ciclo anterior. Los residuos de gramíneas como sorgo, maíz, trigo y arroz tienen altos contenidos de carbono y bajas concentraciones de nitrógeno, por lo que presentan muy alta relación C/N. Al momento de descomponerse, estos materiales toman nitrógeno del suelo en lugar de suministrarlo, por lo que crean una deficiencia temporal de este elemento, aunque

Cuadro 3. N disponible a partir de 1 t de abono orgánico en base seca, en función de su concentración de N, para un ciclo de cultivo.

N en abono orgánico(%)	N (kg /t)
0.50	0.7
0.75	1.3
1.00	2.1
1.25	2.9
1.50	3.9
2.00	6.5
2.50	9.9
3.00	14.6
4.00	32.5

Datos adaptados de USEPA, (1979).

después lo liberan parcialmente. En suelos donde se incorporaron residuos del cultivo anterior con alta relación C/N justo antes de la siembra, es recomendable aumentar la dosis de fertilizante nitrogenado al inicio del ciclo para acelerar la descomposición del residuo y minimizar la inmovilización del N. Se recomienda aplicar de 5 a 7 kg de N adicionales a la dosis de fertilización por cada tonelada de paja incorporada de cultivos de cereales. Por el contrario, en suelos donde se incorporaron residuos de cultivo con baja relación C/N (como el de las leguminosas u hortalizas) es factible reducir la dosis de fertilización nitrogenada debido al aporte adicional de N proveniente de la leguminosa. Cuando se retira o quema la paja de las gramíneas, en la práctica el suministro es cero. Cuando se usa labranza cero, es decir, cuando el residuo no se incorpora al suelo sino que se deja en la superficie, la inmovilización es menor, pero aun así, es recomendable incrementar ligeramente la dosis de nitrógeno, pues hay una inmovilización parcial de N. Por otro lado, cuando la incorporación del residuo de cultivo se realiza varios meses antes de la siembra y existen condiciones de humedad en el suelo que favorezcan la descomposición de dicho rastrojo o paja, como ocurre en el estado de Sinaloa y otras regiones de México, no es necesario adicionar N para promover su descomposición. Tampoco considerar este componente en la ecuación de cálculo, pues el N inmovilizado es liberado posteriormente. Los aportes de N según el cultivo previo y el manejo del residuo se muestran en el Cuadro 4, según Castellanos *et al.* (2000b).

Cuadro 4. Suministro de N al subsiguiente cultivo como resultado de la incorporación de residuos de varios cultivos.

Cultivo anterior	Rendimiento, t/ha	Aporte de N al cultivo por efecto de los residuos del ciclo anterior* kg/ha
Maíz	5	-35#
Maíz	10	-50#
Maíz	15	-75#
Sorgo	5	-35#
Sorgo	10	-50#
Sorgo	15	-75#
Trigo	3-5	-40#
Trigo	5-7	-55#
Trigo	>7	-70#
Arroz	3-5	-30#
Algodón	2-5	0
Soya	1-3	+15
Frijol	1-3	+25
Chile	15-30	+25
Papa	25-50	+30
Brócoli	12	+60
Coliflor	12	+70
Haba	3	+80
Jícama	80	+100
Alfalfa	2-3 años	+120

*Este dato toma en cuenta solamente el efecto inmediato del residuo en el siguiente cultivo.

#En estos cultivos, en caso de incorporar el residuo con varios meses de anticipación y si es sometido a la descomposición natural en presencia de humedad, o si éste se retira del terreno o se quema, el valor es cero. Por el contrario, cuando el residuo se incorpora ocurre una inmovilización de N (valor negativo) equivalente a la cantidad indicada en el cuadro y este N es tomado del suelo vía inmovilización, por lo que conviene regresárselo al suelo vía fertilización.

La eficiencia de uso del nitrógeno.

El siguiente factor de mayor importancia para calcular la dosis de nitrógeno a aplicar es la eficiencia de uso del nitrógeno. Este factor determina finalmente en qué proporción se debe incrementar la dosis calculada de N a partir de los datos de demanda bruta y del suministro del suelo (N mineral del suelo, N potencialmente mineralizable

de la materia orgánica, efecto del cultivo anterior y del manejo de su residuo). La eficiencia de uso del fertilizante nitrogenado varía en forma general desde 40 hasta 80%; debido a ello, la dosis de fertilización requerida puede variar enormemente. Al analizar los extremos, al reducirse la eficiencia de un 80% hasta un 40%, la dosis requerida de N se incrementa en 100%. Esta variación en la eficiencia es producto de los siguientes factores: las propiedades físicas del suelo (textura o problemas de compactación), la nivelación del terreno, la incorporación y características de los residuos de cultivo, el sistema de aplicación del agua, el manejo del agua de riego, la época de aplicación y fuente de nitrógeno, la magnitud de la precipitación, la profundidad del sistema radical del cultivo y el manejo en general, incluido el fitosanitario. Sin embargo, en la mayoría de los casos este intervalo varía entre 50 y 70%. En general se puede considerar el uso de un valor de eficiencia del 60%, para un sistema de riego por gravedad, en un terreno razonablemente nivelado y cuyo fertilizante nitrogenado se aplicó en dos eventos. A continuación se mencionan las características del suelo y manejo agronómico que favorecen las pérdidas de N.

Las propiedades físicas del suelo. En los suelos de textura arenosa ocurren fuertes pérdidas por lixiviación debido a que en ellos la velocidad de infiltración suele ser muy alta y, por ende, el arrastre de nitratos. Por el contrario, los suelos compactos resultado del exceso de labranza o por exceso de sodio, provocan condiciones anaeróbicas (falta de oxígeno), lo cual repercute en pérdidas gaseosas de nitrógeno por desnitrificación. Este problema se agudiza en suelos con alto contenido de arcilla, que contenga cantidades importantes de carbono orgánico disponible. En suelos arenosos es difícil conseguir una eficiencia mayor al 50% y en suelos arcillosos es difícil conseguir eficiencias mayores al 60%.

Incorporación de residuos de cultivo con alta relación C/N. La incorporación de residuos carbonáceos con alta relación C/N combinada con fuentes nítricas, como el fosfonitrato (31-4-0) al inicio de la estación de crecimiento en suelos arcillosos irrigados, tiende a provocar pérdidas importantes de N por desnitrificación, lo cual es más crítico si la dosis de fertilización es alta; en condiciones extremas estas pérdidas pueden llegar hasta un 30% del N aplicado. Por otro lado, el carbono orgánico proveniente de los residuos de cosecha en descomposición tiende a inmovilizar cantidades importantes de nitrógeno del suelo. Para estas condiciones es recomendable utilizar fuentes amoniacales, como amoníaco, sulfato de amonio o urea,

durante la primera aplicación de N al momento de la siembra con el propósito de minimizar la desnitrificación y el arrastre de N por lixiviación.

El sistema de aplicación del agua. El manejo del agua de riego y la lluvia son los factores de mayor incidencia en la eficiencia de uso del fertilizante nitrogenado. La forma final de N en el suelo es nitrato, el cual es un anión que en forma general no es retenido por las arcillas del suelo. En estas condiciones se mueve fácilmente con el agua. Por tal razón, la eficiencia del riego va a afectar directamente la eficiencia de uso del fertilizante nitrogenado. Las láminas excesivas de drenaje o altas precipitaciones propician pérdidas importantes de N por lixiviación, particularmente si ocurren cuando se aplican dosis altas de N en las etapas iniciales de desarrollo del cultivo. Esta situación es más grave en suelos arenosos.

En sistemas de riego por goteo se puede lograr una eficiencia de aplicación del N superior al 70%; en riego por aspersión, con un buen diseño y manejo del agua, este valor baja a 60 o 70%, y en riego por gravedad la eficiencia en el uso de N va del 40 al 65%, dependiendo de la nivelación del terreno, de la tecnificación del riego y de los cuidados en el manejo del agua (Castellanos *et al.*, 2000b). La nivelación del terreno es vital para conseguir una alta eficiencia en el uso del nitrógeno. Recordemos que la eficiencia de uso del agua va de la mano con la eficiencia de uso de nitrógeno, pues el agua que se aleja del alcance de la raíz, va enriquecida con fertilizante nitrogenado.

Efecto de la época de aplicación y fuente de N. Este es el segundo factor de mayor incidencia en la eficiencia de utilización de nitrógeno, por lo que se deberá poner especial énfasis en dividir la aplicación de N en tantas veces como el sistema de producción del cultivo lo permita. Esto se debe a que una alta dosis de nitrógeno a la siembra, cuando aún no emerge el cultivo para que lo absorba, puede repercutir en grandes tasas de lixiviación fuera del alcance de la raíz. La mayor parte de la dosis de N debe corresponder con el período previo a la tasa máxima de absorción de N por el cultivo. Por otro lado, se sugiere aplicar una fuente amoniacal a la siembra, como sulfato de amonio o urea, para evitar la lixiviación durante el primer riego, denominado de “aniego” o de establecimiento. En cereales se recomienda aplicar no más de 25 a 30% del N a la siembra. La mayor parte se debe aplicar antes de que inicie el crecimiento activo del cultivo. En épocas tardías se recomienda usar fuentes nítricas, como

el fosfonitrato, pues el nitrato de amonio es muy difícil de conseguir en el mercado. Cuando se hace una aplicación de N es difícil lograr eficiencias mayores al 50%, cuando la dosis se divide en dos aplicaciones este rango puede variar del 50 al 60% y cuando la dosis de N se divide en tres aplicaciones, la eficiencia puede llegar a 65%, si los demás factores de la producción se manejan correctamente y no hay limitantes mayores de compactación del suelo o un excesivo contenido de arena.

Forma de aplicación del fertilizante. Las aplicaciones en banda son siempre más eficientes que las aplicaciones al voleo, a menos que la dosis sea muy elevada y con un fertilizante de alto índice salino como es el sulfato de amonio, en cuyo caso se recomienda aplicarlo al voleo e incorporarlo con rastra o con la fertilizadora. El índice salino es un indicador de la concentración de sal por cada unidad de nitrógeno aplicado. La aplicación a la siembra debe hacerse en banda, cercana a la línea de siembra. Se recomienda no colocar el fertilizante en la línea de plantación para evitar posibles daños a la plántula o a la semilla durante la germinación a causa de sales o por el efecto competitivo con el calcio. En el caso del sulfato de amonio es recomendable distribuirlo fuera del alcance de la semilla, pues es el que tiene mayor índice salino.

Profundidad del sistema radical. La profundidad y densidad del sistema radical juegan un papel muy importante en la eficiencia de uso del nitrógeno. Estas características están asociadas a la especie vegetal, pero también al manejo que se haga de éstas. Así, por ejemplo, se han aislado rizobacterias promotoras del crecimiento de las plantas, como es el caso de *Bacillus subtilis*, la cual ha mostrado cierta capacidad para promover el desarrollo del sistema radical de varios cultivos. Un cultivo con un profuso sistema radical es más eficiente en el uso de nitrógeno y de los otros nutrimentos, por lo que conviene considerar la utilización de estos inoculantes para promover el crecimiento de la raíz. En tal caso se recomienda aplicar unos 20 g de inoculante comercial a base de *Bacillus subtilis* a la semilla de maíz o sorgo para sembrar una hectárea, y unos 30 o 40 g de inoculante a la semilla de trigo para sembrar una hectárea. La inoculación se realiza mediante la suspensión en agua del inoculante usando un adherente como azúcar, que también favorecerá la rápida reproducción de la bacteria en lo que se asocia con la raíz del cultivo. En caso de presentación líquida del inoculante, se recomienda seguir las instrucciones de uso contenidas en la etiqueta.

Cálculo de la dosis de fertilización con nitrógeno

Para calcular la dosis de fertilización se recomienda usar la ecuación 2.

$$DN = [(MR \times Ne) / Ef] - (Nm + Ni + Nr + No)$$

Ecuación 2

Donde:

DN = Cantidad o dosis de nitrógeno total que es necesario aplicar, kg/ha.

MR = Meta de rendimiento, t/ha.

Ne = Cantidad de nitrógeno total extraído por unidad del rendimiento kg/t (Cuadro 2).

Ef = Factor de eficiencia de aprovechamiento del nitrógeno, (varía de 0.40 a 0.80).

Nm = Nitrógeno mineralizado de la materia orgánica, kg/ha (Calculado a partir del contenido de materia orgánica nativa del suelo, ver ejemplo en página 13).

Ni = Nitrógeno inorgánico en el perfil del suelo, kg/ha (Calculado mediante análisis de N-NO₃).

Nr = Efecto del cultivo anterior [Nitrógeno mineralizado (+) o inmovilizado (-) de los residuos del cultivo anterior], kg/ha (Cuadro 4).

No = Nitrógeno mineralizado de enmiendas orgánicas, kg/ha (Cuadro 3).

Ejemplo del cálculo de la dosis de N requerida

Datos:

- Suelo arcilloso
- Materia orgánica: 2%
- N mineral en el estrato de 0 a 30 cm: 5 ppm N-NO₃
- Cultivo anterior: maíz, 10 t/ha, y quema de residuos
- Uso de abonos orgánicos: sin aplicación
- Cultivo a establecer: trigo
- Meta de rendimiento: 6 t/ha
- Manejo del agua: riego en surcos en un terreno nivelado y por lo tanto se considera un eficiente manejo del agua.

Parámetros de la ecuación:

- Meta de rendimiento del cultivo de trigo = 6 t/ha
- Extracción unitaria de N del cultivo de trigo = 26 kg N/t de grano (Cuadro 2)

- Suministro de N de la materia orgánica nativa del suelo (Nm) = 3 600 000 kg/ha x 0.02 x 0.55 x 0.1 x 0.01 = 40 kg de N mineralizado por ha (masa de suelo en 1 ha en el estrato de 0-30 cm), por el porcentaje de materia orgánica del suelo expresada en fracción, por el porcentaje de carbono de la materia orgánica expresado en fracción, por el porcentaje de N en relación al carbono orgánico expresado en fracción, por el porcentaje de mineralización del N de la materia orgánica nativa del suelo durante el ciclo de cultivo expresado en fracción. (Ver ejemplo de cálculo en página 13).
- Suministro de nitrógeno inorgánico del suelo (Ni) = 5 x 3.6 = 18 kg N/ha (producto de multiplicar la concentración de N-NO₃ del suelo, que en este caso es 5 ppm o mg/kg, por el factor 3.6, para transformar mg/kg a kg/ha (Explicación en página 13)).
- Efecto del residuo del cultivo anterior (Nr), igual a cero debido a que el residuo del cultivo es quemado (Explicación en página 14).
- El término No es igual a cero debido a que no se aplicó abono orgánico.
- Factor de eficiencia de uso del N, seleccionado en base al criterio del técnico. Por tratarse de un terreno nivelado, con el sistema de riego por gravedad y considerando que realiza un eficiente manejo del agua, se le asignó un valor de 0.6 (Ver explicaciones en páginas 15 y 16)

Ecuación:

$$DN = [(MR \times Ne) / Ef] - (Nm + Ni + Nr + No)$$

Sustitución:

$$DN = [(6.0 \times 26) / 0.6] - (40 + 18 + 0 + 0) = 202 \text{ kg de N/ha}$$

Si el la eficiencia de uso del N fuera del 70%, la dosis recomendada para el cultivo de trigo sería de 165 kg N/ha y si fuera del 50%, dicha dosis sería de 254 kg N/ha. En la práctica es difícil lograr una eficiencia con un factor mayor a 0.7, a excepción de aquellos productores que cuentan con sistemas de riego por goteo o de aspersión con muy alta eficiencia en el uso del agua. Por otro lado, si se hubiera incorporado la paja en lugar de quemarla, el parámetro de Nr, en la ecuación tomaría el valor de -50 kg/ha (Ver cuadro 4, en el cultivo de maíz con rendimiento de 10 ton/ha y el residuo incorporado) y entonces la ecuación tomaría la siguiente forma:

$$DN = [(6.0 \times 26) / 0.6] - (40 + 18 - 50 + 0) = 252 \text{ kg N/ha}$$

Fuentes de nitrógeno y criterios de uso

Las fuentes de nitrógeno mineral y su equivalencia de acidez en relación con el CaCO_3 se presentan en el Cuadro 5. Es importante recalcar que las fuentes se deben seleccionar en función del pH del suelo. En suelos alcalinos es recomendable utilizar fertilizantes de reacción ácida, como el sulfato de amonio, con los cuales se contribuye a reducir los problemas de disponibilidad de Fe y Zn, e

incluso de fósforo, al menos en la banda de aplicación del fertilizante. El uso de polifosfato de amonio ha mostrado buenos resultados como fuente de N y P en suelos calcáreos. Se estima que cuando se usan fuentes amoniacales, el ion amonio tarda de dos a tres semanas en transformarse totalmente a nitrato, por lo que dicha forma es sólo transitoria en el suelo y en el proceso de transformación de NH_4 a NO_3 se acidifica parcialmente el medio. Es por ello que todas las fuentes amoniacales presentan una reacción ácida en el suelo.

Cuadro 5. Fuentes de nitrógeno mineral, concentraciones y su efecto sobre las condiciones de pH del suelo donde se aplica.

Fuente	Fórmula	Concentración %	Acidez equivalente ** kg de CaCO_3 /kg N
Acido Nítrico (100%)	HNO_3	22	*
Sulfato de Amonio	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	21	5.2
Amoníaco Anhidro	NH_3	82	1.8
Nitrato de Amonio	NH_4NO_3	34	1.8
Nitrato de Magnesio	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_6\text{H}_2\text{O}$	11	0.5-0.8 (B [£])
Urea	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	46	1.8
Nitrato de Calcio	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2\text{H}_2\text{O}$	15	0.5-1.0 (B)
Nitrato de Sodio	NaNO_3	16	1.8 (B)
Nitrato de Potasio	KNO_3	13	2.0 (B)
Fosfato Monoamónico (MAP)	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	11	5.0
Fosfato de Amonio	$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	18	3.1
Polifosfato de Amonio	$(\text{NH}_4)_3\text{HP}_2\text{O}_7 + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	10-20	-

*No se usa como fuente de N sino como acidulante para eliminar carbonatos y bicarbonatos en el agua de riego en sistemas de fertirrigación.

** Se refiere a la capacidad del fertilizante de acidificar el suelo por cada kg de N que se aplica.

£ Se refiere a la capacidad del fertilizante de alcalinizar el suelo por cada unidad de N que se aplica.

FÓSFORO

El fósforo es el nutrimento relacionado con los flujos de energía en la planta, y a diferencia del nitrógeno, en general tiene muy poca movilidad en el suelo. Su disponibilidad puede reducirse cuando existen problemas de fijación química, especialmente en suelos muy ácidos, volcánicos o altamente calcáreos. La condición de baja movilidad del nutrimento hace que el suelo actúe como una “alcancía” donde el elemento se puede conservar por años o bien puede ser aprovechado por los cultivos que se establezcan durante un lapso de varios años. La reserva de fósforo en el suelo está conformada por un componente orgánico, el cual transitará por un proceso de mineralización antes de

pasar a formas solubles, y un componente que se encuentra fijado químicamente o adsorbido por los minerales existentes y los coloides, el cual está en continuo equilibrio con el fósforo de la solución del suelo que puede ser aprovechado por los cultivos. Conforme el P soluble del suelo se agota, una parte del P adsorbido o fijado químicamente se transforma en P soluble y pasa a formar parte de la reserva disponible para el cultivo. Por otro lado, conforme aumenta el P soluble mediante la fertilización, una fracción de éste pasa a formar parte de la reserva de P fijado y adsorbido, y allí es conservado hasta que bajan las reservas de P asimilable. Este proceso se da en continuo y es afectado por la humedad y temperatura del suelo, pero sobre todo por las características físicas y químicas del mismo.

Residualidad del fósforo en el suelo

Estudios de largo plazo realizados para estimar el tiempo que permanece en el suelo el fósforo disponible, indican que cuando éste se encuentra en concentraciones muy por encima del nivel de 10 ppm, determinado por el método Olsen, el suelo puede suministrar fósforo al cultivo por un

periodo largo, sin tener que suministrarlo mediante fertilizantes. La magnitud del suministro depende de la tasa de extracción por el cultivo y de la disponibilidad inicial del P en el suelo. Sharpley (2000) reportó que en terrenos cultivados con cereales, la disminución media del contenido de P-Olsen asociada al consumo por el cultivo, resultó ser de 3.1 ppm por año (Cuadro 6).

Cuadro 6. Residualidad de fósforo en suelos cultivados después de varios años sin fertilización en diferentes sitios experimentales.

Cultivo	Periodo (Años)	Concentración P-Olsen (ppm)		Reducción anual (ppm/año)
		Inicial	Final	
Trigo/descanso	14	40	25	1.1
Trigo/descanso	8	45	18	3.4
Trigo/Cebada	16	26	8	1.1
Trigo/Mijo	8	48	9	4.9
Trigo/Mijo	8	67	18	6.1
Trigo/Mijo	16	45	14	1.9
Promedio	12	45	15	3.1

Fuente: Sharpley, 2000.

Métodos para estimar el fósforo disponible en los suelos de México

Existen muchos métodos para diagnosticar el nivel de P disponible en el suelo. Para ello se han publicado un sinnúmero de procedimientos, los cuales deben primero ser correlacionados con la respuesta del cultivo en invernadero y posteriormente calibrados en campo. Mediante la calibración en campo se determina el nivel crítico, es decir el contenido de P en el suelo, por encima del cual la probabilidad de respuesta del cultivo a la adición de fertilizante fosfatado es mínima (Kuo, 1996).

Método Bray 1.

Este método fue diseñado para suelos ácidos a neutros. Se ha utilizado con eficiencia en la región central de México y en suelos del noroeste de la República Mexicana, con bajos contenidos de carbonatos de calcio. En suelos con alto contenido de carbonato de calcio no ha funcionado bien, debido a que el HCl del extractante es neutralizado por los carbonatos del suelo y produce valores muy bajos de P extraído, en cuyo caso es mejor utilizar el método de Olsen. No se recomienda usar el método Bray 1 en suelos donde se ha aplicado roca fosfórica, pues tiende a

sobrestimar los valores de P. Varios investigadores citados por Castellanos *et al.* (2000b) han reportado valores críticos de 21 a 30 ppm; valores mayores que 25 ppm se consideran altos, y en general suelos con esta concentración de P tienen muy baja probabilidad de respuesta a la adición de fósforo.

Método Olsen.

Este método es muy efectivo en suelos calcáreos; su uso está restringido a suelos neutros, aunque ha mostrado efectividad en estos y en algunos suelos ácidos, más no en todos. Valores mayores a 10 ppm se consideran altos, con muy baja probabilidad de respuesta a aplicaciones de P. En terrenos de temporal, de bajo potencial de rendimiento, el nivel crítico que se ha reportado es de 5 ppm. En el Norte de México en terrenos calcáreos de riego, se ha sugerido un valor de 15 ppm como un nivel de seguridad por encima del cual no se encuentra respuesta a la aplicación de fósforo, aún en terrenos con alto potencial de rendimiento. El método Olsen es ampliamente usado en los suelos irrigados del noreste de México y en otras regiones del país.

Otros métodos analíticos.

Recientemente algunos laboratorios han promovido el uso de procedimientos analíticos que no han sido correlacionados ni calibrados en México y no cuentan con la

recomendación de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo para ser usados en México con el fin de diagnosticar la fertilidad del suelo. Estos métodos no están incluidos en la NOM-021-SEMARNAT-2000. Entre estos métodos destacan los multielementales, en los cuales con una sola extracción se determinan todos los nutrimentos. Por esta razón son métodos económicos y rápidos, pero en general se consideran ineficientes para hacer el diagnóstico de la disponibilidad de los nutrimentos del suelo y para estimar la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), un parámetro útil que indica la capacidad del suelo para retener o intercambiar las bases de cambio que son: K, Ca, Mg y Na. Los métodos oficiales aprobados por la NOM-021-SEMARNAT-2000 y recomendados por la SMCS requieren hasta cinco extracciones diferentes para realizar el diagnóstico de la fertilidad del suelo, lo cual los hace más costosos, pero indudablemente más eficientes. **Por las razones expuestas se recomienda evitar laboratorios que usen métodos no aprobados por la NOM-021-SEMARNAT-2000. (Ver lista de métodos oficiales en el apéndice).**

Interpretación de los análisis de fósforo en el suelo

En el Cuadro 7 se presentan los valores de referencia de P en el suelo y su interpretación de acuerdo a los métodos Olsen y Bray 1.

A partir de los valores contenidos en el Cuadro 7 se propone la siguiente interpretación:

Muy bajo o deficiente.

De acuerdo con literatura reportada sobre la calibración del método, con este contenido del nutrimento en el suelo es de esperar respuesta a la adición del fertilizante, pues es posiblemente el principal factor limitativo del rendimiento. Por ello se recomienda una dosis de fertilización superior a la convencional.

Bajo.

En suelos con un contenido bajo de P es de esperar una alta probabilidad de respuesta a la adición del fertilizante, particularmente en cultivos de alta demanda del nutrimento. En este caso se recomienda aplicar cantidades ligeramente superiores a la dosis general de recomendación o demanda del cultivo.

Moderadamente bajo.

El contenido de P en el suelo es ligeramente inferior al nivel de suficiencia. Es probable que algunos cultivos puedan satisfacer sus requerimientos de P con este contenido del nutrimento en el suelo. Sin embargo, otros cultivos de alta demanda, o sensibles a la deficiencia del nutrimento, o de sistema radical limitado, requieren de la adición de fertilizantes para satisfacer su demanda. En este caso se sugiere aplicar la dosis general de recomendación para el cultivo, con el objeto de mantener la fertilidad del suelo.

Medio o suficiente.

El nutrimento se encuentra en niveles de suficiencia para la mayoría de los cultivos; es de esperar que sólo los cultivos de alta demanda o de sistema radical muy limitado respondan a la adición del nutrimento, o bien, cuando las metas de rendimiento son muy elevadas. Sin embargo, el recomendar la adición del nutrimento a través de la fertilización tiene el propósito de mantener la reserva de P del suelo. Por otro lado, las aplicaciones de fertilizante a dosis bajas y en banda (sólidos o líquidos), junto a la línea de siembra, funcionan como fertilización de arranque, y se realizan con el propósito de tener plantas vigorosas desde las etapas iniciales del cultivo. En términos generales, la decisión de fertilizar un suelo con un nivel de suficiencia de P depende de la disponibilidad de capital del productor, o bien, de si el productor es el propietario del terreno o si lo está rentando, y por lo tanto si la fertilización residual podrá ser aprovechada por sus cultivos de los ciclos posteriores.

Cuadro 7. Contenido de fósforo en el suelo de acuerdo al método de análisis utilizado, y su interpretación.

<i>Método de análisis</i>	<i>Contenido de fósforo, ppm</i>						
	<i>Muy bajo</i>	<i>Bajo</i>	<i>Mod. bajo</i>	<i>Medio</i>	<i>Mod. alto</i>	<i>Alto</i>	<i>Muy alto</i>
Bray-1	0-4	5-10	11-20	21-30	31-40	41-60	> 61
Olsen	0-4	5-9	10-12	13-18	19-25	26-35	> 36

Moderadamente alto.

El nutrimento se encuentra en niveles de suficiencia para prácticamente todos los cultivos, y es de esperar escasa o nula respuesta a la aplicación del nutrimento, salvo en situaciones excepcionales, cuando la disponibilidad es afectada por características de física de suelos, como pudieran ser problemas severos de compactación. En algunos casos se recomienda una dosis baja, de mantenimiento, con el propósito de conservar la reserva del nutrimento en el suelo, aunque esto dependerá de los recursos de capital del productor y de si renta el terreno o usa su propia finca para producir. Lo más indicado sería no fertilizar con fósforo este terreno.

Alto.

Cuando el nutrimento se encuentra muy por encima del nivel crítico, no se recomienda la adición de fertilizante. En un suelo con niveles altos de P el nutrimento está disponible por varios años sin mostrar deficiencias. Prácticamente no hay posibilidades de respuesta de los cultivos a la aplicación del nutrimento.

Muy alto o excesivo.

Definitivamente no hay respuesta a la aplicación del nutrimento por lo que no se recomienda la adición del fertilizante, pues puede incluso generar un desbalance con otros nutrimentos con los que mantiene relaciones antagónicas. Un ejemplo de ello ocurre cuando se aplica fósforo a un suelo muy rico en este nutrimento y el suelo presenta niveles marginales de Zn. Lo mismo pasa cuando se aplica una alta dosis de K a un suelo muy rico en este nutrimento, pero con niveles marginales de Mg.

Contenido de fósforo en el suelo

En varias regiones de México se tenía la costumbre de sobrefertilizar con fósforo, lo que propició un incremento en las cantidades de fósforo disponibles en los suelos. Por ejemplo, en el 35% de los suelos agrícolas de riego del estado de Guanajuato se reportan valores por encima de 30 ppm (Figura 10), por lo que en estos suelos prácticamente no hay respuesta a la aplicación de este elemento. Varios estudios conducidos en el estado de Guanajuato en los cultivos de papa, brócoli, chile ancho y ajo, indican que no hay respuesta a fósforo cuando los niveles de P-Bray rebasan las 30 ppm (Datos sin publicar del primer autor de esta publicación). En realidad el nivel crítico de fósforo que indica el método Bray 1 está entre 21 y 30 ppm (Cuadro 7), pero se suele usar el valor de 30 ppm, como margen de seguridad.

Basado en el archivo de los análisis de suelos en el estado de Querétaro, se estima que solamente en uno de cada dos terrenos habría respuesta a la aplicación de fósforo, a juzgar por los datos de la Figura 10. Por el contrario, las muestras provenientes del sur de Tamaulipas muestran niveles bajos de fósforo. El resto de los estados muestra en general un nivel intermedio de fósforo disponible en el suelo y un rango amplio de concentraciones.

Es importante resaltar que la única manera de saber con certeza si un suelo requiere fósforo o no es mediante un análisis de suelo usando métodos confiables calibrados en México, autorizados por la NOM y recomendados por la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Hay que recordar que la fertilización con fósforo en suelos con alto contenido de este elemento y con niveles marginales de Zn o de Fe puede ocasionar problemas nutrimentales en el cultivo por el efecto antagónico que se produce entre el fósforo y estos micronutrimentos, tanto al nivel del suelo como de la planta. El dicho popular en el campo *“es mejor que le sobre y no que le falte”* no siempre funciona en nutrición vegetal.

Cálculo de la dosis de fertilización con fósforo

Se estima que para obtener un rendimiento de 10 t/ha de grano de maíz, el cultivo requiere alrededor de 95 kg de P_2O_5 , de los cuales 25 kg regresan al suelo en el rastrojo, es decir, 70 kg salen del terreno. En sitios donde se han aplicado dosis de fósforo superiores a esta cantidad, el resultado neto es el incremento del P disponible en el suelo; por el contrario, en suelos donde se ha aplicado una cantidad menor y los rendimientos son superiores a las 10 t/ha, se ha reducido la disponibilidad de este elemento. El criterio básico para calcular la dosis de fósforo es conocer el nivel de P en el suelo y definir la meta de rendimiento. Con el dato de rendimiento y la extracción unitaria de P_2O_5 se estima la cantidad total que va a requerir el cultivo. En el Cuadro 8 se indican las extracciones unitarias de P_2O_5 de los cultivos de maíz, trigo y sorgo. Es importante recalcar que aunque la mayor parte del fósforo que requiere el cultivo lo moviliza al grano, una parte se queda en el rastrojo y finalmente regresará al suelo en el reciclaje de nutrimentos.

En los Cuadros 9, 10 y 11 se presenta la dosis de fósforo recomendada para maíz de grano, sorgo y trigo con base en el nivel de P en el suelo y la meta de rendimiento.

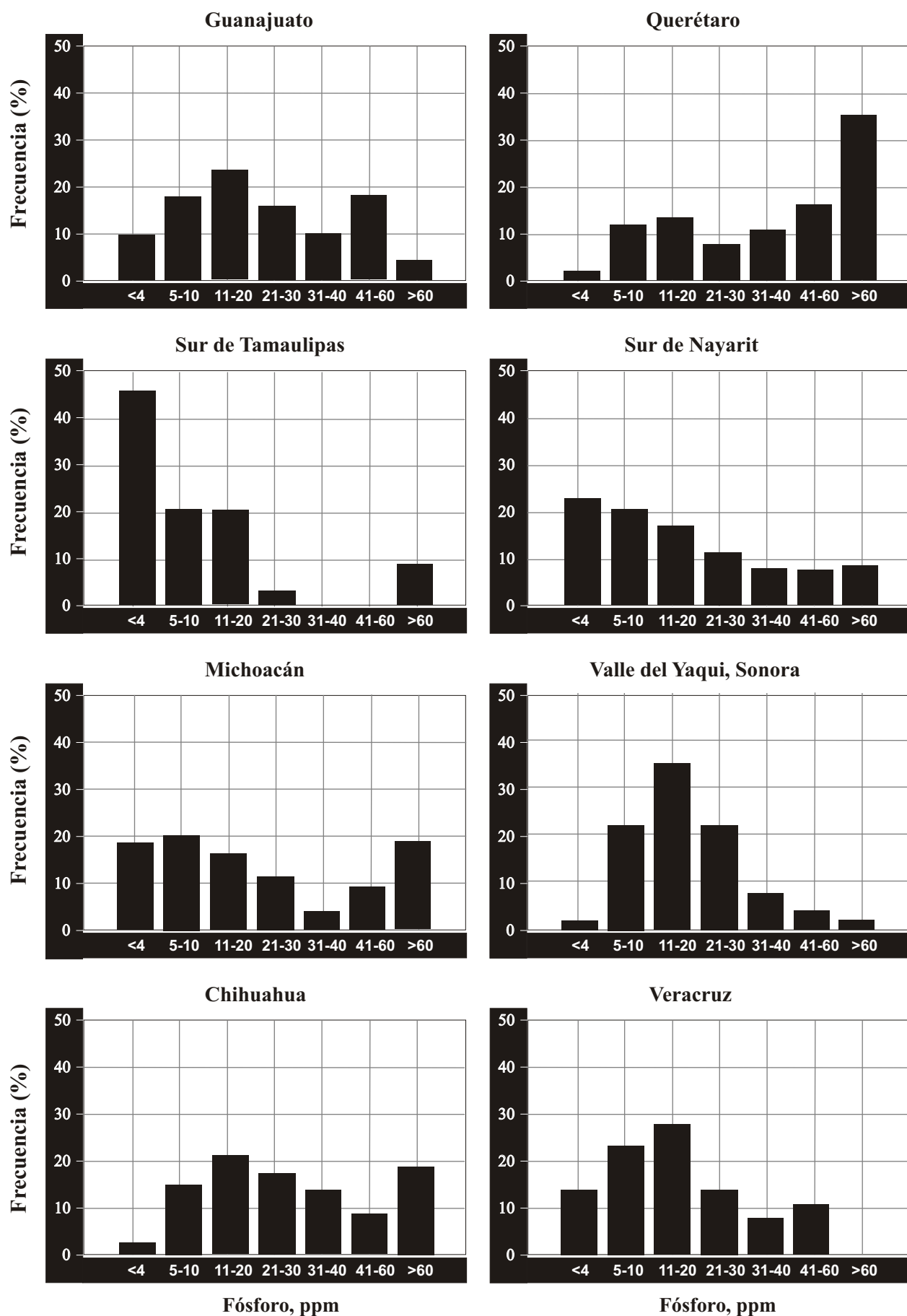


Figura 10. Frecuencias (%) del contenido de fósforo en suelos analizados en laboratorios del INIFAP por el método Bray 1 para varios estados de la República Mexicana.

Cuadro 8. Extracciones unitarias de P_2O_5 propuestas para calcular la demanda nutricional de maíz, trigo y sorgo.

<i>Cultivo</i>	<i>Grano</i>	<i>Paja</i> P_2O_5 (kg/t)	<i>Total</i>
Maíz	7.0	2.5	9.5
Trigo	6.5	1.5	8.0
Sorgo	7.0	3.0	10.0

Fuente: PPI/PPIC/FAR (2002).

Cuadro 9. Dosis de fósforo recomendada para maíz de grano con base en el nivel P en el suelo y en función a la meta de rendimiento.

Meta de rendimiento t/ha	Dosis de P_2O_5 (kg/ha)						
	<i>Muy bajo</i>	<i>Bajo</i>	<i>Mod. bajo</i>	<i>Medio</i>	<i>Mod. alto</i>	<i>Alto</i>	<i>Muy alto</i>
> 12	135	120	90	75	40	0	0
10 - 12	100	90	80	70	35	0	0
8 - 10	80	75	70	65	30	0	0
6 - 8	65	60	55	50	20	0	0
4 - 6	55	50	45	40	0	0	0
2 - 4	35	30	25	20	0	0	0
< 2	30	25	0	0	0	0	0

Cuadro 10. Dosis de fósforo recomendada para sorgo de grano con base en el nivel P en el suelo y en función a la meta de rendimiento.

Meta de rendimiento t/ha	Dosis de P_2O_5 (kg/ha)						
	<i>Muy bajo</i>	<i>Bajo</i>	<i>Mod. bajo</i>	<i>Medio</i>	<i>Mod. alto</i>	<i>Alto</i>	<i>Muy alto</i>
> 12	135	120	90	75	40	0	0
10 - 12	110	90	80	70	35	0	0
8 - 10	90	75	70	65	30	0	0
6 - 8	70	60	55	50	20	0	0
4 - 6	60	55	50	45	15	0	0
2 - 4	35	30	25	25	0	0	0
< 2	30	25	0	0	0	0	0

Cuadro 11. Dosis de fósforo recomendada para trigo con base en el nivel P en el suelo y en función a la meta de rendimiento.

Meta de rendimiento t/ha	Dosis de P_2O_5 (kg/ha)						
	<i>Muy bajo</i>	<i>Bajo</i>	<i>Mod. bajo</i>	<i>Medio</i>	<i>Mod. alto</i>	<i>Alto</i>	<i>Muy alto</i>
> 8	120	110	90	75	50	0	0
6 - 8	100	80	70	60	40	0	0
4 - 6	80	70	60	50	30	0	0
2 - 4	50	45	40	35	0	0	0
< 2	30	25	0	0	0	0	0

En los Cuadros 9, 10 y 11 se presentan varias metas de rendimiento para los cultivos de maíz, sorgo y trigo con diferentes niveles de extracción, por lo que la dosis por aplicar estará directamente relacionada con el rendimiento e inversamente relacionada con el nivel de P en el suelo. En el caso del fósforo, al igual que en el del N, a mayor rendimiento mayor extracción del nutrimento, y a menor contenido del nutrimento en el suelo, mayor será la dosis por aplicar. Es importante destacar que las dosis bajas recomendadas para adecuados niveles de P sirven para mantener la fertilidad del suelo sin que ésta se desplome rápidamente al dejar de fertilizar con este elemento. Por otro lado, las dosis bajas al momento de la siembra sirven como “*arrancadores*” del cultivo, es decir, se suministra el nutrimento para lograr un rápido desarrollo de la planta en etapas tempranas, pues finalmente al contar con un denso sistema radical absorben más fácilmente el P del suelo.

En terrenos con niveles marginales de P, es decir, ligeramente por debajo del nivel crítico, que hayan recibido cantidades de fertilizantes fosfatados por debajo de lo que el cultivo extrae, el rendimiento tenderá a disminuir a través de los años. Para evitar situaciones como ésta se recomienda hacer análisis de suelo al menos cada dos años para ajustar la dosis de fertilización de P.

Finalmente en la decisión de la cantidad de fósforo a aplicar también es importante considerar el destino final del residuo el cual contiene una cantidad importante de fósforo que regresará al suelo una vez que éste se incorpore, y esta cantidad de nutrimento estará prácticamente disponible para el cultivo en un periodo corto, conforme se mineralice la materia orgánica de dicho residuo. Si el residuo se retira del terreno se pierde la oportunidad de incorporar materia orgánica y los nutrimentos que ésta contiene, como N, P, K, Mg, Ca, además de perder la oportunidad de mejorar las propiedades físicas del suelo en beneficio del crecimiento radicular del cultivo.

A continuación se describe un caso hipotético con el que se pretende mostrar al lector la alta rentabilidad de un análisis de suelo. Imaginemos un terreno de 50 ha con un contenido de 40 ppm de P Bray-1. Este terreno podría cultivarse durante dos a cuatro años al menos, sin necesidad de fertilizar con fósforo. Si el agricultor no realizara un análisis de suelo perdería la oportunidad de ahorrarse cada año la cantidad de \$ 20,000 pesos al evitar el costo del fertilizante fosfatado que podría ser del orden de \$ 400 pesos por ha. El ahorro de esta suma es posible con solo invertir \$ 700 pesos en el análisis de dos muestras compuestas de suelo de las 50 ha del predio.

Por otro lado, el análisis de suelo tiene mucho que ver con decisiones de fertilizar o no terrenos en arrendamiento. Un contrato en arrendamiento puede darse por uno a cinco

años. Así por ejemplo, un terreno arrendado que tenga 40 ppm de P, puede producir sin ser fertilizado con P durante dos a cuatro años y ése es un valor agregado del análisis, pues le da mayor o menor valor al terreno. Con los resultados del análisis se tienen mejores elementos de negociación. Si el propietario es quien dispone de los resultados, éstos le permiten incrementar el precio de renta del terreno, y si los resultados los tiene el arrendador, éste tendría más elementos para definir por cuanto tiempo le interesa rentar el terreno y definir con mejor precisión su oferta de renta del mismo. En el caso de un terreno en arrendamiento, con un contenido de P ligeramente por encima del nivel crítico, en una renta de corto plazo, una buena decisión para el productor sería no fertilizarlo con P y ahorrarse el costo por concepto de ese insumo.

Época de fertilización

Por las características de escasa movilidad del fósforo en el suelo, la aplicación del fertilizante fosfatado se debe realizar antes o durante la siembra, pues aunque se usa a lo largo del ciclo (ver Figuras 7, 8 y 9), aquél debe de estar al alcance del sistema radical del cultivo para su absorción continua. Cuando se tiene un suelo extremadamente pobre en fósforo es recomendable complementar la fertilización con un “*arrancador*”; es decir, un fertilizante líquido, como polifosfato de amonio, en dosis que van de 15 a 30 kg/ha de P_2O_5 , que se aplica al momento de sembrar, muy cerca a la línea de siembra para que la planta tenga acceso al nutrimento desde etapas muy tempranas. Normalmente se aplica a 5 cm al lado de la semilla y a 5 cm por debajo de ésta, con un equipo especial de fertilización.

Fuentes de fósforo

En el Cuadro 12 se presentan las diversas fuentes de fósforo y su contenido de nutrimentos. En general las fuentes como el superfosfato de calcio triple y simple se recomiendan para suelos ácidos a neutros, y los fosfatos de amonio para suelos neutros o alcalinos, sin diferencias en cuanto a efectividad de las fuentes para suministrar fósforo al suelo. Los factores que determinan el uso de una u otra fuente son de tipo económico. En suelos altamente calcáreos, donde existen problemas de fijación de este nutrimento, el polifosfato de amonio ha mostrado muy buena efectividad e incluso se puede combinar con una dosis de 1 a 2 kg/ha de nitrato o sulfato de Zinc. En ese caso el polifosfato actúa como agente quelatante del Zn y permite una mayor penetración de nutrimentos en el perfil de suelo, donde están más accesibles para las raíces del cultivo. Esta es la única fuente de P en la que el fósforo y el Zn se suministran en forma combinada.

Cuadro 12. Fuentes de fósforo y concentraciones de N, P₂O₅, K₂O y S.

Fuente	Fórmula	Concentración nutrimental, %			
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S
Superfosfato de Calcio Triple	Ca(H ₂ PO ₄) ₂	0	46	0	1.0-1.5
Superfosfato de Calcio Simple	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ +CaSO ₄ ·2H ₂ O	0	20	0	11-12
Fosfato Monopotásico (MKP)	KH ₂ PO ₄	0	52	34	0
Fosfato Dipotásico (DKP)	K ₂ HPO ₄	0	41	54	0
Fosfato Monoamónico (MAP)	NH ₄ H ₂ PO ₄	11	52	0	0-2
Fosfato Diamónico (DAP)	(NH ₄) ₂ HPO ₄	18	46	0	0-2
Polifosfato de Potasio	K ₃ HP ₂ O ₇ +KH ₂ PO ₄	0	51	40	0
Polifosfato de Amonio	(NH ₄) ₃ HP ₂ O ₇ +NH ₄ H ₂ PO ₄	10-20	32-62	0	0
Roca Fosfórica*	Ca ₁₀ (PO ₄) ₆ F ₂	0	26-40	0	0
Acido Fosfórico&	H ₃ PO ₄	0	52	0	0

*Materia prima de los fertilizantes de baja solubilidad y disponibilidad; su uso está restringido a los suelos tropicales o suelos ácidos.

&Sólo se usa en sistemas de fertirrigación para eliminar los bicarbonatos y suministrar P.

En el caso de las fuentes orgánicas de P, como los estiércoles, para calcular el aporte de fósforo para el cultivo sólo hay que tener en cuenta la concentración de P₂O₅ en base seca del abono. La dosis de P₂O₅ se estima

multiplicando la cantidad de abono orgánico por la concentración de este elemento. A diferencia del nitrógeno, el P de los abonos orgánicos es tan disponible como el de los fertilizantes químicos (Castellanos, 1986).

POTASIO

El potasio es uno de los elementos esenciales de las plantas. Participa en las siguientes actividades dentro de la planta: a) la activación de varias enzimas, b) las relaciones hídricas, c) la transpiración, d) las relaciones energéticas, e) la translocación de asimilados, f) la absorción de nitrógeno y la síntesis de proteínas y g) los sistemas de defensa de las plantas.

El potasio del suelo puede estar en forma sólida, fijado, intercambiable o soluble. Estas formas del potasio están siempre interrelacionadas y guardan un equilibrio constante entre ellas. Los minerales arcillosos, fuente principal de potasio en la solución del suelo, liberan la mayor parte del K cuando baja su concentración; por ello, el potasio soluble es un mejor indicador de la disponibilidad inmediata de este elemento para las raíces. En algunas arcillas se presenta el fenómeno de fijación de potasio, por lo que no está fácilmente disponible para los cultivos. El potasio es absorbido por el cultivo por difusión y flujo de masas,

principalmente. Existen varios factores de suelo y clima que afectan la disponibilidad de potasio en el suelo entre los que están textura, contenido de potasio, humedad, aireación, temperatura, compactación y la relación con otros cationes (Uvalle, 1996).

El fenómeno de fijación de potasio fue reconocido desde hace más de 100 años, tal como lo documentan Kunze y Jeffries (1953). La fijación de potasio ocurre en las arcillas del tipo 2:1 y no se presenta en las arcillas del tipo 1:1, como las caolinitas. El ion potasio tiene las dimensiones de radio iónico similares al ion NH₄ y también está sujeto al fenómeno de fijación por las arcillas mencionadas. Los minerales que mayormente fijan el potasio son las illitas, vermiculitas, cloritas y, en menor grado, las smectitas. En los suelos de México el problema de fijación de potasio, al igual que en el caso del fósforo, no es una situación generalizada, por lo que decidir aplicar potasio en suelos ricos en este elemento sólo porque se presume que el potasio está fijado por las arcillas, sin evidencia analítica, ciertamente es un error que afecta la economía del productor.

Diagnóstico de potasio en el suelo

El método universalmente aceptado para diagnosticar la disponibilidad de potasio es el del acetato de amonio 1N a pH 7 u 8.5, que es el método para el que se han realizado más calibraciones. El potasio que se mide con este procedimiento es el K soluble, la mayor parte del intercambiable y muy pequeñas cantidades del K fijado y del de la fase sólida. Por tal razón, esta cantidad es sólo un índice de la disponibilidad del elemento y se expresa en ppm, mg/kg de suelo, cmol_c/kg, o meq/100g. Las dos primeras unidades tienen las mismas dimensiones, y de igual manera la tercera y la cuarta presentan las mismas dimensiones, aunque difieren de las dos primeras unidades. Un cmol_c/kg equivale a 391 ppm de K. A diferencia de la determinación de nitratos, ésta es una determinación de nutrimento extractable, y la cantidad extraída varía con el procedimiento, por lo que se recomienda reportarlo en cmol_c/kg o en mg/kg cuando se trata del K intercambiable, y en mg/kg cuando se trata de cualquier otro procedimiento. La concentración de K intercambiable varía desde casi cero hasta 2000 mg/kg. Las más bajas concentraciones de este elemento se encuentran generalmente en los suelos tropicales degradados (Acrisoles, Oxisoles, Cambisoles, Luvisoles y Arenosoles), en donde concentraciones de 20 a 120 ppm son relativamente comunes (L. Pastrana, 2002, com. pers.).

Los niveles críticos en suelos de textura ligera reportados en la literatura van de 80 a 120 ppm (0.20 a 0.30 cmol_c/kg), mientras que en suelos de textura fina van de 150 a 250 ppm (0.5 a 0.7 cmol_c/kg). En trabajos realizados en Estados Unidos, McLean y Watson (1985) sugieren que el nivel de suficiencia de potasio en el suelo es igual a $[110 + (2.5 \times \text{CIC})]$, donde CIC = Capacidad de Intercambio Catiónico. Este valor es bajo en comparación con los niveles comúnmente encontrados en suelos de zonas áridas y semiáridas de México, pero en zonas tropicales los valores suelen ser menores. Núñez y Gavi (1991) recopilaron información de 779 experimentos de campo e invernadero en México en los cultivos de maíz, sorgo, papa y algodón; reportaron que en el 89% de ellos no se encontró respuesta a la aplicación de potasio, en el 8% hubo incrementos en el rendimiento con la aplicación de potasio, y en cerca del 3% hubo efectos negativos a la aplicación de este nutrimento. En general en la mayoría de los suelos de México donde se cultivan cereales, con excepción de algunos suelos tropicales, las probabilidades de respuesta a aplicaciones de potasio son en realidad bajas.

En el Cuadro 13 se presentan los niveles de K determinados por el método del acetato de amonio en función de su contenido de potasio y tomando en cuenta el grupo textural (Castellanos *et al.*, 2000b). Por otro lado, considerando que los niveles de K en los suelos tropicales degradados son mucho más bajos, se ha propuesto una clasificación para su interpretación, la cual se presenta en el Cuadro 14 (L. Pastrana, 2002, com. pers.).

Cuadro 13. Niveles de potasio extraído con acetato de amonio y su interpretación, en suelos de regiones semiáridas y templadas de acuerdo con el grupo textural.

Grupo textural	Contenido de potasio en suelo, ppm						
	M. B.*	B.	Mod. B.	M.	Mod. A	A.	M. A.
Fina	< 125	125-175	175-250	250-450	450-800	800-1200	> 1200
Media	< 80	80-150	150-200	200-400	400-600	600-1000	> 1000
Gruesa	< 50	50-100	101-150	151-250	251-400	401-600	> 600

*M. B. = Muy Bajo; B= Bajo; Mod. B.= Moderadamente bajo; M= Medio; Mod. A.= Moderadamente alto; A= Alto; M. A.= Muy alto.

Cuadro 14. Niveles de potasio extraído con acetato de amonio y su interpretación, en suelos tropicales degradados (Acrisoles, Oxisoles, Cambisoles, Luvisoles y Arenosoles) con Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE¹) menor a 5 cmol_c/kg.

Contenido de potasio en suelo, ppm						
M. B.*	B.	Mod. B.	M.	Mod. A.	A.	M. A.
< 20	20-50	50-100	100-150	150-200	200-300	> 300

*M. B. = Muy Bajo; B= Bajo; Mod. B.= Moderadamente bajo; M= Medio; Mod. A.= Moderadamente alto; A= Alto; M. A.= Muy alto.

¹ Se refiere a la suma de todos los cationes intercambiables, incluidos el aluminio y el hidrógeno.

Análisis de K en muestras de suelos de varias regiones.
 El contenido de K en muestras de suelo de varios estados de México se presenta en la Figura 11. Se aprecia que los niveles de K tienden a ser altos en suelos de zonas semiáridas y templadas, mientras que en suelos tropicales

suelen encontrarse bajos niveles de K. Esta situación no está generalizada en todas las regiones tropicales, por lo que se debe realizar un análisis de suelo para hacer el diagnóstico correcto del contenido de K.

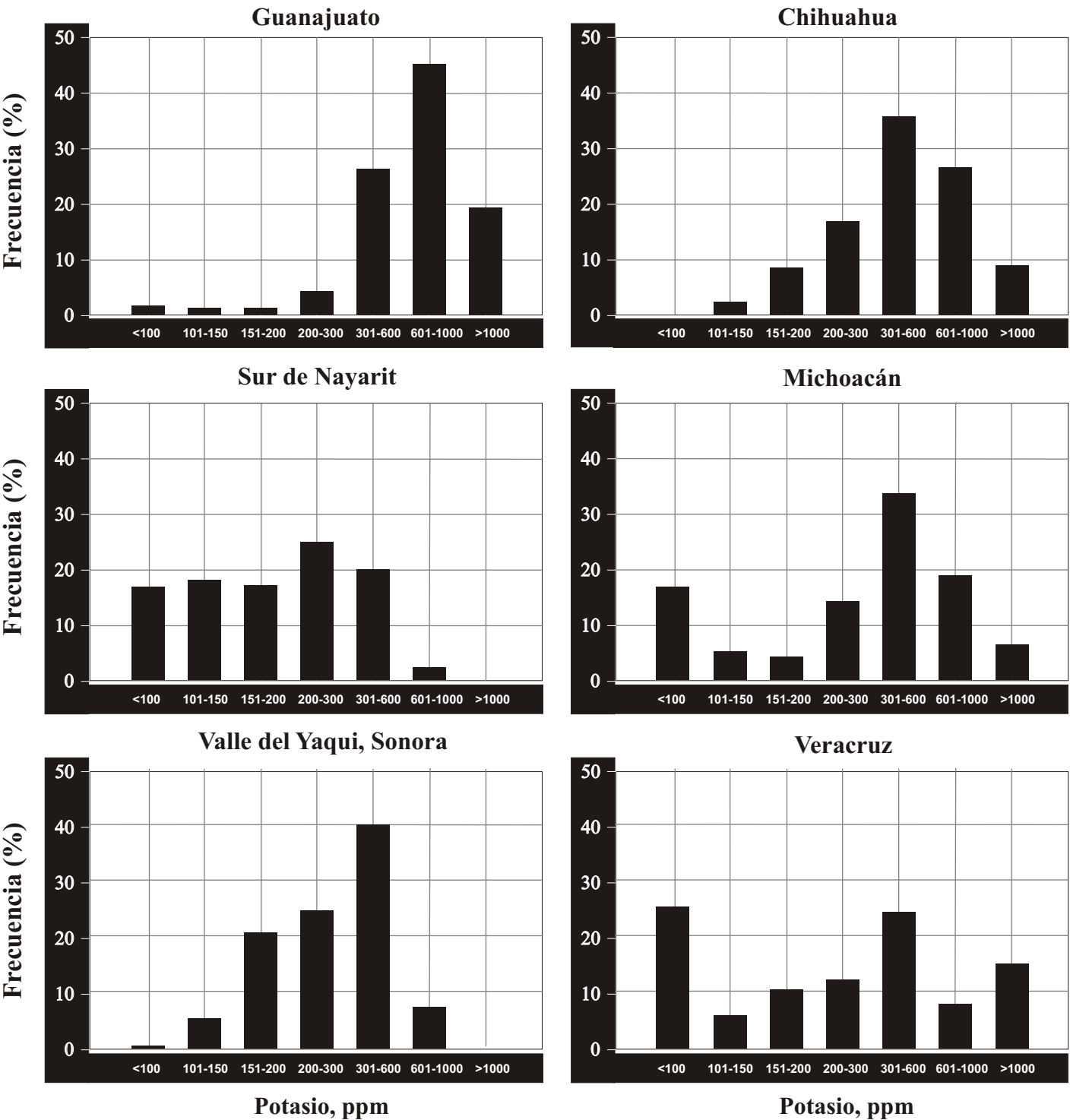


Figura 11. Frecuencias (%) del contenido de potasio en muestras de suelo analizadas en laboratorios del INIFAP por el método del acetato de amonio para diferentes estados de la República Mexicana.

Dosis y época de aplicación de potasio

En México la aplicación de potasio a los cultivos de maíz, sorgo y trigo no es una práctica común, pues la mayoría de los suelos donde se cultivan estos cereales son ricos en potasio; sin embargo, en caso de que el análisis de suelo reporte bajo contenido de este elemento será necesario adicionarlo. Las dosis de fertilización de potasio según la meta de rendimiento y el contenido de K en el suelo se presentan en el Cuadro 15. En cuanto a la época de fertilización es importante tomar en cuenta las curvas de demanda de este nutrimento por el cultivo (ver Figuras 7,

Cuadro 15. Dosis de potasio sugeridas de acuerdo con el nivel del nutrimento en el suelo, el cultivo y la meta de rendimiento.

Cultivo	Meta rend.t/ha	Cantidad de potasio a agregar al cultivo (kg de K ₂ O/ha) de acuerdo con el nivel de K intercambiable		
		M.B.*	B.	Mod. B
Maíz	< 5	60	50	0
	5-10	75	60	30
	> 10	100	75	60
Sorgo	< 5	60	50	0
	5-10	75	60	30
	> 10	100	75	60
Trigo	< 4	50	40	0
	4-6	70	50	25
	> 6	90	60	50

*M.B.= Muy Bajo; B= Bajo; Mod. B.= Moderadamente bajo

8 y 9). En suelos con problemas de fijación de K, este elemento se debe suministrar lo más próximo posible a la etapa de máxima demanda del cultivo. Es importante destacar que a pesar de que los cultivos de cereales tienen una demanda importante de potasio, la mayor parte de éste regresa al suelo vía residuo de cultivo y sólo una parte es exportado del terreno a través del grano.

Fuentes de potasio

Para decidir cuál fuente de potasio utilizar se debe tomar en cuenta el cultivo, el pH del suelo, considerar que los sulfatos tienen reacción ácida, los nitratos reacción alcalina, y los cloruros reacción neutra. La fuente clásica de potasio en cereales es el KCl, por ser la más económica y la única rentable en cereales. Las principales fuentes de potasio y sus concentraciones nutrimentales se presentan en el Cuadro 16.

En relación con los abonos orgánicos, resultados de investigación de campo han mostrado que la mayor parte del potasio contenido en ellos se encuentra en forma soluble y está disponible como en los fertilizantes inorgánicos (Pratt, 1982). Por ello, sólo hay que tomar en cuenta su concentración de K y tratarlos como si fueran fertilizantes inorgánicos en términos de disponibilidad, situación muy distinta al caso del nitrógeno.

Cuadro 16. Fuentes de potasio y concentraciones de N, P₂O₅, K₂O, S y Mg.

Fuente	Fórmula	Concentración nutrimental, %				
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	Mg
Sulfato de Potasio	K ₂ SO ₄	0	0	50	17	0
Sulfato Doble de Potasio y Magnesio	K ₂ SO ₄ MgSO ₄	0	0	22	22	11
Cloruro de Potasio	KCl	0	0	60	0	0
Nitrato de Potasio	KNO ₃	13	0	44	0	0
Fosfato Monopotásico (MKP)	KH ₂ PO ₄	0	52	34	0	0
Fosfato Dipotásico (DKP)	K ₂ HPO ₄	0	41	54	0	0
Polifosfato de Potasio	KH ₂ PO ₄ ;K ₃ H ₂ PO ₇	0	51	40	0	0
Tiosulfato de Potasio	K ₂ S ₂ O ₃	0	0	25	17	0
Polisulfuro de Potasio	KS _x	0	0	22	23	0

CALCIO

El calcio es absorbido por las plantas en la forma de Ca^{++} , y es un nutrimento esencial en los compuestos que forman parte de la estructura de la pared celular, como pectato de calcio, el cual une las paredes primarias de las células adyacentes. El calcio es fundamental en la estabilidad de la pared celular y en el crecimiento de raíz y tallo, ayuda a reducir la acidez del suelo, y beneficia a la planta al reducir el efecto negativo del aluminio y del manganeso.

Entre los factores que afectan la disponibilidad del calcio en el suelo están los siguientes: suministro total de calcio, pH, CIC, porcentaje de calcio en la saturación del total de la CIC, textura, tipo de arcilla, relación del calcio con otros cationes, suministro de agua al cultivo, magnitud de la precipitación pluvial, que provoca la lixiviación de este catión en suelos de regiones tropicales o templadas donde se registran altas precipitaciones.

Diagnóstico de calcio en el suelo

Desde hace más de 70 años la técnica clásica para diagnosticar el contenido de Ca en el suelo es la extracción de calcio intercambiable mediante acetato de amonio 1 N a pH neutro (Chapman y Kelly, 1930). Posiblemente éste es el método de diagnóstico que más años tiene en uso, y al parecer completará un siglo antes de ser cambiado por otro. La razón por la que este método se ha usado hasta la fecha es que además de diagnosticar el Ca sirve para estimar la CIC del suelo, y a través de ésta se puede calcular el porcentaje de sodio intercambiable, que es una determinación importante en suelos de regiones de clima templado o de zonas semiáridas. El problema de esta técnica de diagnóstico es que sobreestima el nivel de Ca en suelos calcáreos debido a la disolución de carbonato de calcio que ocurre en ellos. Los niveles de calcio intercambiable en el suelo se presentan en el Cuadro 17.

Cuadro 17. Niveles de calcio intercambiable en el suelo extraído por el método acetato de amonio y su interpretación, en función de la textura del mismo.

Grupo textural	Contenido de calcio en el suelo, ppm						
	M.B.*	B.	Mod. B.	M.	Mod. A.	A.	M.A.
Fina	<500	500-750	750-1500	1500-3000	3000-5000	5000-6000	>6000
Media	<400	400-600	600-1000	1000-2000	2000- 3500	3500-5000	>5000
Gruesa#	<300	300-500	400-800	800-1200	1200-1750	1750-2500	>2500

*M.B.= Muy Bajo; B= Bajo; Mod. B.= Moderadamente bajo; M= Medio; Mod. A.= Moderadamente alto; A= Alto; M.A.= Muy alto.

#También para suelos tropicales degradados de cualquier grupo textural: Acrisoles, Oxisoles, Cambisoles, Luvisoles y Arenosoles con CICE menor a 5 cmol_c/kg (L. Pastrana, 2002, com. pers.).

Seguramente suelos con niveles de Ca inferiores de 250 a 500 ppm extraídos con acetato de amonio IN a pH 7.0 responderán a la aplicación de este elemento, sobre todo en suelos de muy baja CIC. Sin embargo, mayores concentraciones de Ca en el suelo no necesariamente indican que es innecesario suministrar este elemento, pues son muchos los factores que determinan la necesidad de suministrarlo además de la concentración. La forma de suministrarlo es como yeso, cal o fertilizante. El factor que más afecta la disponibilidad de calcio para la planta es el pH del suelo; cuando éste es menor que 5.5 puede existir una deficiencia de calcio, pues en tales condiciones se limita la absorción de este nutrimento debido a la presencia de aluminio. En el caso del calcio, una concentración en el suelo de 200 ppm equivale a 1 me/100 g de suelo o 1 cmol_c/kg .

De acuerdo con Castellanos *et al.* (2000a), en suelos de Guanajuato, México, con alta predominancia de arcillas del tipo 2:1, los valores típicos de calcio intercambiable en suelos de textura gruesa varían de 5 a 20 cmol_c/kg de suelo (1000 a 4000 ppm), en suelos de textura media varían de 10 a 30 cmol_c/kg de suelo (2000 a 6000 ppm) y en suelos de textura fina varían de 20 a 40 cmol_c/kg (4000 a 8000 ppm). Sin embargo, en suelos tropicales intemperizados, como los Cambisoles, Litosoles, Oxisoles y Regosoles, el contenido de Ca es mucho menor (L. Pastrana, 2002, com. pers.) y en estos suelos se encuentran valores típicos de 2 a 4 cmol_c/kg de suelo (400 a 800 ppm). En cuanto al porcentaje de saturación de la CIC con calcio, Castellanos *et al.* (2000a) indicaron que los contenidos típicos en suelos Vertisoles del Bajío variaron de 50 a 85% y dichos valores no fueron afectados por el grupo textural, mientras que la concentración típica de calcio soluble, es decir, el contenido en el extracto de saturación, varió de 20 a 100 ppm.

Fuentes de calcio

Las fuentes de calcio como fertilizante, sin considerar las que sirven también para incrementar el pH de los suelos ácidos, se presentan en el Cuadro 18.

Cuadro 18. Fuentes de calcio y sus concentraciones de Ca, N, P_2O_5 y S.

Fuente	Fórmula	Concentración nutricional, %			
		Ca	N	P_2O_5	S
Nitrato de Calcio	$Ca(NO_3)_2$	24.4	17	0	0
Nitrato Cálcico Hidratado*	$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	19	15.5	0	0
Cloruro Cálcico	$CaCl_2$	37.2	0	0	0
Cloruro Cálcico Hidratado	$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	18.3	0	0	0
Sulfato Cálcico (70%)	$CaSO_4$	20.5	0	0	16.4
Sulfato Cálcico Hidratado o yeso (80%)	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	18.6	0	0	15
Polisulfuro de Calcio	CaS_x	6	0	0	22
Superfosfato de Calcio Triple	$Ca(H_2PO_4)_2$	12-14	0	46	1-2
Superfosfato de Calcio Simple	$Ca(H_2PO_4)_2 + CaSO_4 \cdot 2H_2O$	18-21	0	20	11-12
Ca-EDTA (para uso foliar)	Ca-EDTA	3-5	0	0	0

*Fuente más común de nitrato de calcio.

La acidez del suelo y el suministro de calcio

De la superficie total cultivable del país se estima que un 14% aproximadamente presenta suelos ácidos (Gavi, 1992). En el estado de Veracruz se estima que existen cerca de 3.6 millones de ha (50% de la superficie total) de suelos con predisposición a la acidez (López *et al.*, 1992), mientras que en el estado de Tabasco los suelos ácidos ocupan una superficie estimada en un poco más de 600,000 ha, que representan el 24.5% de la superficie estatal (Palma y Cisneros, 1996). Los suelos predominantes en esta superficie son los Cambisoles, Luvisoles y Acrisoles, y en menor proporción Plintosoles, Ferrasoles y Arenosoles. En general estos suelos presentan una baja fertilidad natural debido a las serias restricciones en sus propiedades químicas; es decir, se trata de suelos ácidos con pH inferior a 6.0, con bajo contenido de bases de cambio (calcio, magnesio y potasio), así como azufre, fósforo asimilable y elementos menores, especialmente cobre, manganeso y zinc (Zetina *et al.*, 2002).

En las regiones tropicales de México, donde existe un buen potencial climático, se dedican extensas áreas a la producción de cultivos básicos, por lo que estas regiones son de gran importancia en el sector agropecuario. Sin embargo, su productividad suele verse limitada por la

acidez de sus suelos debido al efecto negativo del aluminio y a una serie de efectos colaterales, por lo que requieren del encalado para que estos suelos se mantengan productivos. En la Figura 12 se puede observar el efecto del porcentaje de saturación con aluminio en el rendimiento del maíz en un suelo Ultisol de Puerto Rico (Abruña *et al.*, 1975).

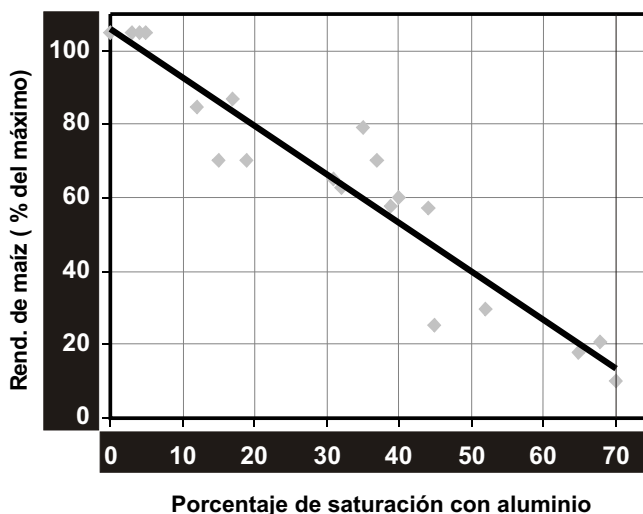


Figura 12. Variación del rendimiento de maíz con el porcentaje de saturación de aluminio en cinco Ultisoles de Puerto Rico (Abruña *et al.*, 1975).

Cuando el encalado se practica adecuadamente eleva el pH del suelo y favorece la actividad microbiológica; suministra calcio y, si se aplica dolomita, también magnesio; incrementa la disponibilidad de fósforo, potasio y molibdeno; neutraliza el efecto fitotóxico de aluminio y manganeso; mejora la estructura del suelo, incrementa el rendimiento y calidad de las cosechas de cultivos sensibles a la acidez; y mejora la acción de algunos insecticidas (Zetina *et al.*, 2002).

Para emprender un programa adecuado de mejoramiento de suelos afectados por acidez, lo primero que se recomienda hacer es un análisis de suelos cuyos resultados van a permitir caracterizar su fertilidad y los factores relacionados a su acidez. La información que se requiere conocer es la siguiente: textura, pH, H y Al intercambiables, materia orgánica, CIC, calcio, magnesio y potasio intercambiables. Con estos datos, y los requerimientos de los cultivos de interés, se define el programa de encalado, que incluye: tipo de material encalante y dosis, relación calcio/magnesio a aplicar, suministro de K adicional al programa normal de fertilización, adición de elementos menores. Después de establecido el programa de encalado se recomienda realizar análisis de suelo cada dos años para vigilar el avance del mejoramiento y hacer los ajustes al programa en caso necesario (Zetina *et al.*, 2002). Las dosis de cal (carbonato de calcio: CaCO₃) varían de 0.5 hasta 3 o más toneladas por hectárea, en función de las características antes descritas. La meta es incrementar el pH por encima de 5.5, medido en agua. Suelos con pH inferior a 5.5 se asocian con problemas de aluminio.

Para el cálculo de los requerimientos de cal se han propuesto varios procedimientos. Por ejemplo, en suelos

Cambisoles de Veracruz, para elevar el pH a 5.5 y para cultivos moderadamente tolerantes a la acidez como el maíz, Zetina *et al.* (2002) propusieron la siguiente ecuación:

$$Y = 10.805 - 1.975x$$

Ecuación 3

Donde:

Y = dosis de cal en toneladas por hectárea
x = pH inicial del suelo

Por otro lado, en el estado de México, en el programa para alta tecnología de maíz del Campo Experimental Valle de México – INIFAP en 1994 fue desarrollado un procedimiento empírico que toma en cuenta el pH medido en agua, el contenido de materia orgánica y la textura del suelo. Este procedimiento es conservador en cuanto a la dosis de cal requerida y no pretende llevar el suelo a un pH de 6.5 sino solamente eliminar el efecto nocivo del aluminio, lo que en forma general se consigue llevando el pH del suelo hasta 5.5. Los requerimientos de cal del suelo, considerando este procedimiento empírico, se presentan en el Cuadro 19.

También es importante considerar la posibilidad de adicionar otros elementos durante el encalado, lo cual se puede definir a través del análisis de suelo. Si se requiere adicionar magnesio es conveniente utilizar cal dolomítica, la cual contiene calcio y magnesio, pero ésta se debe incorporar rápidamente al suelo para evitar que se formen agregados insolubles, como ocurre con algunos materiales de encalado. Si se utiliza cal viva o CaO, la cual es muy cáustica, se deben tener precauciones para evitar quemaduras al personal que la maneje o a la semilla, lo

Cuadro 19. Requerimientos de cal (CaCO₃) en t/ha en suelos cultivados con cereales a partir de un procedimiento empírico que toma en cuenta el pH medido en agua, 1:2, la textura y el contenido de materia orgánica.

Materia orgánica, %	Textura	pH medido en agua		
		4 a 4.5 (t/ha)	4.6 a 5.0 (t/ha)	5.0 a 5.5 (t/ha)
< 1	Gruesa	2.00	1.50	0.50
	Media	2.50	2.00	1.00
	Fina	3.00	2.50	1.50
1 a 3	Gruesa	2.50	2.00	1.00
	Media	3.00	2.50	1.50
	Fina	3.50	3.50	2.00
> 3	Gruesa	3.00	2.50	1.50
	Media	3.50	3.00	2.00
	Fina	3.50	3.50	2.50

Fuente: A. Turrent-Fernández, com. pers., 1994.

que causaría serios problemas de población de plantas. Para evitar quemaduras a la semilla se debe aplicar al menos unos 30 días antes de la siembra para que se neutralice su efecto. Siempre que se aplique cal al suelo es necesario considerar el balance nutrimental; si el nivel de Mg es bajo,

la cal va a reducir aún más su disponibilidad por efectos de competencia. Lo mismo debe considerarse en el caso del potasio. Si se requiere mayor información sobre el encalado de los suelos ácidos se sugiere consultar la publicación de Zetina *et al.* (2002).

MAGNESIO

El magnesio forma parte esencial de la molécula de clorofila, y es necesario para la actividad de muchas enzimas, incluyendo aquellos pasos más importantes en la actuación del ATP. Además, activa el sistema de biosíntesis de la clorofila, fotosíntesis, síntesis de proteína, síntesis de ATP y ATPasas, algunas de las cuales están involucradas en la carga de sacarosa en el floema.

Existen grandes diferencias en la demanda de magnesio de los cultivos. Los cultivos de avena, maíz, pastos, papa, algodón, cítricos, tabaco, palma de aceite y remolacha son los que más responden a la aplicación de este elemento. Las deficiencias de Mg pueden ser de mayor intensidad si se aplican grandes cantidades de fertilizantes potásicos o de calcio.

El magnesio se encuentra en el suelo en forma no intercambiable, intercambiable y soluble. El magnesio intercambiable normalmente constituye de 4 a 20% de la CIC. En el estado de Guanajuato, en suelos de textura gruesa, estos valores variaron de 5 a 30%, y en suelos de textura fina de 10 a 30%. El menor valor registrado fue de menos de 2.5% y el máximo fue de más de 40%. En cuanto a la concentración de Mg intercambiable, extraído mediante acetato de amonio, éste varía típicamente en los mismos suelos de 100 a 700 ppm (0.8 a 5.8 cmol./kg) en los suelos de textura gruesa y de 300 a 2000 ppm (2.5 a 16.7 cmol./kg) en los suelos de textura fina. En la solución de suelo el Mg se encuentra frecuentemente a una concentración de 5 a 70 ppm (Castellanos *et al.*, 2000a), pero se han reportado concentraciones mucho mayores. En el caso del magnesio, una concentración en el suelo de 120 ppm equivale a 1 me/100 g de suelo ó 1 cmol./kg.

Los factores que afectan el suministro de magnesio son los siguientes: contenido de Mg^{++} en el estrato superficial y en el subsuelo, pH, precipitación pluvial (lixiviación), dosis de aplicación de K, CIC, porcentaje de saturación con Mg, textura, tipo de arcilla y relación Ca/Mg. En suelos con alto contenido de aluminio (más de 65% de saturación de aluminio) el abastecimiento de Mg al cultivo es severamente afectado, pues la presencia de aluminio limita la entrada de Mg a la raíz (Tisdale *et al.*, 1993). Los suelos de textura ligera con alto contenido de potasio y bajo

contenido de magnesio son los más susceptibles a deficiencias de Mg. En suelos Oxisoles y Ultisoles puede ocurrir una baja disponibilidad de Mg después de un encalado que lleve el pH a más de 7. En la práctica, los desbalances nutrimentales del suelo provocados por la aplicación excesiva de cal se conocen como sobreencalado y pueden afectar el rendimiento de los cultivos.

Diagnóstico de magnesio en el suelo

La técnica clásica para diagnosticar el contenido de Mg en el suelo es la misma que se utiliza para medir el calcio intercambiable (Chapman y Kelly, 1930). Al igual que en el diagnóstico del calcio, esta técnica sobreestima el nivel de Mg en los suelos con más de 2% de carbonatos totales. En tal caso se debe de usar la extracción de cationes de cambio con acetato de amonio 1 N a pH de 8.5 (Normandin *et al.*, 1998), aunque este procedimiento aún no está adoptado por los laboratorios mexicanos; el primer autor de la presente publicación ha comprobado el buen desempeño de este procedimiento para cuantificar el Ca y Mg intercambiables en suelos calcáreos.

Los niveles críticos de Mg en el suelo son variables dependiendo del cultivo y de los parámetros mencionados. Como se indicó en párrafos anteriores, el intervalo puede ir de 25 a 180 ppm extraído con acetato de amonio para una variedad de cultivos y diferentes regiones (Haby *et al.*, 1990). Sin embargo, estos mismos autores sugieren que los niveles de Mg considerados como críticos varían de 30 a 60 mg/kg, en los que el valor bajo es para suelos de textura gruesa y el alto para suelos de textura fina. Etchevers *et al.* (1971), por su parte, definen a un suelo muy bajo en Mg cuando su concentración está por debajo de 60 mg/kg; bajo, de 60 a 150 mg/kg; medio, de 150 a 360 mg/kg; y alto, más de 360 mg/kg de suelo.

Dosis y formas de aplicación de magnesio

Cuando se diagnostica una deficiencia de magnesio, este elemento se aplica en la primera fertilización que se haga al suelo, en dosis que varían de 5 a 15 kg/ha de Mg. Cuando se usa dolomita, que es de baja solubilidad, se requieren mayores dosis de Mg para suministrar este nutrimento al

cultivo. La dolomita, que es también una fuente de carbonatos para neutralizar el suelo, contiene de 3 a 12% de Mg y las dosis de dolomita que frecuentemente se aplican al suelo varían desde 500 kg/ha hasta varias toneladas, dependiendo del pH del suelo. En la mayor parte de los suelos cultivables de México no se requiere aplicar magnesio; sin embargo, cuando se encuentra en muy bajas concentraciones es recomendable incluirlo en el programa de fertilización. También se puede usar nitrato de magnesio [Mg(NO₃)₂·6H₂O] a través de fertilización foliar. Esta forma de aplicación suele combinarse con la aplicación de Fe en

cultivos como maíz y sorgo. En este caso se usan dosis de 1 kg de nitrato de magnesio en combinación con 2 kg de sulfato ferroso por ha, pero siempre se deberán de hacer pruebas previas hasta que el productor se familiarice con el producto, la cantidad de agua y la hora de aplicación.

Fuentes de magnesio

Las fuentes de magnesio y sus concentraciones nutrimentales se presentan en el Cuadro 20.

Cuadro 20. Fuentes de magnesio como fertilizantes y sus concentraciones de Mg, N, K₂O y S.

Fuente	Fórmula	Concentración nutrimental, %			
		Mg	N	K ₂ O	S
Sulfato de Magnesio	MgSO ₄ 7H ₂ O	10	0	0	13
Sulfato de Potasio y Magnesio	K Mg SO ₄	11	0	20	22
Nitrato de Magnesio	Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	9.5	11	0	0
Cloruro de Magnesio	MgCl ₂	7.5	0	0	0
Dolomita (Carbonato de Ca y Mg)	CaMgCO ₃	3-12	0	0	0

AZUFRE

El azufre, al igual que el calcio y magnesio, es otro de los elementos secundarios esenciales. Es un constituyente estructural de los compuestos orgánicos, algunos de los cuales son únicamente sintetizados por las plantas, como la cisteína, cistina y metionina, requeridos para sintetizar las proteínas que contienen azufre y que son indispensables para el reino animal. El S también es contenido en vitaminas y co-enzimas como la tiamina, biotina, co-enzima A y ácido lipóico.

Las deficiencias típicas de azufre podrían ocurrir con mayor frecuencia en los suelos de bajo pH, (Ultisoles, Alfisoles y Oxisoles), en los cuales la capacidad de adsorción de S es importante debido a la presencia de minerales arcillosos, materia orgánica y óxidos de hierro y aluminio. Las condiciones que propician una deficiencia de S en el suelo son baja deposición atmosférica de S (< 6 kg S/ha), aguas de riego con muy baja concentración de sulfatos, materiales parentales a base de basalto, granito o cenizas volcánicas y alta precipitación pluvial (Rasmusen y Kresge, 1986). Por el contrario, en suelos de zonas áridas donde se utilizan aguas de riego con altos contenidos de sulfatos y materiales

parentales como rocas sedimentarias, es improbable la respuesta a aplicaciones de azufre. La determinación del contenido de S en este tipo de suelos casi no se practica por considerarse innecesaria. Es por ello que el diagnóstico del contenido de S en el suelo y la planta no es una determinación de rutina en los análisis de laboratorio en zonas áridas, semiáridas o templadas, de moderada a baja precipitación.

Los métodos más comunes para diagnosticar el nivel de S asimilable en el suelo son mediante la extracción de S-SO₄ con fosfato monocálcico, bicarbonato de sodio y cloruro cálcico. Sin embargo, estos métodos no son muy efectivos debido a lo dinámico de este elemento en el suelo, particularmente si la precipitación pluvial es alta. Cuando la concentración de S en la solución de suelo es mayor de 5 ppm, normalmente la planta puede abastecerse bien de este elemento (Tisdale *et al.*, 1993).

La corrección de una deficiencia de azufre se puede realizar tan solo mediante la aplicación de fuentes de N, P, K, Ca o Mg que contengan este elemento en su fórmula, como ocurre con todas las fuentes sulfatadas.

MICRONUTRIMENTOS

Los micronutrientes que requieren los cultivos regularmente en forma esencial son: Fe, Cu, Zn, Mn, B y Mo. Con frecuencia el rendimiento de algunos cultivos está limitado por la deficiencia de unos cuantos gramos de uno o varios micronutrientes. Si no se corrige la deficiencia el rendimiento no va a aumentar aunque se apliquen dosis excesivas de todos los macronutrientes. Por tal razón, el diagnóstico de los elementos nutritivos en el suelo, no sólo del N, P y K, es indispensable para potencializar el rendimiento de los cultivos. A continuación se presenta la estrategia de diagnóstico, la interpretación de los valores reportados por el laboratorio y las formas de corregir las deficiencias de micronutrientes.

Diagnóstico de los micronutrientes en el suelo

El único método eficiente aceptado universalmente para diagnosticar el contenido de Fe, Mn, Zn y Cu en el suelo es el del DTPA, en particular en suelos de pH neutro a alcalino. Este diagnóstico permite definir si es necesario agregar algún micronutriente en la mezcla de fertilizantes, o bien, planear su aplicación a través de fertilizantes foliares en determinada etapa del desarrollo del cultivo. En el Cuadro 21 se presentan los cuatro micronutrientes que se diagnostican mediante el método del DTPA, y el boro extraído mediante agua caliente, así como la forma de interpretar los resultados del análisis (Castellanos, 2004).

Cuadro 21. Contenido de micronutrientes en el suelo y su clasificación.

Micro-nutrientes	Muy bajo	Bajo	Mod. bajo	Medio o adecuado	Mod. alto	Alto	Muy alto
Fe ¹ , ppm	< 3	3 - 5	6 - 8	9 - 12	13 - 25	26 - 50	> 50
Mn ¹ , ppm	< 2	2.1 - 4.0	4 - 7	8 - 12	13 - 25	26 - 50	> 50
Zn ¹ , ppm	< 0.3	0.3 - 0.6	0.7 - 1.5	1.5 - 2.5	2.6 - 5.0	5.1 - 8.0	> 8.0
Cu ¹ , ppm	< 0.2	0.2 - 0.5	0.6 - 1.2	1.3 - 2.0	2.0 - 2.5	2.5 - 4.0	> 4
B ² , ppm	< 0.4	0.5 - 0.7	0.8 - 1.2	1.3 - 1.5	1.6 - 2.0	2 - 3	> 3

1 Extraídos con DTPA
2 Extracción en agua caliente

En el Cuadro 22 se presenta la respuesta de los cultivos de maíz, sorgo y trigo a los micronutrientes. Una alta sensibilidad de los cultivos al micronutriente se refleja usualmente en una alta respuesta a la adición de fertilizante

cuando existe una deficiencia del elemento en el suelo. A continuación se describen las funciones de cada micronutriente en las plantas y se presentan algunas recomendaciones para su manejo.

Cuadro 22. Respuesta de los cultivos de maíz, sorgo y trigo a la fertilización con micronutrientes.

Cultivo	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
Maíz	Medio	Medio	Medio	Medio	Bajo	Alto
Sorgo	Bajo	Medio	Alto	Alto	Bajo	Alto
Trigo	Bajo	Alto	Medio	Alto	Bajo	Medio

Fuente: Martens y Westerman, 1991.

Hierro

El hierro es un elemento necesario en la síntesis de clorofila, forma parte esencial de la fotosíntesis y la respiración y sirve como un catalizador en la división celular y en los procesos de crecimiento. Forma parte esencial de la ferredoxina, de la nitratorreductasa, de la nitrogenasa, y es además un activador de muchas otras enzimas.

La solubilidad del hierro decrece mil veces por cada unidad que se incrementa el pH del suelo de 4 a 9 (Lindsay, 1979); por esta razón, la disponibilidad del hierro es uno de los principales problemas de los suelos calcáreos, siendo mucho más importante que la del resto de los micronutrientes, pues la solubilidad de Zn, Mn y Cu, a diferencia de la de Fe, sólo se reduce 100 veces por cada unidad de aumento en el pH. Los principales factores que afectan la disponibilidad de hierro son pH, la presencia de bicarbonatos en la solución del suelo, carbonatos totales y carbonatos más reactivos, la aireación, el contenido de materia orgánica, la temperatura del suelo y la interacción negativa con otros nutrientes tales como Cu, Mn, Zn y P. Una concentración menor a 5 ppm mediante la extracción con DTPA significa que posiblemente existen problemas con la disponibilidad de este nutriente en la mayor parte de los cultivos sensibles a su deficiencia, en particular en sorgo.

La adición de materia orgánica en suelos bien drenados mejora la disponibilidad de Fe, y la fuente de nitrógeno también afecta la disponibilidad del elemento. Así, cuando se suministran nitratos, el problema tiende a incrementarse en comparación con el suministro de amonio como fuente de N; esto se debe a que las fuentes amoniacales tienden a acidificar parcialmente el medio en el proceso de nitrificación.

Medidas correctivas para tratar una deficiencia de hierro.

La aplicación de Fe al suelo como medida preventiva presenta serias limitaciones debido a su alta reactividad y precipitación en formas no asimilables en suelos alcalinos, por lo que normalmente esta práctica no se recomienda. Las aplicaciones foliares de Fe tienen efectos inmediatos en el cultivo y son más efectivas que las aplicaciones al suelo. Si se decide aplicar sulfato ferroso vía foliar se recomienda utilizar una solución de 1 a 2% dependiendo del cultivo, y agregando a la mezcla nitrato de magnesio al 0.5 % y urea baja en biuret a una concentración del 0.5%. Hsu y Ashmead (1984) reportan un incremento en la absorción de Fe por las hojas del maíz al incluir urea conjuntamente con el Fe. Debido a la variación del pH de las aguas se recomienda ajustar la solución de aspersión a un pH de 6.0 al final de la preparación de la mezcla, pues

el sulfato ferroso es de reacción ácida. La fertilización foliar se realiza de dos a cinco veces durante el ciclo y principalmente antes de la floración, según el grado de deficiencia, con equipos de aspersión que aplican de 200 a 600 L de agua/ha en intervalos de seis a ocho días. Con los equipos de aspersión convencional una buena cantidad de agua a aplicar varía de 400 a 600 L, y con equipo manual de 200 a 400 L, dependiendo del cultivo y de su estado de desarrollo. Es importante indicar que a las fertilizaciones foliares con hierro no se les debe adicionar Zn o Cu, pues estos elementos inhiben la absorción de aquél al competir por los mismos sistemas de transporte al interior de la planta y éstos tienden a desplazar al hierro. La ventaja para el productor que aplica sulfato ferroso es que utiliza un producto más económico y a menudo tan efectivo como el de los mejores quelatos. Cuando se va a aplicar un fertilizante foliar por primera vez a un cultivo, es recomendable realizar pruebas en pequeñas porciones del terreno. Las aplicaciones de Fe, Cu, Zn, Mn y B en las horas más calientes del día pueden causar quemaduras si se sobrepasa la dosis recomendada; esta situación varía con el cultivo y con su estado de desarrollo, siendo más sensible en plantas jóvenes. Cuando se usen quelatos como fertilizantes foliares se recomienda seguir las instrucciones de los fabricantes, pues existen variaciones en tipo y concentración. Los quelatos de buena calidad en general son más efectivos que el Fe mineral en términos de cantidad de Fe aplicado, por lo que al utilizar quelatos la dosis de Fe es normalmente más baja. El principal quelato de Fe para uso foliar es el EDTA. Si se decide aplicar Fe-EDTA es necesario acidular el agua a pH 5.5 a 6.0 mediante el uso de ácido cítrico u otro acidulante, de preferencia orgánico, antes de verter el quelato en el agua.

Zinc

El zinc es un elemento esencial en la síntesis de proteínas, participa activamente en la formación de almidones y promueve la maduración y producción de la semilla. Es un precursor de auxinas y es esencial en la formación de la hormona del ácido indolacético (Marschner, 1996). Es un elemento ligeramente móvil en la planta. De los cereales, el cultivo del maíz es el que muestra mayor sensibilidad a una deficiencia de Zn (Martens y Westerman, 1991).

En los suelos del centro de México, el Zn es posiblemente uno de los micronutrientes de baja disponibilidad. Castellanos *et al.* (2000a) encontró que más del 40% de los suelos del estado de Guanajuato muestran niveles de Zn-DTPA menores de 0.9 ppm, considerado como nivel crítico para obtener respuesta a este micronutriente. El

problema de bajos contenidos de Zn en el suelo también ocurre en los suelos áridos del norte de México (J. A. Cueto, 2002, com. pers.). Por otro lado, en la región central de México se ha encontrado respuesta a la aplicación de Zn en suelos con niveles superiores de 1 ppm de Zn-DTPA.

La disponibilidad de zinc está estrechamente asociada al pH del suelo. Los suelos con un pH mayor de 6 pueden presentar problemas de disponibilidad de este micronutriente, especialmente si tienen bajo contenido de materia orgánica (Mortvedt y Gilkes, 1993). Aunque los mayores problemas de Zn se presentan en suelos alcalinos, éste puede ser también un problema en los suelos tropicales del sureste de México, particularmente en los suelos arenosos. El hecho de tener un suelo ácido no es una garantía de que el Zn esté presente en cantidades suficientes; por ello, la decisión de aplicar o no este elemento sólo se puede basar en los resultados de un análisis de suelo y un análisis foliar.

Probablemente el Zn es el micronutriente de mayor deficiencia en los suelos del mundo. La infección de las raíces por las micorrizas incrementa la disponibilidad de zinc (Hamilton *et al.*, 1993) y los fenómenos de adsorción llevados a cabo por las arcillas, la reducen. La adsorción del Zn por los carbonatos es parcialmente responsable de la baja disponibilidad que ocurre en los suelos calcáreos. El Zn también puede precipitar como carbonato de Zn pero esta reacción es reversible. El Ca y el Mg sustituyen este micronutriente en los complejos de Zn de la solución del suelo, por lo que se debe tener especial cuidado de revisar posibles deficiencias de Zn cuando se da un fuerte encalado al suelo. El problema de deficiencias de Zn suele agravarse por el encalado, cortes por nivelación y el uso de agua con alto contenido de bicarbonatos.

Otros cationes en altas concentraciones, como Cu y Mn, inhiben la absorción de zinc debido a la competencia por los sistemas de transporte al interior de la planta. Un alto contenido de fósforo en suelos con niveles marginales de Zn afecta negativamente la disponibilidad de Zn, por lo que no es recomendable aplicar fósforo en suelos con alto contenido de este nutriente. Por otro lado, la aplicación innecesaria de fósforo inhibe la infección de la micorriza, lo cual se refleja negativamente en la absorción de Zn. La aplicación de dosis altas de nitrógeno puede estimular la absorción de Zn y en tales condiciones se observa respuesta a la aplicación de este micronutriente. De igual manera que el hierro, la fuente de N afecta su disponibilidad, y es más favorecida por la fuente amoniacal. Por ello, en la

fertilización de fondo en suelos con niveles marginales de Zn, al decidir las fuentes de N, P y K, es recomendable usar amoniacales y de preferencia sulfatadas. En cuanto a las condiciones climáticas, los suelos fríos tienden a reducir la disponibilidad de Zn, y dicha sintomatología se revierte cuando el suelo se vuelve a calentar después del invierno.

Medidas correctivas para tratar una deficiencia de zinc.

Cuando se detecta una deficiencia de Zn mediante el diagnóstico de la fertilidad del suelo y se desea aplicar un tratamiento correctivo del nutriente, antes de decidir la fuente conviene considerar el pH del suelo. Si el pH es menor a 7, o es un suelo con menos de 2% de carbonatos, es factible fertilizar el suelo con sulfato de zinc granulado en dosis de 10 a 40 kg/ha. Si el pH es mayor a 7, o el suelo presenta más de 2% de carbonatos, es muy recomendable una mezcla de polifosfato de amonio y sulfato o nitrato de zinc. Este último fertilizante va en dosis de 0.2 a 1 kg Zn/ha en la aplicación del polifosfato de amonio. En tales condiciones el polifosfato actúa como un agente “quelatante” y el desplazamiento de ambos nutrientes en el suelo, es efectivo aún en condiciones de pH alcalino. Se ha usado también una solución de ZnSO₄ amoniacada mezclada con el polifosfato de amonio. Una dosis muy pequeña es capaz de incrementar sustancialmente el rendimiento, cuando el contenido de Zn se encuentra por debajo de su nivel crítico en el suelo. Otra forma de incrementar la disponibilidad de Zn es utilizar estrategias que permitan aumentar el contenido de materia orgánica en el suelo.

La forma más económica de tratar una deficiencia de Zn una vez detectado el problema y con el cultivo en marcha es mediante una aplicación foliar en una etapa temprana del cultivo para asegurar un buen suministro de este micronutriente; aplicaciones tardías no corrigen la deficiencia y para entonces el rendimiento ya ha sido afectado. Usualmente la corrección de la deficiencia ocurre en pocos días después de la aplicación. El uso de nitrato de zinc suele ser una forma muy conveniente para suministrar zinc vía foliar, o bien, el uso de quelatos de Zn a base de EDTA en la dosis recomendada por el fabricante.

Manganeso

El manganeso es tomado por la raíz en forma activa principalmente como Mn⁺⁺, aunque también es tomado como quelato. Se transporta vía xilema como Mn⁺⁺, y se almacena como óxido de manganeso. Su movilidad en la planta es media. El manganeso participa en la síntesis de clorofila y asimilación de nitratos. También participa en la

toma y transporte de N, P, Ca, y Mg y se le atribuye un importante papel en la germinación y madurez fisiológica del grano, de allí la importancia de un buen contenido en el grano (Uvalle y Osorio-Alatorre, 1999). En general los cereales muestran sensibilidad a la deficiencia de Mn.

Uvalle y Osorio-Alatorre (1999) indican que los principales factores que coadyuvan a la reducida disponibilidad de manganeso son: pH alto; suelos aluviales ricos en limo y arcilla; suelos con alto contenido de carbonatos; exceso de humedad y pobre aireación; bajas temperaturas del suelo; interacción con Cu, Fe y Zn en altas concentraciones en el suelo; la fuente de N también afecta la asimilación de Mn, la que es favorecida por el amonio y reducida por el nitrato; los suelos arenosos suelen presentar problemas de Mn; y el encalado puede afectar la disponibilidad de manganeso debido al aumento en el pH, por lo que se debe tener especial precaución en tales prácticas. Por otro lado, el potasio favorece la asimilación de este micronutriente. El KCl es la fuente de K que más incrementa la asimilación de manganeso y en menor grado el KNO_3 y el K_2SO_4 (Tisdale *et al.*, 1993).

Medidas correctivas para tratar una deficiencia de manganeso. Las aplicaciones de sulfato de manganeso al suelo varían de 5 a 40 kg/ha, dependiendo del pH y de la severidad de la deficiencia (las dosis mayores son para los suelos más alcalinos y de menor contenido de Mn). Para reducir sensiblemente la dosis requerida se recomienda realizar aplicaciones en banda. La forma más económica de tratar una deficiencia de Mn es mediante aplicaciones foliares de Mn-EDTA en dosis de 1 a 2 kg/ha dependiendo de la fuente o de las dosis que recomienda el fabricante. También se puede usar una solución de sulfato de manganeso tetrahidratado al 1%, en dosis totales de 0.5 a 2 kg Mn/ha dependiendo del cultivo y de la severidad de la deficiencia. Se pueden repetir las aplicaciones dos a tres veces con intervalos de seis a ocho días. Si es la primera vez que se usa el producto en el cultivo se sugiere realizar pruebas previas de aplicación foliar. No se recomienda la aplicación de quelatos en el suelo como Mn-EDTA, debido a que el Ca y el Fe reemplazan rápidamente al Mn del quelato.

Cobre

La principal función del cobre en las plantas es participar como coenzima en varios sistemas enzimáticos involucrados en formar y convertir aminoácidos. Su movilidad en la planta es media. Su contenido en planta varía de 6 a 25 ppm. El maíz y el trigo son los cereales más

sensibles a deficiencias de Cu. Las deficiencias de Cu se presentan normalmente en suelos con altos contenidos de materia orgánica, donde el Cu es adsorbido con gran fuerza; en suelos muy arenosos sujetos a lavado; en suelos alcalinos, por lo que una sobredosificación de cal puede propiciar el problema de deficiencia de cobre; y en condiciones de altos niveles de N, P, Mn o Zn.

Medidas correctivas para tratar una deficiencia de cobre. Se pueden realizar aplicaciones foliares de Cu-EDTA en dosis de 0.25-0.5 kg/ha, o en la dosis recomendada por el fabricante. Como se mencionó antes, es necesario hacer pruebas de dosis si es la primera vez que se realiza fertilización foliar con Cu.

Boro

El contenido de boro en la planta varía de 2 a 200 ppm. En cultivos de alta demanda, el intervalo de suficiencia es de 30 ppm y en los de baja demanda es de 5 ppm (Uvalle y Osorio-Alatorre, 1999). Este nutriente, al igual que el Ca, es prácticamente inmóvil en el interior de la planta. El boro es tomado por la raíz en forma pasiva mediante flujo de masa a través de la transpiración, como ion borato o molécula completa de ácido bórico. Al igual que el calcio, el boro se mueve en una sola dirección por el xilema mediante la corriente transpiratoria y es almacenado como borato. El flujo a través del floema es prácticamente nulo, por lo que su movilidad es baja y la deficiencia se manifiesta primero en las hojas jóvenes y ápices de crecimiento. Entre las funciones metabólicas que realiza están la síntesis de hormonas y regulación de auxinas, transporte de carbohidratos, desarrollo apical del tallo y la raíz, y la polinización y el amarre del fruto. Estas últimas funciones se ven afectadas por altas temperaturas, cuando las tasas de crecimiento son mayores que el suministro de boro a estos sitios de la planta.

En maíz se ha demostrado que un período de sequía agudiza el problema de deficiencia de B y puede provocar un pobre desarrollo del jilote, por la sensibilidad de este cultivo a la deficiencia del micronutriente. Si se analiza B en suelo o en hojas, esta deficiencia no siempre va a ser detectada debido a que el B se mueve en el flujo transpirativo del xilema y, por ser un nutriente poco móvil, su deficiencia se hace evidente en el tejido de baja tasa transpirativa. En ocasiones, aún con buen suministro de agua y buen contenido de B en el suelo y en la hoja, en condiciones de altas temperaturas, ocurre un fenómeno denominado deficiencia transitoria, el cual se presenta debido a que el tejido no es capaz de transportar las necesidades de B de

la planta debido a la alta velocidad de crecimiento de los órganos fructíferos, y en ese caso también es recomendable suministrar B.

La mayor disponibilidad de B ocurre en suelos con pH de 5.5 a 7.5, y tiende a reducirse por encima o por debajo de estos valores. Los factores que afectan su disponibilidad son: a) la textura del suelo (la deficiencia es mayor en los suelos arenosos bien drenados), b) pH del suelo (la disponibilidad decrece cuando se incrementa por encima de 7), por lo que el encalado de los suelos fuertemente ácidos reduce de manera temporal la disponibilidad de boro, c) el encalado aumenta la mineralización de la materia orgánica y se incrementa la liberación de boro, d) la interacción con otros nutrimentos, así por ejemplo cuando la disponibilidad de calcio es alta, la demanda de boro será mayor (en algunas empresas de fertilizantes impregnan el nitrato de calcio con boro para promover la absorción y transporte de calcio en la planta), y e) el nivel de materia orgánica juega también un papel importante sobre la disponibilidad del boro pues las condiciones que influyen en la mineralización de la materia orgánica favorecen la disponibilidad de B en el suelo.

La humedad del suelo también afecta la disponibilidad de boro, pues este elemento al igual que el calcio, se mueve por flujo de masa y difusión, y estos procesos se ven afectados por la humedad. El tipo de mineral también afecta la adsorción o proceso mediante el cual el elemento se adhiere a la superficie de los minerales. Por otro lado, la fertilización con altas dosis de potasio, la alta temperatura y radiación solar incrementan la tasa de demanda de boro por el cultivo, por lo que cuando se apliquen altas dosis de K es recomendable suministrar boro si éste se encuentra en condiciones marginales.

Medidas correctivas y preventivas para tratar una deficiencia de boro. Una deficiencia de B puede ser corregida mediante fertilización al suelo o foliar. Las dosis de fertilización con boro al suelo varían con el cultivo, prácticas culturales, lluvia, encalado, y el contenido de materia orgánica. En general se recomiendan dosis de 1 a 2 kg B elemental/ha, aplicados en banda. Para evitar riesgos de toxicidad en el cultivo es muy importante preparar correctamente la mezcla, de preferencia con una mezcladora mecánica, lo que asegura una aplicación uniforme. La dosis mayor es para cultivos de muy alta demanda, suelos muy pobres en este elemento, de textura ligera y en aplicaciones al voleo, aunque generalmente se recomienda no subir la dosis a más de 3 kg B/ha. Touchton y Boswell (1975) reportaron que dosis mayores de 3 o 4 kg B/ha pueden causar toxicidad en cultivos anuales. Al

parecer una dosis de 1 kg B/ha en aplicaciones en banda para cultivos anuales es suficiente para resolver una deficiencia de B (Martens y Westerman, 1991). En aplicaciones en banda, el riesgo de toxicidad por una dosis elevada se agudiza; en tal caso, después de un error de esta naturaleza, la única alternativa es plantar cultivos tolerantes, hasta que el nivel de B disponible en el suelo se reduzca. También es factible realizar aplicaciones de cal para reducir su disponibilidad. Es importante recordar que el grado de susceptibilidad a la deficiencia y a la toxicidad de las plantas por boro es variable. Por esta razón se debe tener cuidado de no sobredosificar con boro al suelo cuando se incluyen en la rotación cultivos muy susceptibles a la toxicidad por este elemento como es el frijol. Este es uno de los nutrimentos en los cuales el valor de suficiencia está muy cercano al valor de exceso. La forma de aplicación es también muy importante, en aplicaciones en banda las dosis indicadas se pueden reducir. Las aplicaciones al suelo son más recomendables para cultivos extensivos, y las foliares para cultivos hortofrutícolas. Cuando se va a realizar una aplicación tardía de B en el cultivo del maíz, ésta no deberá pasar de la época de jiloteo. En un caso como éste se puede utilizar ácido bórico en dosis de 5 a 8 kg/ha, aplicado a través del agua de riego siempre y cuando el terreno esté bien nivelado para que el fertilizante se distribuya adecuadamente.

Molibdeno

La principal función del Mo es participar en la actividad de la enzima nitrato-reductasa y en la de la nitrogenasa, que lleva a cabo la reducción de nitrógeno elemental de la atmósfera a aminoácidos dentro de la planta; por esta razón, las leguminosas son las plantas con mayor demanda de Mo. Los cultivos más sensibles a deficiencias de Mo son: la mayoría de las leguminosas, las crucíferas, los cítricos, betabel, algodón, lechuga, tomate, espinaca, maíz dulce y papa, aunque la variabilidad genética del cultivo afecta su sensibilidad. Las demandas más bajas se reportan para cultivos de cereales. La principal característica de este micronutriente es que existe en muy bajas concentraciones tanto en suelo como en planta, por lo que es difícil de analizar con procedimientos y equipo convencional. Incluso para analizarlo con equipo de alta precisión se requiere de la experiencia de un buen analista, pues su concentración en planta varía típicamente de menos de 0.05 a 1 ppm. Por este motivo, ésta no es una determinación de rutina en suelo ni en planta en la mayoría de los laboratorios. Los problemas de molibdeno suelen ocurrir en suelos ácidos, en los que baja su disponibilidad. Normalmente con el solo encalado se resuelve el problema de deficiencia de este nutriente.

Medidas correctivas para tratar una deficiencia de molibdeno. Cuando se diagnostique mediante análisis foliar una deficiencia de Mo en cereales producidos en el centro y norte de México en un laboratorio competente, la mejor forma de corregirla es mediante la aplicación foliar de molibdato de amonio o de sodio, en dosis de 20 a 50 g Mo/ha.

La reserva de Mo en la semilla también desempeña una función importante en la deficiencia de este elemento. A menudo un tratamiento a la semilla que se sembrará en una hectárea con 10 g de molibdato de amonio coadyuva a resolver el problema de Mo en la planta.

EL DIAGNÓSTICO FOLIAR EN MAÍZ, SORGO Y TRIGO

El análisis foliar para monitorear la nutrición del cultivo es una herramienta muy recomendable que respalda la toma de decisiones respecto a un programa de fertilización. En muchos casos ya no es posible hacer correcciones en el ciclo, pero permite predecir problemas nutricionales futuros. En el Cuadro 23 se presentan los niveles de suficiencia en la hoja más recientemente madura en maíz (hoja opuesta al elote), sorgo y trigo (hoja bandera) con

finés de interpretar los análisis foliares (Campbell, 2000). Estos niveles de referencia (para la etapa de inicio de floración del cultivo) son aproximados a la realidad y son una guía general para interpretar los resultados de laboratorio, aunque pueden ser diferentes entre variedades y entre regiones. Estos valores serán corroborados y afinados en el futuro mediante investigaciones locales.

Cuadro 23. Niveles de referencia nutrimental en la etapa de floración en maíz (en la hoja opuesta al elote), en sorgo y trigo (en la hoja bandera) para interpretar los análisis foliares.

Elemento	Maíz	Sorgo	Trigo
Nitrógeno, %	2.90 - 3.50	2.50 - 4.00	3.00 - 4.00
Fósforo, %	0.25 - 0.50	0.20 - 0.35	0.20 - 0.50
Potasio, %	1.80 - 2.50	1.10 - 2.50	1.50 - 3.00
Calcio, %	0.21 - 1.00	0.30 - 0.60	0.20 - 1.00
Magnesio, %	0.16 - 0.60	0.15 - 0.35	0.14 - 0.50
Azufre, %	0.16 - 0.50	0.20 - 0.50	0.20 - 0.40
Manganeso, ppm	20 - 50	20 - 100	16 - 200
Hierro, ppm	30 - 250	60 - 250	25 - 300
Boro, ppm	5 - 30	4 - 20	6 - 30
Cobre, ppm	6 - 20	2 - 7	6 - 50
Zinc, ppm	20 - 70	20 - 100	20 - 70

Fuente: Campbell (2000).

EPÍLOGO

La información contenida en este folleto introduce a los productores en el uso de técnicas agronómicas que les permiten definir con precisión dosis de fertilización adecuadas a sus sistemas de producción con el propósito de obtener mayores rendimientos en sus cultivos con el menor daño posible al ambiente. Las técnicas agronómicas propuestas se basan en el análisis de los factores del suelo y manejo del cultivo que determinan la cantidad de fertilizante que debe ser aplicado a los cultivos de maíz, sorgo y trigo.

De los nutrimentos indispensables para la mayoría de los cultivos, el nitrógeno es el que se encuentra en cantidades limitantes en casi todos los suelos del país. Para definir la dosis de fertilización con nitrógeno se deben considerar los siguientes aspectos: 1) la demanda de la planta, la cual depende del cultivo, de la variedad y del rendimiento esperado; y 2) el suministro de nitrógeno por el suelo, el cual está directamente influenciado por el contenido de la materia orgánica del mismo, la incorporación de residuos de cosecha y la cantidad de nitrógeno inorgánico presente en el suelo al momento de la siembra, definida mediante el análisis de nitratos. Un factor importante en la definición de la dosis de fertilización es la eficiencia de uso del nitrógeno, la cual está directamente relacionada con las propiedades físicas del suelo, el manejo del agua y la época y forma de aplicación del fertilizante.

En relación con el fósforo es necesario dar respuesta a dos preguntas esenciales: la primera es ¿debo aplicar fósforo?, y la segunda es ¿cuánto fertilizante fosfatado debo aplicar? Para dar respuesta a estas interrogantes se requiere el análisis de la cantidad de fósforo disponible a través del método de Bray-1 en suelos ácidos y neutros, y mediante el método de Olsen en suelos alcalinos. Es conveniente tomar en consideración que el fertilizante fosfatado tiene un efecto residual considerable en muchos suelos y que existe una alta probabilidad de que no haya respuesta de los cultivos a la aplicación de este nutrimento.

En cuanto al potasio, la mejor forma de determinar qué cantidad está disponible para las plantas es a través del análisis de suelo. Resultados obtenidos en el INIFAP y en otras instituciones de investigación agrícola indican que en la mayoría de los suelos de México no se ha encontrado respuesta a la aplicación de potasio en los cultivos de

cereales. Sin embargo, la decisión de fertilizar los cultivos con este nutrimento debe basarse en el resultado del análisis del suelo.

El calcio es otro de los nutrimentos indispensables para las plantas; normalmente la aplicación de calcio se realiza como una práctica asociada a la definición de la necesidad de encalado para reducir los efectos nocivos de la acidez del suelo, y en particular del aluminio, es decir su suministro sólo se considera para suelos ácidos. De acuerdo con resultados obtenidos en el INIFAP, la determinación de la dosis de cal a aplicar depende del pH inicial del suelo, del nivel de materia orgánica y de la textura del suelo y puede ser estimada en forma directa.

La deficiencia de magnesio y azufre es poco frecuente en los suelos de México. En caso de existir se esperaría en suelos arenosos o ácidos. Para corregir una deficiencia de magnesio es conveniente aplicar dolomita como material de encalado con la cual se neutraliza la acidez y se agrega calcio y magnesio al suelo. Con respecto al azufre, algunos fertilizantes como sulfato de amonio, sulfato de potasio y los polisulfuros de amonio y potasio, lo contienen como componente secundario. El uso continuo de estos fertilizantes ha contribuido al aumento en la disponibilidad de azufre en forma considerable, lo que ha dado como resultado una baja probabilidad de respuesta al azufre.

De los micronutrimentos, es común encontrar deficiencias de hierro y zinc, y con menor frecuencia de manganeso. Normalmente en suelos alcalinos o con bajos contenidos de materia orgánica existe deficiencia de todos o algunos de estos nutrimentos; además, es importante recordar la alta susceptibilidad del sorgo a la deficiencia de hierro, y del maíz y el trigo a la de zinc. Mediante el análisis del suelo con el método DTPA se determina la disponibilidad de estos nutrimentos, y la mejor forma de corregir su deficiencia es a través de aspersiones foliares a lo largo del ciclo del cultivo.

Otra herramienta de diagnóstico de gran utilidad para evaluar el estado nutricional de un cultivo y definir un programa de fertilización es el análisis foliar. Esta herramienta en forma directa integra todas las condiciones en las que se desarrolla la planta: suelo, clima, manejo y las características genéticas del genotipo. Para hacer más

preciso el diagnóstico nutrimental a partir del análisis foliar, se han propuesto varias estrategias; sin embargo, el uso de concentraciones de referencia en una hoja en particular al inicio de floración (en maíz la hoja opuesta al elote, y en trigo y sorgo la hoja bandera) ha permitido utilizar con éxito y en forma extensiva esta técnica de diagnóstico nutrimental.

A la fecha en el INIFAP se ha generado una gran cantidad de información sobre la fertilización de los cultivos, parte de ella contenida en este folleto técnico; sin embargo, es necesario continuar con la investigación sobre los factores que condicionan la respuesta de los cultivos a los fertilizantes con el propósito de lograr mayor eficiencia en el uso de estos insumos de gran importancia para la agricultura de México.

LITERATURA CITADA

- Abruña F., R.W. Pearson y R. Pérez-Escolar. 1975. Respuesta del maíz y del frijol al encalamiento en Oxisoles y Ultisoles de Puerto Rico. *En*: Bornemisza, E. y A. Alvarado (eds.). Manejo de los suelos en América tropical. North Carolina State University. Raleigh, N. C.
- Brady, N.C. and R.R. Weil. 1996. The nature and properties of soils. 11th ed. Prentice Hall, New York. 740 p.
- Campbell, C.R. 2000. Reference sufficiency ranges for plant analysis in the southern region of the United States. Electronic Document. Agronomic Division of the N.C. Department of Agriculture and Consumer Services. 101 p.
- Castellanos, J.Z. and P.F. Pratt. 1981. Mineralization of manure nitrogen-correlation with laboratory indexes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:354-357.
- Castellanos, J.Z. 1986. Evaluación del estiércol de bovino y gallinaza como fuentes de fósforo en el cultivo de alfalfa. *Agric. Téc. Méx.* 12:247-258.
- Castellanos, J.Z. y J. J. Peña-Cabriaes. 1990. Los nitratos provenientes de la agricultura: Una fuente de contaminación de los acuíferos. *Terra*. 8(1): 113-126.
- Castellanos, J.Z., B. Hurtado, S. Villalobos, V. Badillo, P. Vargas y S. A. Enríquez. 2000a. Características físicas y químicas de los suelos del estado de Guanajuato a partir de los análisis de laboratorio del CEBAJ. INIFAP, Campo Experimental Bajío. Informe de Investigación del Proyecto FGP-2000. Celaya, Gto., México. 40 p.
- Castellanos, J.Z., J.X. Uvalle Bueno y A. Aguilar-Santelises. 2000b. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. INCAPA, México. 220 p.
- Castellanos, J.Z. 2004. Manual de producción hortícola en invernadero. 2da. ed. INTAGRI, S.C. 469 p.
- Chapman, H.D. and W.P. Kelly. 1930. The determination of the replaceable bases and bases exchange capacity of soils. *Soil. Sci.* 30:391-406.
- Etchevers, B.J., W. Espinosa y E. Riquelme. 1971. Manual de fertilidad y fertilizantes. 2da. ed. Departamento de Suelos, Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción. Chillán, Chile. 62 p.
- FAO. 1997. Anuario estadístico de fertilizantes. Vol. 47. Roma, Italia.
- Gavi, R.F. 1992. Acid soils in Mexico with potential use of North Carolina natural phosphate. Technical report. Texasgulf CO. Raleigh, N.C. 20 p.
- Haby, V.A., M.P. Russelle and E.O. Skogley. 1990. Testing soils for potassium, calcium and magnesium. p. 181-227. *In*: R.L. Westerman (ed.). Soil testing and plant analysis. SSSA. ASA. Madison, WI. USA.
- Hamilton, M.A., D.T. Westerman and D.W. James. 1993. Factors affecting crop uptake in cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:1310-1315.
- Herman, J.C. 2004. Cómo se desarrolla una planta de maíz. Potash and Phosphate Institute, Edición en Español. Quito, Ecuador. 21 p.
- Hsu, H.H. and H.D. Ashmead. 1984. Effect of urea and ammonium nitrate on the uptake of iron through leaves. *J. Plant Nutr.* 7:291-300.
- <http://www.greenmarkets.pf.com>
- Kunze, G.W. and C.D. Jeffries. 1953. X-ray characteristics of clay minerals as related to potassium fixation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 17:242-244.

- Kuo, S. 1996. Phosphorus. p. 869-919. *In*: D.L. Sparks, *et al* (ed.). *Methods of Soil Analysis, Part 3- Chemical Methods*. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Lindsay, W.L. 1979. *Chemical equilibria in soils*. John Wiley & Sons, New York.
- López, G. V., A. Vásquez H, y J. Ruíz R. 1992. Suelos ácidos del estado de Veracruz. Informe de investigación. INIFAP, Campo Experimental Cotaxtla. Veracruz, Ver., México. 20 p.
- Marschner, H. 1996. *Mineral nutrition of higher plants*. Academic Press. New York. 889 p.
- Martens, D.L. and D.T. Westerman. 1991. Fertilizer applications for correcting micronutrient deficiencies. p. 549-592. *In*: J.J. Mortvedt *et al.* (ed.) *Micronutrient in agriculture*. 2nd. ed. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- McLean, E.O. and M.E. Watson. 1985. Soil measurements of plant available potassium. p. 277-305. *In*: R. D. Munson. (ed.). *Potassium in agriculture*. ASA. CSSA. SSSA. Madison, WI.
- Mora, G.M. 2001. Efectos de sistemas de labranza y rotación de cultivos sobre la recuperación de ^{15}N y de algunas propiedades físicas de un vertisol. Tesis Doctoral. Colegio de Posgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México.
- Mortvedt, J.J. and R.J. Gilkes. 1993. Zinc fertilization. *In*: A. D. Robson (ed.) *Zinc in soils and plants*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Netherlands.
- Mortvedt, J.J., L. Murphy and R.H. Follett. 1999. *Fertilizer technology and application*. Meister Publishing Co. Willoughby, Ohio. 199 p.
- Normandin, V.A., R.O. Miller and J. Kotuby-Amcher. 1998. Modification of the ammonium acetate extraction method for the determination of exchangeable cations in soils. Abstracts of the SSSA ASA National Meeting at Baltimore, MD, USA. 18-22 Oct. 1998.
- Núñez, R. y R.F. Gavi. 1991. El potasio en la agricultura mexicana. *En*: R. Rodríguez *et al.* (eds.). *Memorias del simposio: Uso racional de los fertilizantes en América Latina*. Querétaro, Qro. Fertimex, SMCS, ADIFAL. 6 al 9 de Febrero de 1991. p. 335-362.
- Palma, L.D.J. y Cisneros D.J. 1996. Plan de uso sustentable de los suelos de Tabasco. Fundación Produce Tabasco, A.C. Villahermosa, Tab., México. 116 p.
- PPI/PPIC/FAR. 2002. *Plant Nutrient Use in North American Agriculture*. Potash and Phosphate Institute. Norcross, GA. USA. 116 p.
- Pratt, P.F. 1982. La disponibilidad del nitrógeno, fósforo y potasio en los desechos animales. *En*: Castellanos, J. Z. y J. L. Reyes (eds.). *La utilización de los estiércoles en la agricultura*. IATEM, A.C. Torreón, Coah., México.
- Rasmussen, P.E. and P.P. Kresge. 1986. Plant response to sulfur in the Western United States. p. 357-374. *In*: M.A. Tabatabai (ed.) *Sulfur in agriculture*. American Society of Agronomy. Madison, WI
- Reyes, M.L. 1997. Efectos residuales del cultivo previo de jícama, frijol y maíz sobre el cultivo de trigo variedad Yavaros. Tesis Profesional. Instituto Tecnológico de Celaya. Celaya, Gto., Méx. 76 p.
- Sharpley, A. 2000. Phosphorus availability. p. D18-38. *In*: M. Sumner (ed.) *Handbook of Soil Science*. CRC Press, New York.
- Solís, M.E. y A. Rodríguez G. 2000. Trigo de Riego. Origen, variedades, manejo del cultivo, calidad industrial. INIFAP. Campo Experimental Bajío. Celaya, Gto., México. 139 p. Libro Técnico Núm. 2.
- Stichler, C., M. McFarland and C. Coffman. 2005. Irrigated and dryland grain sorghum production South and southwest Texas. Texas A & M University System. <http://sanangelo.tamu.edu/agronomy/sorghum/b6048.pdf>. 12 p.
- Tisdale, S.L., W.L. Nelson, J.D. Beaton and J.H. Havlin. 1993. *Soil fertility and fertilizers*. 5th ed. Macmillan, New York.
- Toucton, J.T. and F.C. Boswell. 1975. Boron application for corn grown on selected southeastern soils. *Agron. J.* 67:197-200.
- Uvalle, J.X. 1996. El diagnóstico diferencial integral. *Memorias del Congreso Anual de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo*. Cd. Victoria, Tamp. México.
- Uvalle, J.X. y R. Osorio-Alatorre, 1999. Micronutrientes en el cultivo de maíz. *Revista Plantaciones Modernas*. Abril-Junio. 4(2):5-8.
- U. S. Environmental Protection Agency. 1979. *Animal waste utilization on cropland and pastureland*. USDA Utilization Res. Rep. No. 6. (EPA-600/2-059).
- Zetina, L., R.L. Pastrana A., J. Romero M. y J.A. Jiménez C. 2002. Manejo de suelos ácidos para la región tropical húmeda de México. INIFAP, Campos Experimentales Papaloapan y Huimanguillo. 170 p. (Libro Técnico Núm. 10).

AGRADECIMIENTOS

A la SAGARPA, por el financiamiento otorgado para la impresión de este folleto técnico; al M.C. Juan Antonio González, al Dr. Sergio Enríquez y al Dr. José A. Laborde, por la revisión técnica y por sus recomendaciones para mejorarlo; a la M.C. Santa Ana Ríos, al Dr. William Gandoy y a la M.C. Patricia Vargas-Tapia, por la revisión final y la edición del documento. Se extiende un especial agradecimiento al Ing. Francisco López Tostado y al Ing. Eduardo Benítez, por los apoyos que nos brindaron. Finalmente se extiende el agradecimiento al Ing. Tomás Ramírez, por su colaboración en las correcciones del manuscrito.

Estudios de nutrición vegetal de los principales cultivos básicos en México
(Convenio SAGARPA-INIFAP 2004)

Este folleto técnico se terminó de imprimir el día 30 de Septiembre de 2005 en la
Imprenta OCMA de Celaya, Guanajuato y tuvo un tiraje de 20,000 ejemplares

APÉNDICE

NORMA OFICIAL MEXICANA (NOM) NOM-021-SEMARNAT-2000, QUE ESTABLECE LAS ESPECIFICACIONES DE FERTILIDAD, SALINIDAD Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS. ESTUDIOS, MUESTREO Y ANÁLISIS.

Objetivo y campo de aplicación:

La presente Norma es de observancia obligatoria en todo el territorio nacional y tiene por objetivo establecer las especificaciones técnicas de muestreo y análisis de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, a partir de sus características específicas de constitución, formación y distribución.

Procedimientos oficiales para diagnosticar la fertilidad del suelo

1. La determinación del pH del suelo medido en agua (1:2) se realizará a través del método AS-02.
2. El procedimiento para la determinación de materia orgánica del suelo se realizará a través del método AS-07 de Walkley y Black.
3. La determinación del fósforo aprovechable para suelos neutros y alcalinos se realizará a través del método AS-10 por el procedimiento de Olsen y colaboradores.
4. La determinación del fósforo extraíble en suelos neutros y ácidos se realizará a través del método AS-11 por el procedimiento de Bray y Kurtz 1.
5. La determinación de la capacidad de intercambio catiónico y bases intercambiables del suelo se realizará a través del método AS-12 con acetato de amonio. IN pH 7.0.
6. La determinación de micronutrientes (hierro, manganeso, zinc y cobre) disponibles y metales contaminantes (plomo, cadmio y níquel) en el suelo se realizará a través del método AS-14 con DTPA.
7. La determinación de boro en el suelo con azometina-h se realizará a través del método AS-15.
8. La obtención del extracto de saturación se realizará a través del método AS-16 por succión de vacío de la pasta de suelo saturado.