

LOS APORTES DE NITRÓGENO EN LA AGRICULTURA

R. Cárdenas-Navarro¹; J. M. Sánchez-Yáñez²; R. Farías-Rodríguez²; J. J. Peña-Cabriales³

¹Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
Av. Acueducto y Tzintzuntzán, Col. Matamoros. Morelia, Michoacán. C. P. 58240. MÉXICO.
Correo-e: rcarden@zeus.umich.mx (*Autor responsable).

²Instituto de Investigaciones Químico Biológicas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán. C.P. 58000. MÉXICO.

³Laboratorio de Microbiología Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados del IPN-Unidad Irapuato.
Km. 9.6 libramiento Nte. Carr. Irapuato-León Apdo. Postal 629, Irapuato, Guanajuato. C.P. 36500. MÉXICO.

RESUMEN

En las últimas tres décadas, los fertilizantes nitrogenados han contribuido de manera significativa al aumento en la producción de alimentos. El acrecentamiento alcanzado en la producción de muchos cultivos ha superado el incremento en la población. El nitrógeno (N) aportado por estos fertilizantes, es el principal elemento mineral absorbido por las plantas e interviene en procesos fisiológicos esenciales para su crecimiento y desarrollo. Algunas plantas pueden utilizar el nitrógeno atmosférico, a través de su asociación con microorganismos procariotes o diazotróficos, pero la mayoría de los cultivos depende del suministro externo de N vía mineralización de la materia orgánica y adición de fertilizantes, para completar su ciclo de crecimiento. La fuente primaria de N es el nitrógeno atmosférico sometido a un proceso de fijación biológica o industrial. Ambos procesos tienen un costo energético alto. La aplicación de estos fertilizantes se ha venido realizando de manera pletórica bajo la premisa de: "aumento en los aportes, igual a aumento en la producción". Este supuesto ha tenido costos ambientales y económicos considerables, por lo que en la actualidad se trabaja en la búsqueda de estrategias que permitan razonar el aporte de nitrógeno a los cultivos, procurando alcanzar su máximo potencial productivo y preservar el ambiente.

PALABRAS CLAVE ADICIONALES: fertilización, métodos de diagnóstico, N.

NITROGEN CONTRIBUTIONS TO AGRICULTURE

ABSTRACT

For the last three decades, nitrogen fertilizers have contributed in a significant way to increase food production. The increase attained in the production of many crops has surpassed the population increase. Nitrogen (N) provided by these fertilizers is the main mineral element that plants absorb, and it intervenes in essential physiological processes for their growth and development. Some plants can use atmospheric nitrogen, by associating themselves to prokaryotic or diazotrophic organisms, but most crops rely on the external supplementation of N from organic matter mineralization and the addition of fertilizers, so they can complete their growth cycle. The primary source of N is atmospheric nitrogen submitted to a biological or industrial fixation process. Both processes have a high energetic cost. The application of these fertilizers has been taking place in a plethoric way under the premise: "supplement increase, equal to production increase." This assumption has had considerable environmental and economic costs, so, currently, strategies are being developed to allow for a reasonable supplementation of nitrogen to crops; to help crops reach their maximum production potential and, at the same time, preserving the environment.

ADDITIONAL KEY WORDS: fertilization, diagnosis methods, N.

INTRODUCCIÓN

En los últimos veinte años, los avances tecnológicos aplicados a la agricultura han generado un triunfo global: se logró aumentar la producción de los principales productos agrícolas a una tasa superior al aumento de la población mundial durante este período. Así, por ejemplo, la producción de arroz aumentó en 51 %, la de maíz en 49 %

y la de oleaginosas básicas en 122 %, mientras que la población mundial aumentó en 36 %. Por otra parte la superficie cosechada de estos cultivos se incrementó sólo en 6, 11 y 38 %, respectivamente. La producción de hortalizas también aumentó a un ritmo superior al de la población mundial. Por ejemplo, la producción de jitomate, una de las principales especies hortícolas cultivadas en el

mundo, creció en un 88 % y su rendimiento promedio en un 28 % (FAOSTAT, 2001).

En México, la producción de alimentos también creció a un ritmo superior al de la población en las dos últimas décadas. Durante este periodo, la población se incrementó en un 46 %, mientras que la producción del maíz y la del jitomate creció en 52 y 63 %, respectivamente. Estos incrementos están asociados al aumento en los rendimientos, que pasaron, respectivamente, de 1.8 a 2.5 t·ha⁻¹ y de 16.7 a 29.3 t·ha⁻¹, entre 1960 y 1999 (FAOSTAT, 2001).

Entre los principales factores tecnológicos involucrados en el aumento del rendimiento alcanzado en las últimas décadas, se encuentra el uso intensivo de fertilizantes. Mientras que el mejoramiento genético permitió aumentar el potencial de producción de los cultivos, el uso de fertilizantes, junto con el riego y la protección química, permitió la expresión de dicho potencial. Sin fertilizantes, el rendimiento de las variedades o cultivares mejorados sería inferior al de las tradicionales (criollas). Dada esta complementariedad, es difícil separar el efecto de los fertilizantes sobre el rendimiento, del resto de las tecnologías utilizadas. Sin embargo, se estima que aproximadamente el 44 % del incremento en el rendimiento de los cereales, observado entre 1961 y 1990, fue debido al uso de N; este efecto fue mayor en los países en desarrollo (Byrnes y Bumb, 1998). De hecho, éste es el principal elemento mineral utilizado en la fertilización agrícola, y su consumo en la agricultura mundial se incrementó en un 36 % en los últimos veinte años, mientras que el del fósforo (P) aumentó sólo en un 4 % y el de potasio (K) se mantuvo relativamente constante (FAOSTAT, 2001).

Aunque el uso de fertilizantes nitrogenados ha sido uno de los principales promotores del aumento en el rendimiento en la agricultura actual, su utilización implica riesgos de contaminación ambiental, por la lixiviación del N no absorbido hacia aguas subterráneas. Además, su aplicación excesiva conlleva a la degradación de la calidad del suelo por salinidad ("ensalitramiento") y un incremento infructuoso en los costos de producción. De esta manera, los fertilizantes se han convertido en una tecnología que puede propiciar grandes beneficios, cuando se utilizan de manera razonada, pero que al mismo tiempo puede causar severos daños al medio ambiente y pérdidas económicas cuando se usa de forma indiscriminada. Ante esta situación, se hace necesario contar con tecnologías aplicables a la gestión razonada del nitrógeno en los sistemas de producción agrícola, con el fin de hacerlos sustentables, aportando las cantidades mínimas necesarias para alcanzar el máximo rendimiento potencial de los cultivos.

El objetivo de este trabajo es hacer una reflexión sobre la aplicación de fertilizantes nitrogenados en la agricultura moderna, considerando las funciones del N en las plantas

y su disponibilidad en el ambiente, la problemática en torno a los aportes de fertilizantes y las tendencias vanguardistas en el diagnóstico de los niveles en los cultivos, como primer paso para la determinación de los aportes necesarios para el desarrollo óptimo de los cultivos.

EL N Y LAS PLANTAS

Entre los diecisiete elementos esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas el N es considerado el más importante, por ser el que se encuentra en mayor proporción, 1 a 3 % con respecto a su materia seca, dependiendo de la especie, de la etapa fenológica, del órgano, etc. Las funciones del N son de tipo estructural y osmótico. Las primeras son específicas y se relacionan con la síntesis de moléculas esenciales para el crecimiento, como ácidos nucleicos, aminoácidos, proteínas, clorofilas y alcaloides. La función osmótica está asociada al efecto del ión nitrato y a otras formas reducidas del N, en la reducción del potencial hídrico (Ψ_w) de la vacuola, dentro del proceso de osmoregulación (Hopkins, 1995; Jones, 1998; Marschner, 1998; Taiz y Zeiger, 1998; Mengel y Kirkby, 2001). Considerando que el agua es el principal factor limitante del desarrollo de las plantas y que es la única sustancia capaz de integrar el crecimiento y la actividad metabólica a nivel celular, la función del N como agente osmótico, que permite retener al agua en las vacuolas, ha sido considerada tanto o más importante que su función nutrimental (McIntyre, 1997).

El N₂ es el elemento más abundante entre los gases que constituyen la atmósfera (representa el 78 % volumétricamente), sin embargo, se encuentra en forma de gas inerte y no es utilizable directamente por las plantas, cuyas raíces lo absorben principalmente en forma de iones nitrato (NO₃⁻) y amonio (NH₄⁺). La utilización del N₂ atmosférico está restringida a algunos organismos procarióticos. Algunos de estos procariotes tienen la posibilidad de establecer relaciones simbióticas con las plantas, formando nódulos en sus raíces. Estos órganos se especializan en la fijación del N₂ de la atmósfera transformándolo en amoníaco (NH₃), el cual es puesto a disposición de la planta hospedera. En contraparte, la bacteria recibe compuestos carbonados de la planta como fuente de energía. La simbiosis entre las bacterias del género *Rhizobium* y las plantas leguminosas (por ejemplo: frijol, alfalfa, lenteja, etc.) es una de las más estudiadas y presenta un interés agronómico considerable (Barber, 1995; Mishra *et al.*, 1997; Sellstedt, 1997; Mengel y Kirkby, 2001).

En los ecosistemas naturales, las plantas que no establecen simbiosis con organismos diazotróficos dependen del N mineral existente en la rizósfera, proveniente de la mineralización de la materia orgánica, como única fuente de abastecimiento. En los sistemas de producción agrícola, el N proviene, además, del suministro externo en forma de sales fertilizantes. En cualquier caso,

la fuente original es el N_2 atmosférico, sometido a un proceso de fijación biológica o de reducción industrial.

Se estima que anualmente se fijan $200-250 \times 10^6$ t de N. De esta cantidad aproximadamente el 10 % corresponde al N fijado de la atmósfera por descargas eléctricas y radiaciones ultravioletas, además del arrastrado por la lluvia, proveniente de los incendios forestales, la combustión industrial, las emisiones de los vehículos, etc. Un 15 % del total de N_2 fijado, $40-50 \times 10^6$ t, está asociado a la fijación industrial (generalmente mediante el proceso desarrollado por Fritz Haber en 1913) dependiente de combustibles fósiles para el suministro de hidrógeno y de energía; en este proceso se estima que es necesario invertir 1.5 kg de petróleo para obtener 1 kg de N. El 75 % restante, $150-190 \times 10^6$ t de N, corresponde a la fijación biológica de microorganismos procarióticos que poseen el complejo enzimático denominado dinitrogenasa, encargado de catalizar la reducción de N_2 a NH_3 (Hopkins, 1995; Mengel y Kirkby, 2001). En este caso, como en el anterior, el proceso es energéticamente costoso ya que se requieren al menos 16 moléculas de ATP por cada molécula de N_2 reducida. Comparativamente, la fijación de una molécula de CO_2 consume sólo tres moléculas de ATP (Hopkins, 1995; Marschner, 1998; Mengel y Kirkby, 2001).

PRÁCTICA AGRÍCOLA ACTUAL

Aunque la fabricación de fertilizantes nitrogenados tiene un costo energético elevado, su uso en la agricultura mundial se incrementó en un 36 % en los últimos veinte años. Este hecho está asociado al incremento observado en los países subdesarrollados, en donde se reporta un aumento del 122 %, que contrasta con un decremento de 16 % reportado en los países desarrollados (FAOSTAT, 2001). El aumento en el consumo de N en la agricultura puede deberse a los subsidios en los precios de los fertilizantes, que los ha hecho cada vez más accesibles a los productores de bajos recursos y que incrementa la relación beneficio/costo en algunos de los sistemas de producción (Lawlor *et al.*, 2001).

Otro factor fundamental del incremento en el uso del N en la agricultura ha sido la idea generalizada de asociar directamente el aumento del rendimiento con el aumento en los aportes de este elemento. Esta suposición puede estar relacionada con las metodologías utilizadas para la determinación de las cantidades recomendadas de este elemento para un cultivo y una región determinadas. Estas metodologías miden el efecto de una gama de cantidades (o tratamientos) sobre el rendimiento de un cultivo determinado y, mediante un análisis de efectos marginales, seleccionan la cantidad con mayor efecto económico en el rendimiento. Sin embargo, en la práctica es común encontrar que las cantidades recomendadas son ampliamente superadas por los aportes realizados por los agricultores. Por ejemplo, en el caso de la fresa, las

cantidades de fertilización nitrogenada recomendada para la región de Zamora, Michoacán, principal zona de producción de este cultivo en el país, es de $240 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de nitrógeno (Machuca, 1998) y el aporte que realiza la mayoría de los agricultores supera ampliamente los $600 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de nitrógeno (comunicación personal con productores de la región).

La ineficacia de las cantidades determinadas por un análisis como el indicado en el párrafo precedente, tiene su origen en la variación de los factores climáticos. En efecto, el rendimiento final de un cultivo no es producto solamente de la disponibilidad de N en el suelo, sino también de otros factores como son los demás elementos esenciales, la luz, la temperatura, la humedad relativa, etc. La variación espacial y temporal de estos factores da como resultado que las cantidades óptimas, calculadas para un cultivo en un lugar y en un tiempo determinados, no produzcan el mismo resultado de un año a otro y mucho menos de un lugar a otro.

AGRICULTURA DE PRECISIÓN

En algunos países, principalmente desarrollados, está emergiendo una nueva tecnología aplicada al manejo de los sistemas de producción agrícola. Esta tecnología, denominada Agricultura de Precisión, involucra el mapeo intensivo de las características del suelo y el seguimiento del cultivo con métodos de manejo computarizado de datos, Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) y Sistemas de Información Geográfica (GIS), para la determinación de las densidades de siembra, así como de las cantidades y de la frecuencia de aplicación de pesticidas y de fertilizantes, en áreas tan pequeñas como 0.2 a 0.5 ha. Se espera que el manejo específico de áreas de estas dimensiones, según sus características particulares, permita el aumento en la producción, minimizando los insumos. El impacto de esta nueva tecnología en la producción podría ser similar o superior al que tuvo la mecanización agrícola durante el siglo pasado (Byrnes y Bumb, 1998).

La implementación adecuada de esta nueva tecnología requiere la generación previa de modelos matemáticos que permitan diagnosticar el estado del cultivo en función de variables de fácil acceso. En el caso específico del diagnóstico del estado nitrogenado, como punto clave para determinar los aportes de nitrógeno, se pretende realizar su determinación de manera indirecta mediante el uso de sensores remotos, los cuales permiten hacer mediciones radiométricas de la reflectancia y la transmitancia de las superficies vegetales. Estos sensores pueden estar localizados a unos cuantos metros sobre el dosel del cultivo, o ser transportados por aviones, helicópteros o satélites. Sin embargo, hasta hoy no se ha obtenido una relación confiable que permita la determinación del estado nitrogenado de los cultivos. Los

principales problemas encontrados son que el N no absorbe la radiación electromagnética por sí mismo, sino asociado a átomos como C, H, y O; que la reflectancia y la transmitancia no son sensibles a la concentración, sino al contenido por unidad de área foliar de las moléculas absorbentes; que las proteínas, que podrían ser las moléculas idóneas para indicar la concentración de N, no están presentes en concentraciones adecuadas en las hojas (de cultivos extensivos) y sus propiedades de absorción son débiles y poco específicas entre especies y que no se ha establecido ninguna relación confiable entre caracteres visibles radiométricamente, como el contenido de clorofila o de materia seca de las hojas y el contenido en proteínas (o N). Por lo anterior, no obstante las ventajas de una técnica de diagnóstico como ésta, su implementación en la producción agrícola requiere un mayor estudio (Baret y Fourty, 1997).

CURVA DE NITRÓGENO CRÍTICO

Un método de diagnóstico que ha dado mejores resultados y que en la actualidad constituye la base de los programas de fertilización nitrogenada en cultivos extensivos en algunos países europeos, se generó a partir de los trabajos desarrollados independientemente por dos grupos de investigación en Lusignan, Francia y Wellesbourne, Inglaterra. Estos trabajos han dado lugar a la formulación de relaciones entre la dinámica de acumulación de biomasa y de N. Estas relaciones muestran la disminución del contenido en N en la materia seca de la planta a lo largo del ciclo de desarrollo, aún en condiciones de disponibilidad externa de N no limitada, por lo que han sido llamadas relaciones de dilución. Este modo de representación tiene la virtud de eliminar la influencia del ambiente. La absorción de N por el cultivo de festuca (*Festuca rubra*) sembrada en primavera, es extremadamente variable de un año a otro, cuando se grafica en función del tiempo (Figura 1A); pero, la variabilidad entre los años desaparece (Figura 1B) si la absorción es representada en términos de porcentaje de N acumulado con respecto al crecimiento en biomasa (Lemaire y Salette, 1984; Lemaire y Gastal, 1997).

La disminución del contenido de N en la materia seca, asociada a su movilidad en la planta y a su exportación de los órganos senescentes hacia las regiones en estado de crecimiento activo (Caloin y Yu, 1984), es formalizada matemáticamente por la ecuación exponencial

$N\% = a(W)^{-b}$, en donde W es el peso de la biomasa

aérea expresado en $t \cdot ha^{-1}$ y $N\%$ es la concentración de N expresada en porcentaje de la materia seca. Esta ecuación puede ser expresada en términos de acumulación de materia

seca aérea: $N_{upt} = (10) \cdot a(W)^{1-b}$, en donde N_{upt} está dado en $kg \cdot ha^{-1}$ de N; el coeficiente a indica la cantidad de

N en $kg \cdot ha^{-1}$ acumulado cuando la biomasa del cultivo es $1 t \cdot ha^{-1}$ y el coeficiente $1-b$ corresponde a la relación entre la velocidad relativa de acumulación de N (dN/Ndt) y la velocidad relativa de acumulación de biomasa (dW/Wdt) (Lemaire y Salette, 1984; Lemaire y Gastal, 1997; Lemaire *et al.*, 1997).

En los últimos años estas relaciones han sido establecidas en un buen número de especies, como algunos pastos, alfalfa, trigo, arroz, maíz, sorgo, etc., lo cual permitió diferenciar dos grandes grupos de plantas en función del valor de los parámetros utilizados por el modelo ajustado (Lawlor *et al.*, 2001). Estos grupos corresponden a los tipos C3 y C4, lo que refleja las diferencias que existen en la vías metabólicas de asimilación del CO_2 en estos dos tipos de plantas, siendo $N\% = 5.7 \cdot W^{-0.5}$ para plantas C3 y $N\% = 4.1 \cdot W^{-0.5}$ para plantas C4 (Greenwood *et al.*, 1990).

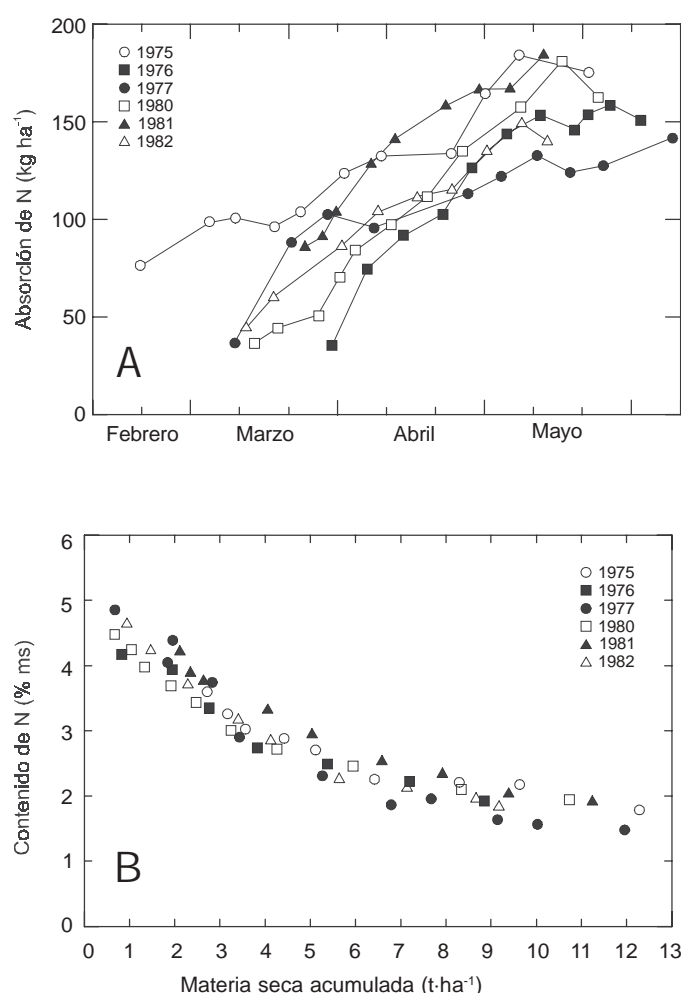


FIGURA 1. Festuca (*Festuca rubra*) sembrada en primavera, en condiciones de disponibilidad de nitrógeno (N) no limitante. A). Dinámica de la absorción de N. B). Disminución del contenido en N (%) con el aumento en la biomasa. Tomado de (Lemaire y Salette, 1984).

A partir de las relaciones de dilución observadas a varias concentraciones de N, se estableció la curva de contenido crítico, que representa el contenido mínimo de N necesario para alcanzar un máximo crecimiento, en cualquier fase de desarrollo del cultivo (Justes *et al.*, 1994). Esta relación permite el diagnóstico del estado nitrogenado del cultivo en cualquier fase fenológica, en función de su biomasa seca, y ofrece la posibilidad de estimar los aportes en caso necesario.

Estos estudios han sido realizados casi exclusivamente en especies de tipo forrajero caracterizadas por presentar un dosel cerrado. Su aplicación a cultivos hortícolas, con arreglos topológicos en surcos o en hileras, apenas comienza a ser explorada (Adamowicz *et al.*, 1997; Le Bot *et al.*, 1997; Le Bot *et al.*, 1998). El estudio y adaptación de estos conceptos a la producción hortícola, que es la principal demandante de fertilizantes en el subsector agrícola, permitirá maximizar la producción, disminuyendo los aportes de N y preservar el medio ambiente.

NITRATO EN EL JUGO PECIOLAR

Con el objetivo de desarrollar una técnica de diagnóstico del estado nitrogenado, rápida y aplicable *in situ*, en años recientes se ha utilizado el análisis de la concentración del ión nitrato en el jugo peciolar de las plantas, como indicador del estado nitrogenado de los cultivos (Darby *et al.*, 1986; Scaife y Turner, 1987; Justes *et al.*, 1997). Actualmente, esta técnica es comúnmente recomendada por asesores técnicos de cultivos hortícolas e incluso se han diseñado sencillos dispositivos colorimétricos para la determinación de la concentración del nitrato en campo. Sin embargo, sus bases teóricas no son claras (Cárdenas-Navarro *et al.*, 1999). En primer lugar, el jugo obtenido del pecíolo contiene líquido celular de diversos tejidos; esto hace que la concentración del nitrato determinada no sea exclusiva del xilema, tejido vascular responsable de transportar el nitrato de la raíz a la parte aérea de la planta (Justes *et al.*, 1997). En segundo lugar, la estimación de la concentración del nitrato representa el cociente de la cantidad de iones nitrato diluida en el volumen de líquido que los contiene. El nitrato corresponde al soluto y el jugo peciolar, asociado al contenido de agua de la planta, es equivalente al solvente de una solución común. Estas dos variables, soluto y solvente, son muy sensibles a la variación de la luz y de la humedad relativa, lo cual provoca una fuerte variación de la concentración medida. Por ejemplo, Cárdenas-Navarro *et al.* (1998) reportaron oscilaciones del 20 % del contenido de agua durante el ciclo día-noche, en jitomate cultivado en una cámara con condiciones climáticas estables. Por lo tanto, es de esperar que las variaciones sean mayores en campo. Por lo anterior, las lecturas obtenidas por este método, deben ser tomadas con precaución, ya que pueden reflejar

las variaciones climáticas y no el estado nitrogenado de las plantas. Antes de recomendar su aplicación en la producción agrícola, sería necesario realizar un estudio comparativo con la curva de N crítico, cuya validez es ampliamente aceptada. Esto permitiría normalizar el método y establecer valores de contenido crítico en nitrato, para usarlos como puntos de referencia durante el diagnóstico.

CONCLUSIONES

Los aportes de nitrógeno a la agricultura han sido un factor determinante para lograr el incremento que se ha observado en las últimas décadas en la producción de alimentos. Sin embargo, aunque en la actualidad la función del N como elemento esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas ha sido esclarecida a nivel molecular (Hopkins, 1995; Lawlor *et al.*, 2001; Mengel y Kirkby, 2001), en la práctica agrícola en general y en la hortícola en particular, generalmente se emplean cantidades muy superiores a las requeridas por los cultivos, con una eficiencia de recuperación (*i.e.* cantidad absorbida / cantidad aportada x 100) frecuentemente menor al 50 % (Wiesler, 1998), dependiendo del tipo de suelo y del cultivo. El uso excesivo de fertilizantes nitrogenados lleva asociados problemas cada vez más graves de incremento en los costos de producción y de contaminación ambiental, por lo que se hace necesario contar con tecnologías que permitan aportar las cantidades mínimas para alcanzar los máximos rendimientos. En este sentido, los modelos de absorción de N de los cultivos en función del clima y los métodos de diagnóstico de su estado nitrogenado, aparecen como una opción para hacer un uso más eficiente de los fertilizantes nitrogenados. Es necesario generalizar el uso de estas técnicas con el fin de producir de manera sostenible.

LITERATURA CITADA

- ADAMOWICZ, S.; LE BOT, J.; ROBIN, P. 1997. Modelling plant nutrition of horticultural crops: a review. *Scientia Horticulturae* 74: 47-82.
- BARBER, S. A. 1995. Soil Nutrient Bioavailability : A Mechanistic Approach. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA. 413 p.
- BARET, F.; FOURTY, T. 1997. Radiometric estimates of nitrogen status of leaves and canopies, pp. 201-226. *In: Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. LEMAIRE, G. (ed.). Springer-Verlag. Berlin, Germany.
- BYRNES, B. H.; BUMB, B. L. 1998. Population growth, food production and nutrient requirements, pp. 1-27. *In: Nutrient Use in Crop Production*. RENGEL, Z. (ed.). Food Products Press. Binghamton, USA.
- CALOIN, M.; YU, O. 1984. Analysis of the time course of changes in nitrogen content in *Dactylis glomerata* L. using a model of plant growth. *Annals of Botany* 54: 69-76.
- CÁRDENAS-NAVARRO, R.; ADAMOWICZ, S.; ROBIN, P. 1998. Diurnal nitrate uptake in young tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) plants: test of a feedback-based model. *Journal of Experimental Botany* 49: 721-730.

- CÁRDENAS-NAVARRO, R.; ADAMOWICZ, S.; ROBIN, P. 1999. Nitrate accumulation in plants: a role for water. *Journal of Experimental Botany* 50: 613-624.
- DARBY, R. J.; WIDDOWSON, F. V.; BIRD, E.; HEEWITT, M. V. 1986. The relationship of soil mineral NO_3^- N with stem NO_3^- N concentration and fertilizer-N with the amount of nitrogen taken up by winter wheat, in experiments testing nitrogen fertilizer in combination with aphicides and fungicides, from 180 to 1982. *Journal of Agricultural Science* 106: 497-507.
- FAOSTAT. 2001. Statistical databases, <http://apps.fao.org>. acceso en Noviembre, 2001.
- GREENWOOD, D. J.; LEMAIRE, G.; DRYCOTT, A.; MILLARD, P.; NEETESON, J. J. 1990. Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass. *Annals of Botany* 67: 207-212.
- HOPKINS, W. G. 1995. *Introduction to Plant Physiology*. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA. 464 p.
- JONES, J.B. 1998. *Plant Nutrition Manual*. CRS Press. LLC. Boca Raton, USA. 149 p.
- JUSTES, E.; MARY, B.; MAYNARD, J.M.; M., M.J.; THELIER-HUCHÉ, L. 1994. Determination of critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Annals of Botany* 74: 397-407.
- JUSTES, E.; M., M. J.; MARY, B.; PLÉNET, D. 1997. Diagnosis using stem based extract: JUBIL method, pp. 163-187. *In: Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. LEMAIRE, G. (ed.). Springer-Verlag. Berlin, Germany.
- LAWLOR, D.; LEMAIRE, G.; GASTAL, F. 2001. Nitrogen and yield, pp. 343-367. *In: Plant Nitrogen*. LEA, P. J.; MOROT-GAUDRY, J. F. (eds.). Springer-Verlag-INRA. Berlin, Germany.
- LE BOT, J.; ADAMOWICZ, S.; ROBIN, P. 1998. Modelling plant nutrition of horticultural crops: a review. *Scientia Horticulturae* 74: 47-82.
- LE BOT, J.; ANDRIOLO, C.; GARY, C.; ADAMOWICZ, S.; ROBIN, P. 1997. Dynamics of N accumulation and growth of tomato plants in hydroponics: an analysis of vegetative and fruit compartments, pp. 37-51. *In: Diagnosis Procedures for Crop N Management*. LERMAIRE, G.; BURNS, I. G. (eds.). INRA. Poitiers, France.
- LEMAIRE, G.; GASTAL, F. 1997. N uptake and distribution in plant canopies, pp. 3-43. *In: Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. LEMAIRE, G. (ed.). Springer-Verlag. Berlin, Germany.
- LEMAIRE, G.; GASTAL, F.; PLÉNET, D. 1997. Dynamics of nitrogen uptake and N distribution in plant canopies, pp. 15-29. *In: Diagnosis Procedure for Crop N Management*. LEMAIRE, G.; BURNS, I. G. (eds.). INRA. Poitiers, France.
- LEMAIRE, G.; SALETTE, J. 1984. Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I. Étude de l'effet du milieu. *Agronomie* 4: 431-436.
- MACHUCA, G. M. 1998. El cultivo de la fresa (*Fragaria x ananassas* Duch.). SAGARPA. Zamora, Michoacán, México. 10 p.
- MARSCHNER, H. 1998. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2nd Edition. Academic Press Inc. San Diego, USA. 889 p.
- MCINTYRE, G.I. 1997. The role of nitrate in the osmotic and nutritional control of plant development. *Australian Journal of Plant Physiology* 68: 107-112.
- MENGEL, K.; KIRKBY, A. 2001. *Principles of Plant Nutrition*. 5th Edition. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands. 849 p.
- MISHRA, S. N.; JAIWAL, P. K.; RANA, P. S.; SRIVASSSTAVA, S. H. 1997. Rhizobium-Legume Association, pp.45-102. *In: Nitrogen Nutrition and Plant Growth*. SRIVASTAVA, H. S.; RANA, P.S. (eds.). Science Publishers, Inc. Enfield, USA.
- SCAIFE, A.; TURNER, M.K. 1987. Field measurements of sap and soil nitrate to predict nitrogen top-dressing requirements of brussels sprout. *Journal of Plant Nutrition* 10: 1705-1712.
- SELLSTEDT, A. 1997. Physiology of nitrogen-fixing Casuarina-Frankia symbiotic association. pp. 173-204. *In: Nitrogen Nutrition and Plant Growth*. SRIVASTAVA, H. S.; RANA, P. S. (eds.). Science Publishers, Inc. Enfield, USA.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. 1998. *Plant Physiology*. Sinauer Associated, Inc. Sunderland, USA. 792 p.
- WIESLER, F. 1998. Comparative assessment of the efficacy of various nitrogen fertilizers, pp. 81-114. *In: Nutrient Use in Crop Production*. RENGEL, Z. (ed.). Food Products Press. Binghamton, USA.