



**Universidad Agraria de la Habana (UNAH)**  
**Ministerio del Azúcar de Cuba (MINAGRI)**  
**Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA)**

**BASES DE CONOCIMIENTOS PARA GENERAR MODELOS  
PREDICTIVOS DE RESPUESTA A LOS FERTILIZANTES  
NITROGENADOS EN AGROECOSISTEMAS CAÑEROS**

**Tesis presentada en opción al título académico de  
Maestro en Ciencias del Suelo**

**Autor: Ing. Elio Rodríguez de la Torre**

**Ciudad de la Habana  
Abril, 2002**



**Universidad Agraria de la Habana (UNAH)**  
**Ministerio del Azúcar de Cuba (MINAGRI)**  
**Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA)**

**BASES DE CONOCIMIENTOS PARA GENERAR MODELOS  
PREDICTIVOS DE RESPUESTA A LOS FERTILIZANTES  
NITROGENADOS EN AGROECOSISTEMAS CAÑEROS**

**Tesis presentada en opción al título académico de  
Maestro en Ciencias del Suelo**

**Autor: Ing. Elio Rodríguez de la Torre**

**Tutor: Dr.C Mario E. de León Ortiz**

**Ciudad de la Habana  
Abril, 2002**

## DEDICATORIA

A la abuela María, siempre presente

A mis padres y hermana

A mi hijo y esposa

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Revolución Cubana; por brindarme la oportunidad de formarme como profesional y aportar mis modestos esfuerzos en la construcción de una sociedad justa y verdadera.

Al Dr. C. Rafael Villegas Delgado; por confiar siempre en mí.

A mi tutor; Dr. C. Mario E. de León Ortiz, por su motivante ejemplo en la constancia y dedicación al trabajo.

A los investigadores, especialistas y técnicos del Departamento de Suelos y Agroquímica del INICA, pues sin su consecuente trabajo en las últimas tres décadas, no sería posible la presentación de esta tesis.

A todos aquellos colegas y amigos que me han ayudado y apoyado en la realización del presente trabajo de tesis.

## SÍNTESIS

Perfeccionar los criterios para el cálculo de las dosis de nitrógeno en el cultivo de la caña de azúcar, sobre la base de conocimientos alcanzados y la información, que al respecto ha acumulado el INICA en las últimas tres décadas, motivaron la realización de esta tesis. Mediante la utilización de modelos predictivos de repuesta se generaron recomendaciones más exactas, donde las variables que los integran manifestaron su correspondencia con el efecto de los fertilizantes sobre la caña de azúcar. Paralelamente se gestó un procedimiento metodológico con alcance para la determinación de dosis de cualquier nutrimento, comprendiendo no sólo la obtención de los modelos de respuesta sino además el análisis económico y de riesgo de la misma. El estudio contó con una amplia base de datos contentiva de los resultados de 291 experimentos de campo, a los que se les efectuaron 1747 cosechas. El procedimiento para la estimación de las dosis comprendió la selección y determinación de las variables y condiciones que intervienen en la respuesta, seguido por la modelación de las dosis de nitrógeno en función de la calibración de los factores modificadores. En la evaluación económica de las recomendaciones se asumió el valor presente neto (VPN) como el indicador económico integrador, definiéndose cuál es el incremento del rendimiento a partir del cual una dosis es redituable. Los fundamentos para la evaluación del riesgo de la respuesta comprendieron el cálculo de las probabilidades para diferentes intervalos de incrementos de producción. De acuerdo al procesamiento efectuado, al análisis de la información y los resultados obtenidos, se asumió que los criterios para la fertilización nitrogenada en la caña de azúcar deben sustentarse en la cepa, el rendimiento esperado y en circunstancias del suelo relacionadas con la capacidad de mineralización de la materia orgánica y las pérdidas de nitrógeno del sistema, por lavado o volatilización a la atmósfera.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos .....	2
<b>2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>3</b>
2.1 El uso de los fertilizantes en la agricultura .....	3
2.2 Evolución de los criterios para la fertilización de la caña de azúcar en Cuba, después de 1959. ....	4
2.3 Uso de modelos matemáticos para la predicción de la respuesta de los cultivos a los fertilizantes .....	6
Modelos generales de fertilidad del suelo .....	7
Modelo Discontinuo Rectilíneo .....	9
Rendimiento Máximo Estable .....	10
Rendimiento Relativo .....	11
Fundamentación agronómica para el uso de los modelos discontinuos rectilíneos..	11
2.4 NITRÓGENO (N) .....	13
2.4.1 Mineralización e Inmovilización del N.....	13
2.4.2 Balance del N en el agroecosistema con caña de azúcar .....	14
Exportación del N por la cosecha .....	14
Quema de la caña para la cosecha .....	15
Desnitrificación .....	15
Volatilización .....	15
Lavado .....	16
Erosión .....	17
2.4.3 Ganancias.....	17
Fijación biológica del N atmosférico.....	17
Aporte del N por las lluvias .....	18
2.5 Factores relacionados con la fertilización nitrogenada en caña de azúcar .....	19
Relación N-variedad .....	19
Influencia de la cepa.....	20
Fuentes portadoras de N .....	21

Condiciones del suelo.....	21
Influencia de la lluvia .....	22
Nivel de rendimiento.....	22
2.6 Fundamentos metodológicos para la evaluación y diagnóstico de la fertilidad de los suelos tropicales .....	23
Criterios para la formulación de dosis de fertilizantes .....	24
2.7 Agrupamiento agroproductivo de los suelos dedicados a la producción de caña de azúcar.....	28
2.8 Métodos más usados para diagnosticar las necesidades de fertilizantes nitrogenados.....	29
2.8.1 Métodos que emplean directamente a la planta.....	29
Ensayos de campos .....	29
Análisis de tejido vegetal .....	30
2.8.2 Métodos que emplean la planta indirectamente .....	30
Análisis de muestras de suelos .....	30
La materia orgánica, el N total e hidrolizable.....	31
Consideraciones económicas en el manejo de los fertilizantes.....	32
<b>3. MATERIALES Y METODOS.....</b>	<b>35</b>
3.1 Descripción de los análisis químicos realizados.....	35
3.2 Procedimiento utilizado .....	36
3.2.1 Preparación de la base de datos .....	36
3.2.2 Procedimiento para la estimación de las dosis.....	39
3.2.3 Fundamentos para la evaluación económica de las recomendaciones.....	39
3.2.4 Fundamentos para la evaluación del riesgo de la respuesta.....	42
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>43</b>
4.1 Factores relacionados con la fertilización nitrogenada .....	45
Los factores cepa y suelo .....	45
El factor materia orgánica del suelo .....	48
El factor lluvia .....	50
El factor variedad.....	51
La reacción del suelo (pH).....	52
El factor rendimiento (RME) y el valor A.....	53
El factor edad.....	55

4.2 Modelo para la estimación de las dosis de nitrógeno .....	56
4.3 Evaluación económica .....	59
4.4 Riesgo de la respuesta .....	62
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>64</b>
5.1 Conclusiones .....	64
5.2 Recomendaciones .....	65
<b>6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>66</b>



## 1. INTRODUCCIÓN

Entre los disímiles factores externos que influyen sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas cultivables, el suministro de nutrimentos a través de la fertilización, es una de las actividades que con mayor facilidad el hombre puede controlar (León *et al*, 1997). El uso de los abonos está estrechamente vinculado a la necesidad de incrementar o mantener los rendimientos a un nivel alto, así como a la conservación de los elementos nutricios asimilables presentes en el suelo, factor íntimamente asociado a la sostenibilidad y la rentabilidad de los procesos productivos (Villegas, 1999).

El cultivo industrial de la caña de azúcar, debido a su gran extensión, comprende suelos de variadas características y propiedades, físicas y químicas, bajo diferentes condiciones climáticas, sometidos al monocultivo y a notables extracciones de nutrimentos con las cosechas, que es conveniente restituir, además la fertilización racional y científica de la caña de azúcar juega un papel importante en el mantenimiento y elevación de los rendimientos agrícolas, aspecto necesario para consolidar y desarrollar la producción azucarera (León, 1990). Investigaciones realizadas en experimentos de campo, muestran incrementos del rendimiento agrícola entre 10 y 15 %, y en algunos suelos hasta 30 % (Reynoso, 1878; Alonso, 1916; Humbert 1968; Alomá 1973; Cuellar 1980; León, 1990; Terry, 2002). La utilización de los fertilizantes nitrogenados está presente en la mayoría de los cultivos y condiciones edafoclimáticas del país, pues a pesar de los altos precios con que hoy se cotizan, su aplicación racional incrementa en forma notable el rendimiento, haciendo redituable su uso. Así el país continúa invirtiendo cada año cuantiosos recursos financieros en la adquisición de fertilizantes nitrogenados. La mayor o menor utilidad que se alcance con esa inversión dependerá en gran medida de la capacidad de los agrónomos para manejar los numerosos factores que determinan la necesidad de nitrógeno en el cultivo de la caña de azúcar.

El uso racional de los fertilizantes nitrogenados no sólo es de importancia económica, sino también ambiental, ya que el destino que sigue el nitrógeno no aprovechado por el sistema suelo-planta causa contaminación de las aguas y la atmósfera, elevando el contenido de nitratos del manto freático y otras fuentes de abasto de agua, contribuyendo al efecto invernadero y deterioro de la calidad de la capa de ozono.

Como consecuencia del desarrollo científico-técnico alcanzado en las investigaciones sobre el uso y manejo de los fertilizantes minerales en Cuba por el INICA, universidades y

otros centros de investigación, se encauzan resultados y esfuerzos dirigidos a optimizar los criterios y fundamentos para la aplicación de los nutrimentos, conformes con los actuales requerimientos económicos y ambientales del sector agroindustrial azucarero. Los imperativos de la agricultura sobre bases sostenibles imponen el conocimiento preciso de las necesidades nutricias de la caña de azúcar. Resulta así innegable que el sistema nacional de recomendaciones de fertilizantes no puede ser estático, requiere de constante actualización y perfeccionamiento, acorde con el desarrollo de sus bases científicas, nuevos métodos de monitoreo de procesos y enfoque multidisciplinario. Por otra parte, en la actualidad se dispone de una gran base de datos con más de mil cosechas de experimentos de nitrógeno, acumuladas en los últimos 30 años, así como de adecuados sistemas de cómputo, que permiten el manejo de gran cantidad de información. Existe pues la necesidad y los medios para satisfacerla.

De esta forma los objetivos propuestos para la presente tesis son los siguientes:

### **1.1 Objetivo general**

- Perfeccionar los criterios para el cálculo de las dosis de nitrógeno en el cultivo de la caña de azúcar, sobre la base de los conocimientos alcanzados y la información que al respecto ha acumulado el INICA en las últimas tres décadas.

### **1.2 Objetivos específicos**

§ Integrar las bases actuales para la fertilización nitrogenada mediante la obtención de modelos predictivos de repuesta que permitan generar recomendaciones eficientes.

§ Establecer procedimiento metodológico para el cálculo de las cantidades de fertilizantes nitrogenados para la caña de azúcar, comprendiendo el análisis económicos y de riesgo de la respuesta.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 El uso de los fertilizantes en la agricultura

La práctica de aplicar a los campos abonos de origen vegetal provenientes de cenizas, huesos, desperdicios, estiércol y otros data de tiempos remotos. En La Odisea, de Homero, se habla del abono con estiércol a las viñas del padre de Ulises. Xenofontes (430-335 a.n.e), refería el enterrado de las plantas verdes como medio de enriquecer al suelo.

Boussigault y Payen (1841), señalaron la presencia de nitrógeno en el humus, así como la intervención de los microorganismos en la nutrición nitrogenada. Los principios enunciados por Liebig y los trabajos seguidos por Boussingault, Lawes y Gilbert junto a los estudios experimentales en Rothamsted, influyeron considerablemente en el desarrollo de la agricultura moderna, inició la era de los abonos químicos.

Carabia (1937), hizo referencia a trabajos publicados entre los años 1851-1859 realizados por Casaseca, relacionando la producción cañera de un ingenio en una zafra con los fertilizantes aplicados, Theye analizó tierras plantadas con caña de azúcar, De Adan estudió los elementos nutricios necesarios para el cultivo, Zayas y Decamps publicaron sobre la fertilizaron de la gramínea, Engels, Carbome e Izaguirre expusieron la importancia del empleo científico de los nutrientes, su producción y el uso práctico en la agricultura.

El eminente científico cubano Don Álvaro Reynoso, consideró necesario «indagar sobre los abonos propios para que la caña se desarrolle con mayor vigor, aumentando la proporción de azúcar que puede producir, en que cantidad es más útil usarlos, teniendo en cuenta las propiedades físicas del terreno y su composición química, en que épocas del año y en que momento del crecimiento es más beneficioso su uso, inquiriendo además si conviene o no repetir a menudo su introducción en la tierra» (Reynoso, 1867; Reynoso, 1878).

Algo más tarde Beauchamp y Lazo (1937), detallaron que los análisis de suelos, en aquel entonces, sólo revelaban la presencia o no de los nutrimentos, sin considerar su solubilidad y disponibilidad en el terreno, mientras que los análisis del jugo indicaban el

nivel de asimilación y absorción por la caña de azúcar, enfatizando además en la importancia de los ensayos de campo para demostrar la capacidad de respuesta por la planta ante las aplicaciones de fertilizantes. Estos autores reconocieron la importancia del conocimiento del suelo para lograr el establecimiento de prácticas agronómicas adecuadas, en relación con el abonado y la adaptación de las variedades.

A mediados de la segunda mitad del siglo pasado, numerosos investigadores concluían que los criterios para realizar el cálculo de las cantidades de fertilizantes a aplicar a la caña de azúcar consistían en: conocer la fertilidad de los campos a través de los análisis de suelos, realizar determinaciones químicas en los jugos de la caña, considerar el rendimiento agrícola a obtener así como las ventajas de hacer valoraciones visuales y analíticas de las hojas, además de la trascendencia de plantar experimentos de campos que permitieran conocer el efecto de las fórmulas y cantidades de abonos más económicas a emplear (Beauchamp, 1947; Samuels y Capó, 1956; Colwell, 1967).

### **2.2 Evolución de los criterios para la fertilización de la caña de azúcar en Cuba, después de 1959.**

Al triunfo de la Revolución se contaba con una reducida información experimental acerca de la aplicación de fertilizantes en caña de azúcar. Se conocía de algunos experimentos de campos plantados en la costa norte de la provincia de Holguín, pertenecientes a la áreas cañeras de los ingenios Preston y Boston (hoy CAI Nicaragua y CAI Guatemala respectivamente) conducidos por investigadores de la antigua Estación Experimental de Caña de Azúcar de Mayarí, (hoy EPICA Holguín) dedicada básicamente, en aquel entonces, a la obtención de variedades más que a la experimentación en el uso de los abonos. Durante el período 1951-1960 el empleo de fertilizantes estuvo localizado fundamentalmente en el occidente del país, se usaron cantidades muy bajas, apenas unas 80 mil t, que se aplicaban sin tener en cuenta la composición del suelo ni otras circunstancias.

A mediados de los años 70 se publicó el mapa básico de suelos de Cuba escala 1: 50 000, dando inicio a una nueva etapa en los estudios edafológicos de variados agroecosistemas, incluyendo el de caña de azúcar, lo que significó un salto cualitativo en los métodos de diagnóstico y evaluación de la fertilidad de los suelos, al tiempo que sirvieron como base para elaborar recomendaciones de fertilizantes para el servicio

agroquímico, en el que se consideraron criterios como: los análisis de suelos, resultados de las estaciones experimentales, rendimiento esperado, métodos de aplicación y efectos económicos entre otros (MINAZ, 1988).

Hasta 1974, se aplicaron dosis fijas de fertilizantes, una para las cepas de planta y otra para los retoños, en cantidades que fluctuaron alrededor de 149 kg/ha para los portadores nitrogenados y 298 kg/ha para fórmula completa (7,5-6-18), asumiendo exclusivamente el número de cortes realizado a la plantación, sin considerar el tipo de suelo, sus contenidos y formas de nutrimentos, rendimientos agrícolas y resultados experimentales (Pineda, 2000). Los procedimientos técnicos para el uso y manejo de los fertilizantes en caña de azúcar en Cuba, aparecieron por primera vez en forma de metodología en el año 1976, como resultado de los trabajos realizados por el Ministerio de la Agricultura, con la consecuente asesoría técnica de especialistas provenientes la extinta Unión Soviética.

Como resultado de un acercamiento progresivo a las necesidades reales de los campos de producción, el MINAZ dispuso en los primeros años de 1980, de sus primeras recomendaciones de fertilizantes para la caña de azúcar, pudiendo integrar diferentes elementos en un sistema de reportes de salida que comprendía las variables: tipos de suelos, rendimiento, cepas, lluvia caída y contenido de los nutrientes en el suelo (López, 1981). En 1986, se integraron conocimientos y experiencias mediante la generalización de los resultados obtenidos por el INICA y otros centros de investigación, elaborándose una nueva metodología que estuvo vigente hasta 1993. En esta ocasión se ampliaron los criterios para recomendar dosis de nitrógeno atendiendo a las condiciones de hidromorfía y compactación del suelo, así como el manejo de este elemento a nivel predial (Villegas *et al*, 1993).

La consecuente actualización del sistema nacional de recomendaciones de fertilizantes, ha permitido aplicar dosis cada vez más precisas, de acuerdo al grado de información disponible en cada momento, fundamentalmente el obtenido por la red permanente de experimentos de larga duración del INICA, la que abarca los más variados y representativos agroecosistemas cañeros del país.

Las anteriores recomendaciones para el uso de los fertilizantes minerales en el cultivo de la caña de azúcar en Cuba fueron el resultado de trabajos locales, generalizaciones y tesis de grados, realizadas por investigadores del Departamento de Suelos y Agroquímica del INICA, universidades y otros centros de investigación del país. Todos estos estudios

tuvieron en mayor o menor grado un carácter local o regional y para los mismos, generalmente, se seleccionaron los experimentos o las cosechas (León y Villegas 1996).

Con el advenimiento de la computación y los sistemas de programación, unido a la necesidad de salvaguardar los resultados experimentales obtenidos hasta esa fecha, el Departamento de Suelos y Agroquímica del INICA creó a partir de la segunda mitad de los años 80 el Sistema de Información de Experimentos (SIDE), donde se conformaron las bases de datos que contienen la información de los experimentos de campos, que conformaron la red experimental del INICA, y el sistema Perfil donde se registran los datos de los perfiles descritos en los experimentos. La creación y puesta en marcha de estos sistemas, también permitió el análisis estadístico-matemático de las variables de cosechas y de suelos, así como la exportación a otras bases de datos y sistemas estadísticos.

### **2.3 Uso de modelos matemáticos para la predicción de la respuesta de los cultivos a los fertilizantes**

La producción de los cultivos y su respuesta a los fertilizantes varía dentro de las regiones agrícolas debido a los efectos en la variación de los factores asociados al suelo, clima y prácticas agrícolas (Colwell, 1988). De esta manera, dichas características pueden servir de base en el aporte de informaciones fundamentales para optimizar el uso de fertilizantes que permitan extrapolar resultados de experimentos con fertilizantes de un lugar para otro, de condiciones agro-ecológicas similares (Lal, et al 1993; Herrera, 1999).

La relación entre el rendimiento y la aplicación de dosis de fertilizantes está representada por funciones que conforman la relación rendimiento-fertilizante, a través de una expresión generalmente denominada modelo, de tal manera que las funciones estimadas a partir de la información experimental brinden una representación realista de la relación biológica indicada en la base de datos (Colwell, 1994).

Según Herrera (1999) los modelos generales de fertilidad buscan representar los efectos de las variables suelo, clima y prácticas agrícolas, en forma de ecuaciones matemáticas que expresan la respuesta de los cultivos a la aplicación de fertilizantes como funciones de dichas variables.

Especial atención han tenido los modelos matemáticos para la predicción de la respuesta productiva de los cultivos a los fertilizantes (Bock y Sikova, 1990; León, 1996; Pérez y Herrera, 1998; Rebolledo, 1999 y Pineda, 2001) pues permiten obtener información sobre el rendimiento máximo posible a obtener, los gastos en la adquisición de portadores, así como la calibración de las dosis de fertilizantes óptimas económicas para cada agro-ecosistema y otras variables útiles para la toma de decisiones. Al respecto Hernández y Herrera (1993), mostraron que las diversas formas funcionales o modelos han sido propuestos para representar matemáticamente los efectos de las dosis sobre los rendimientos de los cultivos, donde se trata de cuantificar la relación entre los diferentes estimadores de los parámetros correspondientes a los modelos y las variables locales.

Las decisiones en la investigación científica están basadas en la observación, de tal manera que la elección de modelos para el estudio científico de la relación fertilizante rendimiento deben estar sustentadas en el carácter de la relación indicada por la base de datos, para significar los efectos de la dosis de fertilizantes sobre el rendimiento. Miller (1990) expresó que cuando un modelo es seleccionado para representar la relación rendimiento-fertilizante, las funciones que lo forman tienen que ser estimadas a partir de una base de datos obtenida por una serie de experimentos de campos sobre niveles de fertilizantes (Bautista, 1998; Nelson, 1999; Machado *et al*, 2000; Pineda *et al*, 2001).

### **Modelos generales de fertilidad del suelo**

Los modelos generales de fertilidad del suelo son básicamente un conjunto de ecuaciones de regresión que relacionan resultados procedentes de experimentos de fertilidad con variables y circunstancias propias de un sitio específico (Jonson, 1991; Rebolledo, 1999; Opazo y Carrasco, 1999). Como rasgo distintivo tiene que los aspectos independientes de los resultados de los experimentos, pueden ser representados por las variables del rendimiento que corresponden a componentes ortogonales de análisis de varianza de regresiones para las relaciones fertilizante-rendimiento, estimadas a partir de los datos resultantes de los experimentos de fertilizantes en forma de funciones, que representen gráfica y matemáticamente dicha relación (Anderson y Nelson, 1975; Cook y Wisberg 1982; Herrera, 1992).

Nelson (1999) al tratar el desarrollo de los modelos matemáticos se refirió a la variedad de los mismos al ser usados en la evaluación de la respuesta a la aplicación de los fertilizantes. Los modelos asintóticos (por ejemplo la ecuación de Mitscherlich) que

requieren ajustes iterativos han perdido campo frente a los modelos polinomiales que son más convenientes, particularmente en el caso de la experimentación multi-sitio. No solamente existe el modelo cuadrático, sino que también se pueden usar polinomios con la variable transformadora (ejemplo raíz cuadrada).

Atkinson (1985) planteó, que las funciones estimadas se pueden usar para calcular rendimientos y ganancias para dosis señaladas de aplicación de fertilizantes, y requerimientos de fertilizantes a partir de valores para las variables del lugar.

Requisitos para desarrollar un modelo general según Colwell (1994):

1. Mostrar la fertilidad del suelo de una región, llevando a cabo una serie de experimentos de fertilizantes con un diseño adecuado para la estimación de las funciones fertilizantes-rendimiento.
2. Representar los resultados de cada experimento mediante ecuaciones de regresión, para las funciones fertilizante-rendimiento de forma apropiada, estimados a partir de los datos experimentales.
3. Presumir las variables de rendimiento que representan los datos significativos de los resultados experimentales y que correspondan a componentes ortogonales de análisis de varianza de las funciones fertilizante-rendimiento.
4. Obtener en cada lugar del experimento datos para las variables del sitio en específico, de las que se espera expliquen las variaciones del rendimiento para los diferentes experimentos.
5. Desarrollar ecuaciones de regresión que relacionen las variables de rendimiento con las variables y circunstancias del sitio, obteniendo un grupo de ecuaciones que forman el modelo general. Cuando no existen regresiones significativas para la variable de rendimiento, entonces se asumen ecuaciones " $V = constante$ ", siendo este la media de la variable del rendimiento.

El mismo autor resumió los requisitos para usar un modelo general:

1. Los valores para las variables propias del sitio correspondientes al modelo se miden o estiman para lugares específicos, y se sustituyen en las ecuaciones del modelo, con el objetivo de obtener estimados de las variables de rendimiento.



2. Las variables de rendimiento estimadas se usan para calcular los valores de las funciones de fertilizante-rendimiento, de la misma forma que los estimados a partir de los datos originales del experimento.

3. Las funciones de los rendimientos estimadas se usan para calcular estimados de rendimientos, ganancias, dosis óptimas de fertilizantes, etc. Usando los mismos procedimientos a los empleados con las regresiones estimadas directamente.

En esencia estos requerimientos son los que también se usan para la utilización y desarrollo de regresiones, descritos por numerosos autores (Cook y Wisberg 1982; Atkinson 1985; Sims, 1999; Rebolledo, 1999; Machado *et al*, 2000 y Sumner, 2001) que señalan que el simple uso de procedimientos clásicos de regresión, sin una apreciación de sus bases matemáticas y limitaciones, teniendo en cuenta la naturaleza científica de las relaciones que están siendo estimadas, puede conducir fácilmente resultados engañosos e inexactos.

### **Modelo Discontinuo Rectilíneo**

Autores nacionales y extranjeros en la actualidad se valen del Modelo Discontinuo Rectilíneo o Modelo de Respuesta Lineal aplicado por Cate y Nelson (1965), a las ciencias del suelo, para analizar datos provenientes de ensayos de fertilizantes y determinar las necesidades de éstos por los cultivos (Cate, 1971; Espinosa *et al*, 1998; Nelson, 1999; Machado, 2001 y Pineda, 2001).

Ruiz *et al*, (2001) plantean que el rendimiento es una función de muchos factores que afectan al crecimiento de las plantas, desde el punto de vista genético cada variedad vegetal tiene determinado potencial en su capacidad transformadora en materia seca, nutrientes minerales, luz, dióxido de carbono y agua. La eficiencia que pueda lograr una planta para transformar los ingredientes básicos en rendimiento, depende del grado y balance en el cual se encuentren reunidos todos los requerimientos que afectan el crecimiento (Espinosa *et al*, 1998). A partir de una interpretación agronómica el rendimiento de los cultivos puede ser relacionado con un amplio rango de factores o variables: según Fitts, (1959) el rendimiento es una función del cultivo, suelo, clima y manejo, entre otras.

La evaluación de la fertilidad del suelo, condicionada por la cantidad de un nutriente, no provee por si sola información suficiente para predecir el rendimiento que pueda ser obtenido en determinada circunstancia. Anderson y Nelson (1975), continuaron desarrollando los modelos discontinuos (línea-meseta) para ser usados en semejantes problemáticas, pues plateaban que el propósito del diagnóstico de la fertilidad es proveer una guía sobre la contribución que se espera obtener de un nutriente y predecir con alto grado de probabilidad de ocurrencia la respuesta beneficiosa en rendimiento, mediante la adición de fertilizantes específicos u otras enmiendas.

Numerosos investigadores en diferentes épocas del desarrollo de las ciencias agrícolas, se han dedicado a estudiar diversos modelos curvilíneos con el objetivo de lograr una dosis óptima del nutriente, sin embargo en su gran mayoría coinciden en reconocer las ventajas del modelo rectilíneo discontinuo, frente a las funciones asintóticas al momento de definir cantidades óptimas económicas, evitando así el sesgo a la derecha de los modelos curvilíneos. El uso del concepto del modelo discontinuo rectilíneo permite una estimación tentativa del requerimiento del nutriente, aun para datos de respuesta basados solamente en 3 niveles del nutriente (Boyd, 1970; Bartholomew, 1972; Anderson y Nelson, 1975; Espinosa *et al*, 1998; Nelson, 1999; Machado *et al*, 2000 y Pineda, 2001).

Es por ello que los resultados analíticos de las muestras de suelos dependen fundamentalmente, de su valor práctico cuando se conocen de ante mano, por investigaciones precedentes, cuanto rendirá un cultivo bajo una condición “conocida” o similar de fertilidad de suelo y bajo un conjunto dado de circunstancias. La respuesta del rendimiento a fertilizantes añadidos deberá, por lo tanto, ser relacionada con situaciones específicas de sitio y cultivo (Jonson, 1991).

### **Rendimiento Máximo Estable**

Teniendo en cuenta que el límite superior de una función de respuesta se ubica exactamente donde termina el efecto del nutriente sobre el cultivo, entonces el rendimiento máximo alcanzado deriva en rangos de estabilidad, producto a que el nutriente objeto de estudio dejó de ser el factor limitante del rendimiento (González *et al*, 1997). Considerando que el rendimiento máximo logrado para una situación dada no es el máximo absoluto para todas las posibles condiciones, sino para un conjunto específico de circunstancias dentro de un experimento, es más aceptado usar el termino “Rendimiento

Máximo Estable”, el cual implica determinada constancia en el rendimiento bajo ciertos rangos de aplicación del nutriente bajo estudio, así como su variación si las condiciones locales fueran modificadas (Parton *et al* , 1988; Jonson, 1991; Shaap y Leij, 1998; Solé *et al*, 1999; Pérez *et al*, 2002).

### **Rendimiento Relativo**

Destacados científicos del siglo XIX como Mitscherlich, Spillman, Baule y Bray expresaban el rendimiento sin el nutriente bajo estudio como porcentaje del rendimiento posible a alcanzar cuando todos los nutrientes estaban presentes al nivel adecuado, lo que se conoce desde entonces como rendimiento relativo, considerando que otras variables, como clima, suelo, fitotecnia, etc., se mantienen constantes. En la actualidad se continúa utilizando para relacionar el efecto provocado por el fertilizante aplicado y los contenidos de los nutrientes del suelo, pues al ser una proporción en vez de una cantidad absoluta, es posible comparar el rendimiento relativo de sitios diferentes (Beaufils, 1973; Atkinson, 1985; Cowell 1994; Sims, 1999; Sumner, 2001).

### **Fundamentación agronómica para el uso de los modelos discontinuos rectilíneos**

La mayoría de las discusiones sobre la respuesta a los fertilizantes están basadas en la deducción de los resultados provenientes de los ensayos de campo, sobre la base “Leyes de la Agroquímica” enunciadas por Liebig, Boussingault, Beherain, Mitscherlich entre otros, que más tarde Voisin, (1966) enriqueció con acertados aportes, llamándolas “Leyes Científicas en la Aplicación de los Abonos.

La “Ley del Mínimo” o “Ley de Liebig” citada por Voisin (1966), plantea en su formulación cuantitativa que: *“Los rendimientos de las cosechas son proporcionales a la cantidad del elemento fertilizante, que se encuentra al mínimo en el suelo en relación con las necesidades de las plantas”*

Como lo subrayó Demolon (1972) ésta ley indica que hay un límite de producción debido a la insuficiencia relativa de un elemento nutritivo en el suelo, el cual se comporta como factor limitante, sin embargo ésta ley no detallaba de que manera la producción progresaba hasta ese límite, aspecto que fue corregido por Mitscherlich a inicios del siglo

XIX, al precisar el carácter cuantitativo de ésta ley, expresando: *“Cuando se aportan al suelo dosis crecientes de un elemento fertilizantes, los aumentos del rendimiento obtenido son cada vez menores, a medida que las cantidades aportadas se eleven”*

La expresión gráfica de ésta ley describe una función curvilínea continua, pero no descrita por el efecto provocado en las sucesivas aplicaciones adicionales de fertilizantes, resultante en respuestas cada vez más pequeñas de incrementos de producción. Con el paso del tiempo se observó que su carácter cuantitativo era poco exacto (Voisin, 1966; Fundora *et al*, 1992 y Cabrera, 1997) de acuerdo a la evolución del conocimiento alcanzado en la experimentación agronómica, quedando indeterminado su aspecto cualitativo; expresado por Voisin de la forma siguiente: *“La insuficiencia de un elemento asimilable en el suelo, reduce la eficiencia de los otros elementos y por consiguiente, disminuye el rendimiento de las cosechas”*

Muchos autores señalan que el rendimiento de los cultivos depende del factor más limitante, y que sólo su corrección producirá incrementos en las cosechas. Una vez corregidos éstos, los rendimientos serán regulados por otro factor que limite la expresión genética de la planta. La corrección de éste producirá nuevamente incrementos en los rendimientos, hasta que deje de afectarlo y sea otro factor el que lo controle. Este proceso se repetirá hasta corregir todos los factores limitantes de un determinado sitio específico. (Voisin, 1966; Fundora *et al*, 1992; Cabrera, 1997,).

También Cabrera, (1997) resaltó en su interpretación agronómica que el rendimiento está influenciado de forma simultanea por todos los factores limitativos de la producción, y la influencia de cada uno de ellos es proporcional a su grado o intensidad de limitación.

Voisin (1966) consideró que de forma teórica y práctica el exceso de un elemento nutricio en el suelo limita más el rendimiento que su insuficiencia. Este análisis permitió al autor formular la conocida “Ley del Máximo” que plantea: *“El exceso de un elemento asimilable en el suelo reduce la eficacia de otros elementos y, por consiguiente, disminuye el rendimiento de las cosechas”*

Esta ley fue demostrada, al igual que la clásica “Ley del Mínimo” mediante la representación esquemática de una curva teórica en forma cuadrática, la que estaría seccionada en diferentes partes atendiendo al nivel de aplicación del elemento al suelo, expresando que al aumentar la dosis el rendimiento aumenta, pero no en forma lineal,

alcanzándose un máximo a determinada cantidad, (Ley del Mínimo), pero siguiendo la trayectoria de la curva, el incremento comienza a deprimirse lentamente con el aumento de las dosis y luego un poco más rápido (Ley del Máximo). Significando que el elemento en estudio pasó a ser, de factor limitante por defecto, a factor limitante por exceso. Esta zona de la curva, se puede explicar también por la “Ley del Mínimo”, si se toma en cuenta que algún otro nutrimento se encuentra limitando la producción (Cabrera, 1997). De corregirse ese factor, el rendimiento comenzaría a aumentar, pero habría que valorar si el incremento obtenido es redituable en relación a los precios de los portadores en función de las cantidades aplicadas al suelo. De aquí el carácter económico de la “Ley del Máximo”, que le permitió a Voisin unir ambas leyes en una, al enunciar la “Ley del Equilibrio de los Elementos Minerales del suelo”... que plantea: *“La insuficiencia o exceso de un elemento asimilable en el suelo reduce la eficacia de los otros elementos y por consiguiente hace disminuir el rendimiento de las cosechas”*

### 2.4 NITRÓGENO (N)

#### 2.4.1 Mineralización e Inmovilización del N

El N es el elemento más estudiado dado que: (i) a diferencia de los demás nutrientes, no existe en la fracción mineral del suelo y su disponibilidad depende de la presencia de materia orgánica mineralizable y de los procesos de fijación biológica del N atmosférico; (ii) representa el elemento más limitante en las zonas tropicales, en la mayoría de los bosques templados y en ecosistemas áridos y semiáridos, y (iii) cuando no es limitante (disponibilidad > absorción por las plantas) su riesgo de pérdida en forma de nitrato tiene importantes implicaciones ecológicas (Mazzarino, 2002).

Aproximadamente más de 95 % del N total que se encuentra en el suelo está en forma orgánica, siendo ésta inaccesible por las plantas, pero al descomponerse por la acción de los microorganismo forma nitrógeno mineral asimilable por los cultivos, en este proceso conocido como mineralización se distinguen dos etapas: la amonificación y nitrificación (Fundora *et al*, 1992; Cabrera y Bouzo, 1999; Jenkinson y Rayner, 1997; Körshens *et al*, 1998; INPOFOS, 2000; Verchot, 2001).

Arian *et al*, (2000) ratificaron que la amonificación se caracteriza por ser una etapa de reacción lenta, que tiene lugar en presencia o ausencia de oxígeno, en medio neutro o

alcalino, y consiste en la transformación del N-orgánico en N-amoniacal, conformada por la actividad de la flora microbiana del suelo (bacterias, hongos actinomicetos etc.)

Por su parte la nitrificación ocurre con rapidez, bajo condiciones exclusivamente aeróbicas, desarrollada en dos fases, dependiente cada una de diferentes grupos de bacterias autotróficas aerobias, oxidando primero al amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) por la acción de las Nitrosomonas hasta nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), y luego hasta nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) por las Nitrobacter, reacción que tiene lugar a mayor velocidad que la primera con lo que se evita que el  $\text{NO}_2^-$  pueda alcanzar concentraciones tóxicas para las plantas (Arzola *et al*, 1998; Cabrera y Bouzo, 1999; Verchot *et al*, 2001).

El proceso inverso a la mineralización es la inmovilización, la que también es realizada por microorganismos y consiste en la utilización de las formas minerales de nitrógeno para formar su biomasa, quedando así el nitrógeno en forma orgánica. La mineralización y la inmovilización consideradas por separado son denominadas mineralización bruta e inmovilización bruta. Ambos procesos ocurren en el suelo simultáneamente, por lo que un concepto de mayor importancia agrícola sería el efecto neto que de ellas resulta, el cual lleva implícito magnitud y dirección (León, 1997; Arzola *et al*, 1998; Cabrera y Bouzo, 1999).

### **2.4.2 Balance del N en el agroecosistema con caña de azúcar**

#### **Exportación del N por la cosecha**

En el agroecosistema cañero (Arzola *et al*, 1998; Cabrera y Bouzo, 1999; Arian *et al*, 2000) la mayor pérdida del N está dada por la exportación que de este elemento realiza la cosecha. Parte de los nutrientes que las plantas extraen del suelo retornan al mismo con los restos vegetales que permanecen en el campo (hojas, restos de cosecha, cepas, raíces, etc.), pero determinada cantidad sale del sistema con el producto agrícola que se exporta a la industria, como tallos, parte de los cogollos y de la paja.

Pérez, (1982) obtuvo un índice medio de extracción de  $1.18 \text{ kg N.t}^{-1}$  de caña, no obstante, el valor correspondiente a la exportación sólo alcanzó  $0.55 \text{ kg del N.t}^{-1}$  de tallos. En los reportes del SERFE (2001) para más de 90 % del área de producción nacional calcula un valor medio de  $1.6 \text{ kg N.t}^{-1}$  de caña.

### **Quema de la caña para la cosecha**

Por determinadas razones de seguridad o de manejo, en muchos países cañeros la quema de sus plantaciones antes y después de la cosecha es una práctica generalizada. Esto no sólo conduce a pérdidas considerables de nutrimentos del sistema suelo-planta, pues el N contenido en las hojas secas y gran proporción de su contenido en los cogollos se pierde al destruirse la materia orgánica (León, 1997; Arzola *et al* , 1998 y Cabrera y Bouzo, 1999, Lozano *et al* , 2001, Milanés *et al*, 2001), sino que además se produce un calentamiento elevado de las capas superficiales provocando una esterilización parcial del suelo, conjuntamente con la alteración en sus propiedades químicas y físicas (Fassbender, 1972; Sandoval, 1997; Fernando *et al*, 2001; Mazzarino, 2002).

### **Desnitrificación**

La desnitrificación agrupa una serie de procesos bióticos y abióticos que conducen a la reducción de nitratos; lo que produce pérdidas del N del suelo que muchas veces son considerables, tanto del N nativo como el aplicado en forma de fertilizante (Malavolta y Vitty, 1997; McCaty *et al*, 1998).

La desnitrificación biológica no es un proceso exclusivo de los suelos mal aireados en presencia de bacterias heterótrofas o facultativas, sino que ocurre en todos los suelos, en pequeñas cavidades diseminadas en su masa donde imperan las condiciones anaeróbicas o casi anaeróbicas. De allí la evidente importancia de este proceso microbiano capaz de inducir notables pérdidas (Fassbender, 1972; Arzola *et al* , 1981; León, 1997).

Según Smirnov y Muravin, citados por Cabrera y Bouzo (1999) las pérdidas por reducción biológica de los nitratos podrían alcanzar valores de alrededor de 20 % del N de los fertilizantes amoniacales y de 30 % del de los fertilizantes nítricos, pudiendo incrementarse hasta un 50 % en suelos inundados. También Hauck (1971) reportó que estas pérdidas pueden variar entre 0 y 40 % del N aplicado con los fertilizantes en cultivos anuales, de 25 a 35 % en pastizales y de 20 a 50 % en arrozales.

### **Volatilización**

La volatilización del ión amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) o desnitrificación abiótica es el resultado de diferentes reacciones químicas, que ocurren bajo condiciones alcalinas entre diferentes

compuestos nitrogenados presentes en el suelo y los aplicados por los fertilizantes (Fassbender, 1972; Boul y Stokes, 1997) lo que da lugar a pérdidas gaseosas de amoníaco ( $\text{NH}_3^+$ ).

Estas pérdidas ocurren fundamentalmente por la aplicación de altas dosis de N en el uso del amoníaco anhidro, aunque también pueden ocurrir con la urea ( $\text{CO}(\text{H}_2\text{N})_2$ ), el nitrato de amonio ( $(\text{NH}_4)\text{NO}_3$ ) y el sulfato de amonio ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ), ampliamente usados en Cuba (León, 1997; Arzola *et al* , 1998 y Cabrera y Bouzo, 1999).

Variables son los reportes sobre la magnitud de las pérdidas por volatilización del amoníaco. En las referencias internacionales se encuentran resultados de pérdidas notables como insignificantes. Esta poca uniformidad se debe al grado de participación de diferentes factores: pH básico, presencia de carbonatos de calcio, baja capacidad de intercambio catiónico, textura arenosa, baja humedad, alta temperatura y algunas prácticas de manejo fitotécnico como el uso de portadores nitrogenados (sobre todo urea y amoniacaes) aplicados superficialmente (Martín *et al*, 1987; Benintende *et al* , 2000).

En Gran Bretaña Cooke (1967), consideró que las pérdidas por volatilización del amoníaco superaban a las ocurridas por el lavado de nitratos. Infante (1988), en suelos cañeros de Venezuela encontró pérdidas anuales de  $30.7 \text{ kg del N} \cdot \text{ha}^{-1}$ .

### **Lavado**

Las formas minerales del N presentes en el suelo son solubles en agua para que éstas sean asequibles por las plantas, provocando que con el movimiento de la misma pueden ser arrastradas hacia capas inferiores del suelo, donde las raíces no puedan alcanzar, constituyendo una pérdida, aunque permanezcan en el suelo en forma asimilable. Este fenómeno se produce fundamentalmente en forma del N nítrico, pues el N amoniacal es fijado a las arcillas del suelo, nitrificado rápidamente o absorbido por las raíces (León, 1997; Arzola *et al* , 1998 y Cabrera y Bouzo, 1999, Benintende *et al*, 2000).

Los resultados de estudios sobre le tema son un tanto contrapuestos, pues en unos casos se reportan valores de consideración y en otros no, dado por la dependencia de numerosos factores edafoclimáticos. En suelos arenosos las pérdidas son mayores que en los arcillosos; también en suelos descubiertos que en los que están cubiertos por vegetación, donde se incorpore mayor cantidad de agua (por lluvia o por riego) así como



el uso de portadores nítricos supere al de los amoniacales o las dosis de fertilizantes nitrogenados sean más elevadas (Shishov *et al* ,1973; León, 1997; Benintende *et al*, 2000).

Infante (1988) consideró en sus estudios que la mayor densidad del sistema de raíces de la caña de azúcar se encontraba en los primeros 30.0 cm y valoró como perdido, tanto el N nítrico como el amoniacal, ubicado fuera de ese límite. Bajo éste criterio reportó pérdidas anuales totales de 5.3 kg del N.ha<sup>-1</sup>, representadas casi en su totalidad por los nitratos (96.4 %).

### **Erosión**

Numerosos reportes coinciden que la materia orgánica del suelo (MOS) es la principal reserva del N en cualquier agroecosistema, la que está confinada en mayor proporción en la capa arable, por tanto la pérdida del horizonte superficial conlleva al detrimento del N en el suelo. La magnitud de esta pérdida es también variable y difícil de pronosticar, ya que puede ser de decenas o hasta de cientos de kg del N.ha<sup>-1</sup>, lo que depende del contenido del N que tenga el suelo y del volumen de suelo removido, aspecto que está sometido a los atributos de la lluvia y el viento, además de la topografía, la presencia o no de cobertura vegetal y al tipo de textura. También el hombre mediante prácticas agrícolas inadecuadas puede contribuir a la erosión del suelo, lo que lamentablemente es frecuente (León, 1997; Arzola *et al* , 1998; Cabrera y Bouzo, 1999; Farshad y Zinck, 2001; Becker *et al*, 2002; Michelena, 2002).

### **2.4.3 Ganancias**

#### **Fijación biológica del N atmosférico**

Contrariamente a las salidas del N que tienen lugar en el agroecosistema con caña de azúcar, existen plantaciones que no muestran efectos beneficiosos ante las aplicaciones de este nutrimento. Además existen referencias de diferentes regiones donde esta planta ha crecido en monocultivo por 50, 100 o más años, sin recibir aplicaciones del mismo, independientemente del rendimiento. Independientemente de la fertilización y del aporte que puede realizar la MOS, una importante fuente del N para la caña de azúcar, es la fijación biológica del N<sub>2</sub> atmosférico (León, 1997; Arzola *et al* , 1998; Baldini *et al*, 1998 y Cabrera y Bouzo, 1999,).

Determinados microorganismos, tanto de vida libre como asociativos o simbióticos, están aptos para fijar N<sub>2</sub> inaccesible a la caña de azúcar (Urquiaga *et al* , 2001). Los géneros más reportados son *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Acetobacter* y *Beijerinckia*(Cian *et al* , 2000).

Entre los biofertilizantes más utilizados en Cuba durante la última década se encuentran aquellos que se preparan a base de bacterias fijadoras de nitrógeno de forma asociativa y de microorganismos solubilizadores del fósforo del suelo, todos los cuales sintetizan también aminoácidos, vitaminas, citoquininas, auxinas, giberelinas y otras sustancias que actúan como estimuladoras del crecimiento vegetal (Elmerich, 1984; Martínez y Dibut, 1999).

En Cuba, Pérez *et al*, (2001) evaluaron el efecto del *Azospirillum* spp., aplicado en forma líquida y soportado en turba, sobre el rendimiento de la caña de azúcar en diferentes condiciones edafoclimáticas. Los resultados obtenidos mostraron incrementos en más de 60 t/ha producidas. Los autores concluyen que estos productos biológicos en mayor o menor medida contribuyen a mejorar la calidad y productividad del cultivo, llegando a sustituir la aplicación de 50% del fertilizante mineral.

La caña de azúcar cultivada en Brasil generalmente presenta baja frecuencia en la respuesta a la aplicación del N-fertilizante, aun creciendo en suelos muy pobres en N-disponible, estudios recientes han confirmado que la fijación biológica del N (FBN) asociada al cultivo en variedades eficientes, puede contribuir hasta en 70 % de las necesidades del nutrimento, contribuyendo a la economía del país en 150 millones de USD, contribuyendo significativamente a la protección del medio ambiente (Urquiaga, 1999).

### **Aporte del N por las llluvias**

Diferentes compuestos nitrogenados que se volatilizan del suelo, como el amoníaco y los óxidos del N, así como los que se forman por acción fotoquímica o por las descargas eléctricas, o por la combustión de diversos carburantes, pueden ser lavados o removidos de la atmósfera por las llluvias y transferidos al suelo (León, 1997; Arzola *et al* , 1998 y Cabrera y Bouzo, 1999; Rodríguez y Osorio 2001). La magnitud de este aporte depende de la frecuencia de las llluvias, de la concentración del N en la atmósfera y otros factores

como: cercanía a centros industriales, tipo de vegetación, posición geográfica y estación del año.

Infante, (1988) encontró con reiteración en reportes internacionales que el ingreso del N por las lluvias está entorno de  $22 \pm 6 \text{ kg N ha}^{-1}$ , coincidiendo que el amonio es la forma nitrogenada predominante. La autora en sus estudios llegó a resultados muy similares, ( $26.3 \text{ kg N ha}^{-1}$ , formado en 99.8 % por amonio). Además de comprobar que basta poca lluvia para remover los nutrimentos presentes en la atmósfera, mientras que la lluvia subsiguiente tiene un efecto diluyente sobre la concentración de los iones presentes en el agua colectada.

También debe considerarse el agua interceptada directamente por el cultivo proveniente de la lluvia, ya que puede ocurrir una retención o absorción del amonio a nivel foliar, así como el lavado de los nitratos (Infante, 1988).

### **2.5 Factores relacionados con la fertilización nitrogenada en caña de azúcar**

#### **Relación N-variedad**

De acuerdo a las diferencias morfológicas y fisiológicas que muestran las variedades de caña de azúcar, se puede asumir su influencia sobre la capacidad de las mismas para asimilar los nutrimentos. Así se tiene por ejemplo diferencias en el desarrollo del sistema radical, color de las hojas, capacidad para asimilar nutrimentos, etc. (León, 1997; Arzola *et al* , 1998; Cabrera y Bouzo, 1999).

En los reportes cañeros se encuentran referencias sobre cierta tolerancia de algunas variedades ante deficiencias o excesos del N, así como a mayor o menor eficiencia en el aprovechamiento del nutrimento, pero coinciden comunicaciones de que no se observa interacción N-variedad, debido a que otros factores dominan la respuesta impidiendo totalmente su manifestación. En Cuba en los últimos 40 años las recomendaciones de fertilizantes no han tenido en cuenta las exigencias de las variedades, ni su capacidad para responder a las aplicaciones altas o bajas de este elemento, ya que no hay suficiente soporte teórico basado en resultados experimentales que permita tomar decisiones en este sentido (Del Toro *et al*, 1985; León, 1997; Arzola *et al* , 1998; Cabrera y Bouzo, 1999).

### **Influencia de la cepa**

En Cuba la caña plantada en primavera y cosechada independientemente de la edad, no requiere de la aplicación del N para producir buenos rendimientos. Sin embargo en otras épocas de plantación se han encontrado respuestas eventuales a dosis relativamente bajas de 40 a 75 kg del N.ha<sup>-1</sup> (Arzola *et al* , 1998).

Son frecuentes los reportes en cuanto a la poca efectividad del N en cepas de planta, pero en lugares donde la fertilización de esta cepa es tradicional las dosis suelen variar entre 40 y 90 kg del N.ha<sup>-1</sup>, exceptuando a: Egipto, Taiwan y Uganda, donde se han empleado dosis más altas (120, 200 y 450 kg del N.ha<sup>-1</sup> respectivamente). En las condiciones de Cuba se ha demostrado que la caña plantada en primavera, no requiere de la aplicación de N para producir más tallos que las parcelas fertilizadas y aunque en las plantaciones de frío se han encontrado respuestas esporádicas a dosis bajas, en la actualidad no se recomienda N a las mismas, debido a la baja frecuencia de respuesta económicamente justificable, excepto en suelos con hidromorfía o compactación y de textura arenosa (Villegas y Chang, 1996).

Borden citado por Del Toro *et al*, (1985) demostraron que las cepas de planta necesitan menos 0,90 kg del N.t<sup>-1</sup> de caña para lograr rendimientos óptimos, mientras que los retoños requerían aproximadamente 1,13 kg del N.t<sup>-1</sup> de tallos cosechados. Los investigadores explicaron este resultado debido a la presencia en los retoños de condiciones físicas del suelo menos favorables para la oxidación de la materia orgánica y por consiguiente aumenta la demanda del N, así como un sistema radical menos vigoroso.

Numerosos estudios conducidos en Cuba muestran que las socas no se afectan cuando no se fertiliza la caña de planta y que aún la no aplicación consecutiva de nitrógeno en caña planta y soca tampoco afecta a las restantes cepas (Villegas y Chang, 1996). Similares resultados reportan los estudios realizados por Sánchez *et al*, (2000) y Salgado *et al*, (2001) en las áreas cañeras de Tabasco, México.

En Cuba, Pérez citado por Cabrera y Bouzo (1999) demostró que la primera soca no siempre requiere de las aplicaciones de nitrógeno para su normal desarrollo, siendo éstas necesarias en los suelos Ferralitizados cálcicos y en los Vertisuelos, pero no en los Cambisoles. A partir de la segunda soca se logra una respuesta estable a las

aplicaciones de este elemento, obteniéndose incrementos agrícolas superiores a 25 por ciento. Las aplicaciones de la segunda soca en adelante ejercen un marcado efecto sobre la durabilidad de la cepa, evitando su deterioro, lo que permite aumentar el número de cortes a cada campo.

Iznaga, (1986) encontró en Ferralitizados cálcicos que a partir de la tercera soca disminuye la necesidad de fertilizante nitrogenado por la caña de azúcar hasta llegar a ser innecesario en la quinta soca, argumentando que a medida que aumentó el número de cortes disminuyó la población, por aumentar el número de espacios vacíos a causa de una mayor mortalidad de las cepas y unido al envejecimiento de la misma, incrementó el contenido de materia orgánica en el centro del surco a causa de las raíces y tocones muertos durante el ciclo.

### **Fuentes portadoras del N**

Bajo las condiciones de Cuba y en experimentos de campo se ha comprobado que la caña de azúcar no muestra preferencias en su nutrición, por una u otra fuente portadora del N. En relación al tema León (1997) refirió en cuadro comparativo los 10 portadores del N más usados en la agricultura cubana y extranjera, mostrando similar efectividad en la fertilización de la caña de azúcar, sin llegar a considerar este un elemento definitorio por los agrónomos a la hora de adquirir los portadores. En Puerto Rico, Samuels y Capó (1956) concluyeron que el cultivo no manifiesta distinción alguna por una fuente u otra, siempre y cuando se le suministre al suelo las proporciones de N inicialmente estimada.

### **Condiciones del suelo**

En suelos que por sus características presentan adecuadas condiciones reductoras, la tasa de mineralización del N-orgánico es lenta, provocando menor disponibilidad del elemento asimilable por la planta, además de aumentar las pérdidas por desnitrificación. El menor suministro de nitrógeno por el suelo y las mayores pérdidas de este nutriente en forma gaseosa explican la respuesta a la fertilización nitrogenada que muestra la caña de azúcar en cualquier tipo de cepa (Angarica *et al*, 1990; Vera, 2000).

En contraste Hernández, (1996) estudio los suelos arenosos, conjuntamente con las pérdidas de nitratos por lavado, donde se presenta generalmente un bajo contenido de

materia orgánica, lo que puede justificar hasta cierto punto la necesidad de aplicar nitrógeno desde caña planta y de fraccionar la dosis en cada cosecha.

### **Influencia de la lluvia**

En la mayoría de nuestros campos la caña de azúcar crece sin la aplicación de riego y por consiguiente la cantidad y distribución de la lluvia y la forma en que el agua se retenga en el suelo, resulta muchas veces vital para la obtención de altos o al menos rendimientos rentables (Ruiz *et al*, 2001).

Wiedenfeld, (2000) al estudiar el stress hídrico de la caña de azúcar durante diferentes períodos de crecimiento corroboró que ha mayor humedad en el suelo, será mejor la utilización de N por la planta y se requerirá de menos fertilizante nitrogenado para producir una tonelada de caña. Por otra parte, afirmó que bajo condiciones adecuadas de humedad las plantas producen más y su consumo de nitrógeno aumenta, por lo que se requerirá de menos nitrógeno para producir una tonelada de caña pero probablemente de una dosis mayor por hectárea.

Trabajos realizados en Cuba (INICA, 1979) han mostrado que a bajos niveles de lluvia correspondía mayor necesidad de N, hasta un límite. Cuando la lluvia excedió los 1000 mm se necesitó una dosis menor. Un nivel de precipitación anual de 1200 mm se considera óptimo y con precipitaciones de 1600 mm en lo adelante el efecto de la aplicación de N sobre la producción prácticamente es nulo, lo que podría explicarse por una mayor disponibilidad de N en la medida que se incrementa la humedad del suelo.

También, Rodríguez y Osorio (2001) estudiaron durante 15 años en experimentos de larga duración sobre Vertisuelos cañeros de la región oriental de Cuba, el efecto de diferentes dosis de N sobre los rendimientos, encontrando que a nivel local la respuesta de la caña de azúcar al nitrógeno es variable dependiendo de la lluvia total caída y su distribución.

### **Nivel de rendimiento**

Las variables morfológicas, tales como fitomasa, altura de planta, área foliar, número de hojas, y otras, han sido usadas para expresar la influencia de los nutrientes minerales sobre el patrón de rendimiento de las plantas (Malavolta y Vitty, 1997; Camacho *et al*, 2001)

García citado por León (1997) observó que la aplicación de N da lugar a un incremento progresivo de la población de tallos, lo que es considerado el mayor efecto de los fertilizantes nitrogenados sobre la producción.

El factor rendimiento en la agricultura cañera resulta de decisiva importancia para decidir por los agrónomos las dosis de nitrógeno a emplear, pues se considera que a mayor rendimiento mayor extracción de N realizará el cultivo y con más rapidez también se agotarán las reservas del suelo (León, 1997; Arzola *et al*, 1998). Lo que se puede interpretar que será necesario aplicar mayores dosis de N para evitar el empobrecimiento del suelo, sin descuidar los índices de consumo para cada región en particular. Por otra parte, la disminución de los rendimientos cañeros frecuentemente se asocia con la presencia de otros factores limitantes ajenos a la nutrición nitrogenada, lo que origina que la aplicación de elevadas dosis de dicho nutriente no necesariamente contrarreste la causa de los bajos rendimientos (Cabrera y Bouzo, 1999).

### **2.6 Fundamentos metodológicos para la evaluación y diagnóstico de la fertilidad de los suelos tropicales**

Los procedimientos de evaluación de la fertilidad de los suelos y los requerimientos de fertilizantes no han cambiado sustancialmente en su concepción en los últimos 150 años. Los problemas de carencia de nutrientes en los suelos, fueron detectados en un principio por las manifestaciones de los síntomas visuales en las hojas de las plantas y la disminución de los rendimientos agrícolas (Figueroa, 2000).

Antiguamente el agricultor sabía que para evitar que el suelo se agote y los rendimientos disminuyan, había que rotar los cultivos por las áreas donde se plantaban, y aplicar a los suelos residuos vegetales y de los establos (Demolon, 1972).

El posterior desarrollo de la industria de fertilizantes químicos, más fáciles de manejar y más baratos que las enmiendas orgánicas (por su mayor concentración y posibilidad de mecanización), cambió la forma de atender a los problemas nutricionales de los cultivos. Comenzando a valorar la fertilidad de los suelos usando soluciones químicas que extraían los nutrientes del suelo, buscando relacionar el resultados de los análisis químicos con las respuesta del cultivos a cantidades variables de fertilizantes (Pérez, 1999).

En la actualidad se sigue trabajando esta línea registrándose progresos importantes en lo concerniente al conocimiento de los mecanismos de nutrición, la llegada y absorción de distintos elementos a las raíces de las plantas y el papel que éstos cumplen en el metabolismo, pero muy pocos en cuanto a la secuencia de pasos a seguir a fin de evaluar su verdadera disponibilidad en el suelo, integrando la mayor cantidad de factores que intervienen en el complejo sistema de relaciones, suelo-planta-atmósfera-nivel tecnológico (Pineda, 2000).

Dibb, (2000) planteó que el concepto de eficiencia en el uso de nutrientes es a menudo mal interpretado, particularmente si se discute como un proceso aislado y no en el contexto del sistema total de producción agrícola, recordando que la eficiencia y la viabilidad económica son parte integrante del sistema total de producción y que cada uno de ellos tienen factores que necesitan ser optimizados para lograr cosechas rentables con el menor riesgo de contaminación.

### **Crterios para la formulación de dosis de fertilizantes**

En Chile, Rodríguez *et al*, (2001), consideran la fertilización racional para los cultivos agrícolas como una aproximación razonada del establecimiento del Normas de aplicación de abonos al suelo. Estas normas están fundamentadas en principios de la nutrición vegetal y en la dinámica de los nutrientes en el suelo. La hipótesis central de ésta aproximación postula que con el conocimiento de los procesos relevantes del sistema clima-suelo-cultivo-fertilizante es posible predecir las normas de fertilización de los cultivos en cada caso particular, que en su aplicación no es más que una simplificación de los procesos más relevantes que determinan las normas de fertilización.

De esta forma, el conocimiento y dominio de las normas para el establecimiento de un sistema de recomendaciones de fertilizantes, tiene como objetivo principal establecer una estrategia de manejo integral agronómico de la fertilización que permita elevar y mantener el estado de fertilidad de los suelos en forma económica y así alcanzar una nutrición óptima de los cultivos sin afectar la sustentabilidad del sistema (Salgado *et al*, 2001).

Los referidos autores simplificaron a 3 componentes las interacciones del sistema clima-suelo-cultivo-fertilizante para realizar la formulación de las dosis a partir: de la demanda del nutriente (DEN), suministro del nutriente (SUN) y eficiencia de la fertilización



(EF). Fundamentalmente, las interrelaciones entre el clima y el cultivo están reflejadas en la demanda del nutriente, las interrelaciones entre el suelo y el cultivo en el suministro del nutriente y el efecto de manejo de los fertilizantes en las relaciones suelo-cultivo a través de la eficiencia de la fertilización, concluyendo que la estimación de la dosis de la fertilización razonada es la siguiente:

$$DF = (DEN - SUN) / EF$$

Según el modelo conceptual de Salgado *et al*, (2001), la demanda del nutriente por los cultivos es la cantidad requerida para obtener un rendimiento económico en un determinado agroecosistema. El suministro del nutriente está dado por su cantidad disponible en el suelo la que es absorbida por el cultivo, puesto que éste proceso está determinado por la necesidad de la especie vegetal y la selectividad de sus transportadores iónicos (Fundora *et al*, 1992). Finalmente, la eficiencia de la fertilización la definen como la fracción de la dosis del nutriente aplicado que es recuperado por el cultivo, teniendo en cuenta que la cantidad absorbida de un elemento se limita con frecuencia por el suelo y no por la planta (Arzola *et al*, 1998).

El crecimiento y desarrollo de los cultivos generan una demanda de nutrientes necesaria para satisfacer los requerimientos de los procesos metabólicos en cada una de sus fases fenológicas. Es evidente que con un mayor crecimiento y una mayor producción, la demanda de los nutrientes por el cultivo aumenta, por lo tanto dicha demanda varía de acuerdo a determinado potencial genético, según las limitaciones del clima, del clima del suelo y del nivel tecnológico utilizado. Las distintas limitaciones de los agro-ecosistemas dan lugar a diferentes rendimientos alcanzables de los cultivos (Rodríguez *et al*, 2001). En el cálculo de la necesidad de los nutrientes para el cultivo juega un papel relevante la estimación realista y adecuada del rendimiento alcanzable. Este corresponde al rendimiento que es posible lograr en condiciones específicas (Sumner, 2001).

Cuando se produce un déficit entre la demanda del nutriente de los cultivos y el suministro del nutriente del suelo, este déficit debe ser superado por la dosis de fertilización. Sin embargo no todo el fertilizante agregado es recuperado por el cultivo. Parte del fertilizante puede perderse más allá de las profundidades alcanzadas por las raíces en el perfil del suelo, como gas hacia la atmósfera o bien quedar retenido en forma no disponible en el suelo (Salgado *et al*, 2001).

No obstante, la estimación de las dosis con esta formulación está limitada, pues sus autores reconocen que está planteada para cultivos en suelos y climas que permitan un crecimiento y desarrollo normal de los cultivos, de forma que su rendimiento alcanzable no sea modificado por factores tales como compactación y mal drenaje de los suelos, erosión, acidez excesiva o salinidad de los suelos.

Una sobre estimación del rendimiento alcanzable conducirá a calcular una dosis superior a la requerida, elevando los costos sin que estos se reflejen posteriormente en un mayor rendimiento y además, produciendo un riesgo de contaminación del medio ambiente. Por el contrario una subestimación del rendimiento alcanzable llevará a una disminución de la demanda y, por consiguiente de la dosis. Ello determinará una producción inferior al rendimiento alcanzable, que conducirá a una disminución de las utilidades (Terry, 2002).

Rodríguez *et al* , (2001) sugieren establecer en el cálculo del nutriente, además del rendimiento alcanzable, la concentración mínima óptima del nutriente en la materia seca producida por el cultivo, a esta concentración del nutriente se le denomina requerimiento interno del cultivo. Para facilitar el calculo de la demanda de nutrientes de los cultivos en función del producto cosechado, los autores establecieron los factores de demanda a partir del requerimiento interno y de la proporción del producto cosechado en la biomasa aérea total producida.

Actualmente en Cuba, De la Fé *et al*, (2002) establecen las dosis de N para la caña de azúcar basados en el Método de Balance descrito por Yagodin, (1986), el que tiene como principio aplicar dosis de fertilizantes como complemento de los nutrientes que necesita el cultivo para obtener un rendimiento dado, considerando la posibilidad de aportar nutrientes según las condiciones del suelo, clima y agrotécnia. Los autores mediante una expresión matemática calculan las dosis de N donde intervienen varios factores que condicionan las variables Necesidad y Posibilidad, teniendo en cuenta el índice de extracción promedio (I), el coeficiente de aprovechamiento (C) para las cepas y condiciones de explotación del cultivo, así como el rendimiento esperado (R) y la cantidad de N disponible en el suelo (S) según el método analítico que se utilice.

La decisión de que dosis del N aplicar depende de 4 condiciones pre-establecidas atendiendo a los valores obtenidos en el calculo de la ecuación y el % de MO determinado en el laboratorio (De la Fé *et al*, 2002).

$$D = ((100 \times R \times I) / C) - S$$

En Venezuela, PALMAVEN (1999), tiene en cuenta una serie de factores relacionados con el suelo para conocer las necesidades nutricionales de la caña de azúcar, comenzando por la toma de muestras de suelo representativas del agro-ecosistema para determinar las concentraciones de uno o más elementos asimilables, seguidamente la cantidad extraída del elemento presente en el suelo, por la acción de ácidos débiles que correlacionan con la respuesta de la planta a la aplicación del fertilizante, logrando así generar categorías de acuerdo al nivel de nutrimentos en el suelo: Bajo, Medio, Alto y muy Alto, indicando la probabilidad de obtener una respuesta con el fertilizante, a partir de la determinación del índice crítico. En relación con el uso de los análisis de suelos para formular recomendaciones de fertilizantes PALMAVEN plantea dos fases:

1. Interpretación de los resultados: correlación de los valores obtenidos por los análisis químicos del suelo y las respuestas por el cultivo.
2. Recomendación de fertilizantes: interpretación práctica de los resultados considerado aspectos económicos y prácticas de manejo que influyen en el rendimiento.

Para el caso particular del N, en Venezuela se tienen en cuenta tres factores cepas, drenaje del suelo y contenido de materia orgánica, (Strebin y Urrutia, 1999):

Recomendaciones del N (kg/ha) para caña de azúcar en cepas de planta.

Materia Orgánica (%)	Drenaje del suelo		
	Bien drenado	Pobremente drenado	Muy pobremente drenado
< 2	80	100	120
2 – 4	60	80	100
> 4	40	60	80
Nota: En suelos con niveles freáticos superficiales, aumentar la dosis del N en 20 kg/ha			

Recomendaciones del N (kg/ha) para caña de azúcar en cepas de socas.

Materia Orgánica (%)	Drenaje del suelo		
	Bien drenado	Pobremente drenado	Muy pobremente drenado
< 2	125	150	175
2 – 4	100	125	150
> 4	75	100	125
Nota: En suelos con niveles freáticos superficiales, aumentar la dosis del N en 25 kg/ha.			

En las últimas décadas la generación de metodologías para la recomendación de dosis de fertilización han llamado la atención de especialistas en fertilidad de suelos y economistas, debido a la creciente necesidad de utilizar con eficiencia los fertilizantes, atendiendo al incremento de sus precios y al imperativo de racionalizar su uso con la finalidad de conservar el ambiente (Salgado, 1999).

En México Salgado *et al*, (2001) refieren al *Sistema Integrado para Recomendar Dosis de Fertilización en Caña de Azúcar (SIRDF)*, el cual consta de seis fases para su completa ejecución, recogiendo en la fase seis el procedimiento metodológico para determinar las dosis de fertilización utilizando el modelo conceptual anteriormente descrito.

### **2.7 Agrupamiento agroproductivo de los suelos dedicados a la producción de caña de azúcar**

Este concepto surge con la intención de poner en manos de la agricultura cañera un esquema simplificado para el manejo de los suelos, capaz de agrupar aquellos terrenos con características productivas afines, de tal forma que se puedan utilizar un número menor de variantes edafológicas (Ascanio y Sulroca, 1986).

Semejante acción responde a los mismos principios de la clasificación de los suelos en uso. Es común para muchos productores manejar suelos con diferentes características genéticas pero con similares respuestas productivas para determinado cultivo (Ponce de León y Balmaceda, 1999).

Los autores atribuyen que lo anteriormente expuesto está relacionado con el poco estudio y desarrollo de las tasas inferiores (especie y variedad) de la clasificación, sin embargo reconocen que es fácil comprender que cualquier aproximación de las categorías a las tasas inferiores de una clasificación, tendrá un valor pronóstico general y nunca se ajustará de manera específica a un cultivo dado.

En el cuadro 2 se correlaciona la II Clasificación Genética de los Suelos de los Suelos de Cuba de Hernández *et al*, (1975) con los Agrupamientos Agroproductivos de Ascanio y Sulroca (1986).

Cuadro 2: Correlación del agrupamiento agroproductivo con la II Clasificación Genética de los Suelos de Cuba (Ponce de León y Balmaceda, 1999).

No	Agrupamiento Agroproductivo	II Clasificación Genética (1975)
I	Ferralitizados cálcicos	Ferralíticos Rojos y Ferralíticos Amarillentos
II	Ferritizados	No se define
III	Ferralitizados Cuarccíticos	Ferralíticos Cuarccíticos Amarillo y Amarillo Rojizo, Gley Cuarccítico
IV	Fersialitizados Cálcidos	Fersialíticos Pardos Rojizos, Fersialíticos Rojos Pardusco Ferromagnesial
V	Sialitizados Cálcidos	Pardos con Carbonatos y Húmicos Carbonáticos
VI	Sialitizados no Cálcidos	Pardos sin Carbonatos y Pardos Grisaceos
VII	Vertisuelos	Oscuros Plásticos Gleyzados y No Gleyzados
VIII	Gleyzados Sialitizados Cálcidos	Oscuros Plásticos Gleyzados y Gley Oscuro Plásticos
IX	Gleyzados Ferralitizados	No se define
X	Aluviales	Aluviales

## 2.8 Métodos más usados para diagnosticar las necesidades de fertilizantes nitrogenados

Para conocer la cantidad de fertilizante que necesitan los cultivos, el hombre se ha apoyado en la propia planta, ya sea de forma directa o indirecta. Entre los métodos que más se reportan, de forma directa, para conocer las necesidades de nutrimentos por los cultivos se encuentran los experimentos de campos o en macetas y los diagnósticos del estado nutritivo de la planta, como son los síntomas visuales de deficiencias, el diagnóstico a través del estado químico o bioquímico de los tejidos vegetales y la dilución isotópica (Carefoot *et al* , 1989; León, 1991 y Penney, 1996)

### 2.8.1 Métodos que emplean directamente a la planta

#### Ensayos de campos

Este método es el más usado en Cuba y gran parte del mundo para diagnosticar las necesidades de fertilizantes nitrogenados. La respuesta de la caña de azúcar en cuanto al nivel de producción y calidad de los jugos en las diferentes cepas, sometidas a cantidades variables de nitrógeno y bajo condiciones específicas de suelo, clima, fitotecnia, etc. son extrapoladas a condiciones semejantes de producción, con el objetivo de obtener mayores resultados productivos y económicos, así como disminuir el riesgo de contaminación ambiental y el deterioro del suelo (León *et al*, 2001a).

La metodología para realizar la fertilización nitrogenada en caña de azúcar en Cuba, recomienda aplicar el nutriente atendiendo al suelo, tipo de cepa y rendimiento esperado,

apoyándose en la reiteración de las respuestas del cultivo ante diferentes dosis de nitrógeno, desarrolladas en experimentos de campos de larga duración, distribuidos en toda la red nacional de estaciones del INICA, que incluyen los más diversos y variados agroecosistemas cañeros del país. También se ha considerado que dentro de un mismo suelo, o grupo de suelos a fines, son suficientemente estables y de dispersión similar, los contenidos de las reservas de nitrógeno y la capacidad de mineralización.

### **Análisis de tejido vegetal**

El diagnóstico foliar ha sido valorado por diversos autores como el método complementario más usado para corregir las dosis de fertilizantes, asumidas en base a los resultados de los experimentos de campo, aportando una valiosa información sobre el estado nutritivo de las plantas, y permite apreciar si la disponibilidad de nutrimentos ha sido o no escasa. Menéndez (1991) concluye afirmando que ésta técnica mostró ser un excelente complemento del análisis de suelo, pues los contenidos de los elementos mostrados por las hojas están integrados los efectos de varios factores (climatológico, fitotécnicos etc.) que pueden ser esclarecidos con el empleo de ésta técnica, pues como se sabe el estado nutricional del cultivo no depende sólo del nivel de abastecimiento del suelo.

### **2.8.2 Métodos que emplean la planta indirectamente**

#### **Análisis de muestras de suelos**

Reportes de investigación coinciden al plantear que los nutrientes móviles como el nitrógeno y el azufre pueden ser muestreados a profundidades de hasta 60 cm del suelo, con el objetivo de conocer cual es el estado nutricional del lote. De esta forma se brinda un índice de nutriente disponible que se correlaciona con el crecimiento de la planta, para así establecer recomendaciones de fertilizantes nitrogenados para los cultivos. Reportes provenientes de las áreas cañeras de Sudáfrica publican que métodos similares son usados por técnicos y productores en ese país, para recomendar dosis de nitrógeno al cultivo de la caña de azúcar (Whipker, 1997; Etchevers, 1999).

Roberts y Henry (2001) concluyeron que la absorción de nitrógeno por la planta puede igual tener una muy buena correlación con el nitrógeno a una profundidad de muestreo de 0-30 cm que con el de 0-60 cm, debido a la compactación en el barreno y la contaminación con suelo superficial que cae de las paredes del hoyo, lo cual puede introducir errores significativos, además de conocer que el mayor por ciento de raíces activas en la caña se encuentran en los primeros 30 cm de profundidad.

En cuanto al análisis químico de las muestras de suelo como vía de diagnóstico para la fertilización nitrogenada, ha sido reportado por disímiles autores en diferentes momentos de limitada utilidad, debido a la intervención en la absorción de este nutrimento por las plantas de dos sistemas biológicos:

1. La mineralización de la MOS por los microorganismos del suelo
2. La capacidad de la planta de establecer asociaciones simbióticas o no con microorganismos capaces de fijar el N atmosférico.

Esto origina que gran número de factores biológicos que intervienen en la vida de los microorganismos y de las plantas (aireación, humedad, temperatura, etc), así como la alta movilidad de las formas asimilables de nitrógeno por la planta, dada por su variabilidad frente a las condiciones ambientales, condiciones que no pueden ser recogidas en el muestreo de suelo para integrar un sistema de recomendación del Nitrógeno, lo que le confiere a este procedimiento un carácter dudoso en cuanto a su confiabilidad (Infante, 1988; Arzola *et al* 1998; León, 1997; Cabrera y Bouzo, 1999).

### **La materia orgánica, el N total e hidrolizable**

Tanto la literatura nacional como foránea plantean que la materia orgánica constituye la gran reserva de nitrógeno del suelo, coincidiendo que aproximadamente el 5 % de la misma es nitrógeno, del que se mineraliza cada año entre el 1 y el 3 %, por lo que el conocimiento de esta variable constituye una medida de disponibilidad de nitrógeno asimilable por la planta (Bautista *et al*,1998; Bautista y Durán, 2001; Arzola y Alfonso, 2001).

En la actualidad, todavía no se ha encontrado un método que separe completamente la materia orgánica de la parte mineral del suelo, siendo necesario determinar la materia orgánica en forma indirecta (Hernández, 1996).

En general los investigadores han coincidido en aceptar que el carbono orgánico constituye el 58 % de la materia orgánica estable del suelo (humus), por lo que la estimación de esta última es posible a través de la determinación del carbono orgánico multiplicado por 1,724 (conocido por factor de Van BEMMEN). La materia orgánica del suelo no es de naturaleza uniforme y los diferentes métodos analíticos que hoy se disponen comprenden en mayor o menor grado las formas menos asequibles para las plantas (Jenkinson y Rayner, 1997; Körshens et al, 1998; Benintende *et al*, 2000).

Los valores de materia orgánica en Cuba para la caña de azúcar inferiores a 2 % son considerados bajos, entre 2 y 4 % medios y por encima de 4 altos (León, 1993). Arzola y Alfonso (2001) estudiaron en un suelo Sialitizado no cálcico la influencia del laboreo del suelo, el cultivo de la caña de azúcar y la aplicación de abono orgánico sobre el contenido de materia orgánica y algunas propiedades asociadas con este importante componente del suelo, demostrando que el cultivo continuado de la caña de azúcar aumenta el contenido de carbono orgánico, así como la fracción ligera y gruesa del carbono del suelo.

Para el cultivo de la caña de azúcar León (1993) asumió que los suelos con menos de 80 mg/kg de nitrógeno hidrolizado se consideran bajos, mientras que niveles de 80 y 130 mg/kg son medios y superiores a 130 altos.

Muchos autores reconocen a la MOS como importante factor a considerar en el manejo de la nutrición nitrogenada, llegando a fijar límites por debajo de los cuales se incrementa la necesidad de aplicar fertilizantes nitrogenados (Hernández, 1996; Pérez, 1999; Bautista y Durán 2000; Bautista *et al*, 2000; Bautista y Durán, 2001; Arzola y Alfonso, 2001.)

### **Consideraciones económicas en el manejo de los fertilizantes**

Norman Borlaug, Premio Nóbel de la Paz, plantea que para alimentar a 6 billones de personas, cada año, se necesita una producción anual de granos comparable a una gigante autopista pavimentada de granos de cereal, capaz de rodear a la tierra por la línea ecuatorial, con un grosor de 2,5 metros y un ancho de 20 metros. A esta autopista



se le debe incorporar cada año 1050 kg para alimentar a las personas que nacieron en ese lustro (Citado por Terry, 2002).

Además se estima que para el 2025 el fondo de tierra per capita dedicada a la producción de alimentos será menor de la mitad de lo que fue en 1965, cuando la población mundial era sólo 3,3 billones de habitantes. No obstante con el continuo aumento en la demanda de alimentos, cabría esperar que la agricultura fuese un negocio floreciente y atractivo, sin embargo los agricultores hoy enfrentan condiciones de bajos precios de sus productos y presiones económicas para adquirir los insumos (Murrell y Munson, 1999).

Los países productores de caña de azúcar por lo general son notables consumidores de fertilizantes minerales, Cuba en relación con otros países muestra elevadas tasas de utilización que están al nivel de los países desarrollados, teniendo en cuenta que dosis medias superiores a 125 kg/ha se consideran valores mundialmente altos.

En la década del 80 el MINAZ llegó a invertir, cada año, entre 70 y 80 millones de USD en la compra de fertilizantes minerales, de los cuales, alrededor de 44 % fueron para portadores nitrogenados, que se aplicaron a más de un millón de hectáreas, correspondientes a 155 ingenios azucareros. Estos gastos fueron reducidos fuertemente a inicios de los años 90 con la caída del campo socialista, y entrada en vigencia del Período Especial.

Los análisis económicos precisos deben considerar todos los costos e ingresos asociados con la fertilización. Al calcular los costos deben tenerse en cuenta que hay insumos que se amortizan en período mayor a un año, como es el caso de la toma de muestras de suelo que pueden ser evaluada para un ciclo completo (Terry, 2002).

García (2000) al referirse al cálculo de los ingresos generados por la fertilización a partir del incremento en los rendimientos, demostró en experimentos de larga duración que el análisis de suelo es un importante indicador para determinar la probabilidad de respuesta a la fertilización. El autor concluye afirmando que es posible manejar la rentabilidad de cualquier sistema de producción considerando otros factores y no solamente a través de la reducción de los costos, si además se tiene en cuenta: la fertilización específica por lote y cultivo, el monitoreo de los suelos de forma periódica, la planificación a largo plazo y el desarrollo de bases datos.

Del mismo modo Terry, (2002) plantea que la reducción de los costos usando menos insumos, con su consecuente reducción en la producción, no permite obtener más ganancias, solamente rendimientos altos dan una mejor oportunidad de ser rentable, pues a partir de altos niveles de producción viabiliza la distribución de los costos en un mayor número de unidades producidas, aún cuando los precios del producto sean bajos. Además de constituir un claro indicativo de utilizar prácticas de manejo que promuevan la sostenibilidad del sistema y amigables con el ambiente.

### 3. MATERIALES Y METODOS

La elaboración de este trabajo comprendió resultados de 291 experimentos de campo, a los que se efectuaron 1747 cosechas. Los ensayos fueron conducidos por investigadores y técnicos de la red nacional de estaciones experimentales del Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar, con la orientación técnica de las Normas Metodológicas del Departamento de Suelos y Agroquímica (INICA, 1990).

Los estudios se encontraron distribuidos en diversas zonas edafoclimáticas del país, lo que permitió abarcar una amplia variación en cuanto a la disponibilidad y capacidad de asimilación del nutriente estudiado y factores edáficos y climáticos con él vinculado. Los experimentos se condujeron en condiciones de secano, enterrando el fertilizante a una profundidad de aproximadamente 10 cm a ambos lados del surco en los retoños. En todos los casos, salvo los experimentos de fraccionamiento, el fertilizante para los retoños se aplicó inmediatamente después del corte (dentro de los 30 días siguientes a la cosecha). En las cepas de planta el fertilizante se aplicó en el fondo del surco al momento de la plantación. Los portadores nitrogenados utilizados fueron indistintamente urea, sulfato de amonio y nitrato de amonio. Los portadores utilizados en los fondos PK fueron: superfosfato sencillo, superfosfato triple y cloruro de potasio.

Las muestras de suelo fueron tomadas en los primeros 25 cm de profundidad del perfil, coincidiendo con la zona que concentra más de 85 % del sistema radical de la caña de azúcar (INICA, 1990). Las muestras de suelo, para su análisis, fueron secadas al aire, molidas y pasadas por tamiz de 1 mm.

Las parcelas experimentales utilizadas tuvieron un área de cálculo de 48 m<sup>2</sup>, en las que su masa por lo general fue determinada de forma directa, con la utilización de un dinamómetro y sólo en un reducido número de cosechas, por estimación según los criterios de Milanés y Pardo (1978), tras corroborar en algunos ensayos la aceptable correspondencia de los resultados estadísticos entre ambos métodos.

#### 3.1 Descripción de los análisis químicos realizados

Con el propósito de conocer el estado nutricional del suelo se analizaron muestras tomadas en las parcelas de los experimentos. Los análisis de suelo se realizaron según el Manual de Métodos de Laboratorio del INICA (Cabrerá, 1984). Una breve descripción de los métodos empleados se muestra en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Determinaciones analíticas realizadas a la red de experimentos del INICA.

Determinación	Unidades	Método analítico
Materia orgánica	Porcentaje	Colorimétrico de Walkey-Black: $K_2Cr_2O_7$ 1N (ox.) y $FeSO_4 \cdot 7 H_2O$ 0.5N (red.)
pH en agua y KCl	$-\log [H^+]$	Potenciométrico. Relación Suelo/Solución 1:2,5
Calcio Intercambiable	$Ca^{++}$ cmol(+)/kg	Extracción con $NH_4OAc$ 1N a pH 7.
Magnesio Intercambiable	$Mg^{++}$ cmol(+)/kg	Extracción con $NH_4OAc$ 1N a pH 7.
Potasio Intercambiable	$K^+$ cmol/kg	Extracción con $NH_4OAc$ 1N a pH 7. Determinación por fotometría de llama
Fósforo asimilable	$P_2O_5$ mg/100 g	Oniani: Ext. con $H_2SO_4$ 0.1N; Bray-Kurtz II: Ext. con $NH_4F$ 0.03 N + HCl 0.01N. Relación suelo/solución 1:10
Potasio asimilable	$K_2O$ mg/100 g	Oniani: Extracción con $H_2SO_4$ 0.1N
Acidez hidrolítica	$H^+$ cmol/kg	Extracción con $NaAc$ 1N a pH 8.2

### 3.2 Procedimiento utilizado

La diversidad de modelos experimentales y la heterogeneidad de la base de datos obligó a diseñar una metodología que permitiera el análisis de la vasta información disponible. La secuencia de pasos seguidos para lograr el objetivo propuesto fue:

- Preparación de la base de datos.
- Estimación de las dosis de nitrógeno.
- Evaluación económica de las recomendaciones.
- Análisis del riesgo de las respuestas.

#### 3.2.1 Preparación de la base de datos

Entre los múltiples objetivos que ha trabajado el INICA durante los últimos años se encuentran la creación y desarrollo de un sistema automatizado, para ordenar y proteger la información generada por los experimentos de campo denominado Sistema de Información de Experimentos (SIDE), y un sistema PERFIL que soporta la información procedente de los perfiles de suelos asociados a los experimentos, creados *ex profeso*.

De la base de datos SIDE se seleccionaron los experimentos de Nitrógeno, cualesquiera que fueran su diseño y tipo, comprendiendo estudios de: niveles de nitrógeno, nitrógeno por variedades, nitrógeno por cepas, fraccionamiento de nitrógeno y factoriales NPK completos y confundidos.

Para ampliar la información, los experimentos de niveles por variedades, fraccionamiento, elementos por cepas y otros que implicaban arreglos bi y tri factoriales fueron descompuestos para ser analizados como un número “n” de experimentos de niveles. Estas modificaciones se aceptaron en el procesamiento final después de analizarse el grado y sentido de la afectación que podría ocurrir con los errores experimentales (Fig. 1).

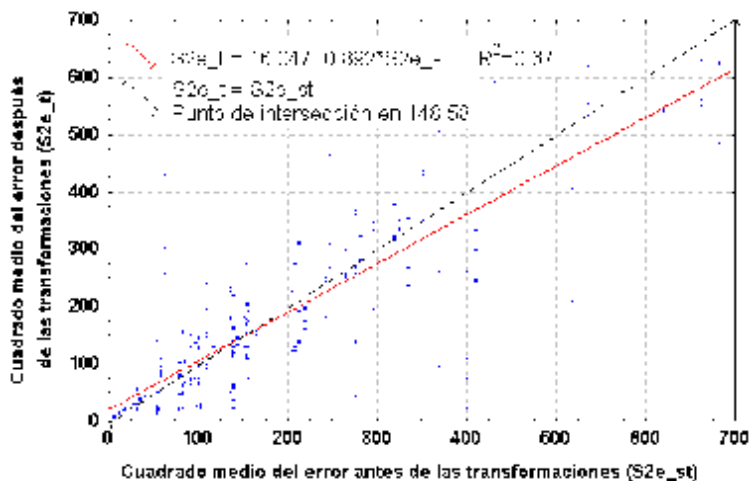


Figura. 1: Relación entre las varianzas de los errores antes y después de dividir los experimentos.

Los experimentos de niveles que tenían tratamientos sin fertilizantes fueron nuevamente analizados, separando ese tratamiento. Posteriormente se ajustó cada cosecha a un modelo discontinuo (Figura 2) y se registró en una base de datos la información generada por el mismo, los resultados del análisis de varianza, los datos generales del experimento y la información de los perfiles asociados.

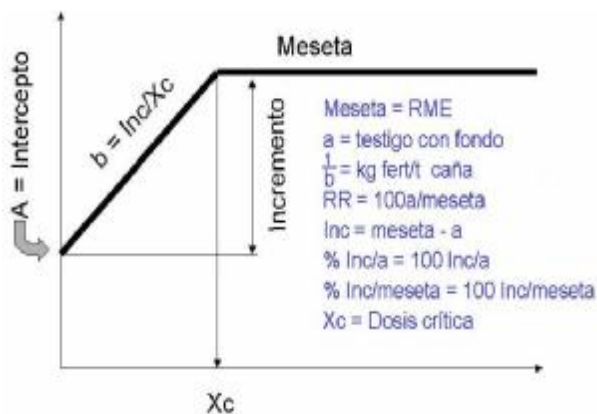


Figura 2: Modelo discontinuo al que se ajustaron los resultados de las cosechas

Creada la base de datos, contentiva de la información de las cosechas, se procedió a su validación y depuración. Primeramente se analizó el estado de la información y posteriormente se procedió a la estimación de las variables funcionalmente dependientes.

Para el procesamiento estadístico matemático se agruparon los experimentos en función de su error experimental. El conjunto de experimentos se dividió progresivamente en dos poblaciones hasta alcanzar una magnitud del error cuya diferencia con el grupo de menor error determinó su segregación, para lo que se utilizó como criterio (o dócima) un modelo de varianza totalmente aleatorizado, donde la varianza del numerador es la del grupo de experimentos (o cosechas) con los que se trabajó. Los valores de F, incrementos de producción, varianzas de tratamientos, varianzas de errores, errores típicos de las medias, coeficientes de variación de los errores experimentales y probabilidades del error  $\alpha$ , se sometieron a análisis factorial de componentes principales.

Se utilizó una prueba de una cola, aceptándose una probabilidad del error  $\alpha$  de 10 % y no 5 % como es habitual. Los criterios de segregación asumidos fueron:

- Probabilidad de error  $\alpha < 1$  e incremento de rendimiento  $< 10$
- Probabilidad de error  $\alpha$  entre 10 y 20 e incremento de rendimiento  $< 10$
- Probabilidad de error  $\alpha$  entre 20 y 30 e incremento de rendimiento  $< 20$
- Probabilidad de error  $\alpha > 30$  e incremento de rendimiento entre 10 y 30

La base de datos original comprendió 1747 cosechas, tras la aplicación de los criterios y condiciones antes señaladas quedó reducida a 1219. Los datos seleccionados fueron sometidos a modelación matemática de acuerdo con el criterio lineal discontinuo, modificados según las siguientes condiciones:

Si:	Se asume que:	Entonces:
Probabilidad $> 10$	No hay diferencias significativas	a = Meseta b = 0 Xc = 0 RR = 100
a $>$ Meseta	No hay diferencia	a = Meseta b = 0 Xc = 0 RR = 100
CV <sub>(ERROR)</sub> $< 5$ ó $> 15$ %	Problemas en el experimento	No se considera

Donde: a, b y Xc son coeficientes del modelo discontinuo; RR es el rendimiento relativo; CV es el coeficiente de variación y la probabilidad es la del error  $\alpha$ .

Luego, partiendo de la condición que el uso de los fertilizantes minerales incrementa la producción, se formularon las hipótesis nula y alternativa:

$H_0$ : El fertilizante no incrementa el rendimiento.

$H_1$ : El fertilizante incrementa el rendimiento.

#### 3.2.2 Procedimiento para la estimación de las dosis

Con el fin de estimar las dosis a partir del análisis de la información disponible se realizaron los siguientes pasos:

- Selección de las variables que determinan la respuesta.
- Determinación de condiciones similares o disímiles que intervienen en la respuesta.
- Calibración de los factores que determinan la respuesta para diferentes condiciones.
- Modelación de las dosis en función de la calibración de los factores.

La secuencia de pasos para realizar el procesamiento de cada una de las bases de datos fue el siguiente:

1. Análisis multivariado para determinar las variables que mejor explicaban la varianza total de las matrices de datos y sus relaciones.
2. Análisis de regresión múltiple para determinar los niveles de relación entre las variables seleccionadas y la respuesta a las aplicaciones de fertilizantes.
3. Análisis de varianza, regresiones univariadas y gráficos de “caja y patilla” para detectar las condiciones similares (o disímiles) de respuestas.
4. Análisis de regresión univariada y multivariada para modelar la calibración de los factores y de las dosis.

#### 3.2.3 Fundamentos para la evaluación económica de las recomendaciones

El principio económico utilizado se apoyó en la comparación hipotética de los incrementos obtenidos en función del rendimiento alcanzado por las dosis aplicadas, generando en el caso 1 ingresos superiores a los egresos (Figura 3). Mientras que en caso 2 a pesar de obtener mayores ingresos la dosis aplicada no es redituable respecto a los resultados productivos, pues se obtienen pérdidas económicas.

Las dosis de fertilizantes fueron expresadas mediante funciones. La función para el cálculo de las dosis se muestra en el primer cuadrante de la Figura 3 y en el cuarto los egresos producidos por su aplicación. Se tiene:

$$\text{Dosis} = f(v_1, v_2, \dots, v_n)$$

Donde:  $v_1, v_2, \dots, v_n$ , son variables asumidas como criterios para la estimación de las dosis (p.e. rendimiento esperado, cepa, tipo de suelo, etc.).

Como el precio de los fertilizantes no depende de la cantidad a emplear sino que es fijo, la función de los egresos es continua:

$$E = pf * Dosis$$

Donde: E son los egresos y pf es el precio de los productos activos en \$/kg para diferentes portadores, incluyendo los gastos asociados.

El precio asumido para la urea fue de 0.88 y el del amoniaco 0.60 \$/kg. En ambos casos se incluyó el precio estabilizado más 6 % de recargo comercial de la empresa Paz Borroto, 2.5 % de recargo comercial de las UCAI, costo de aplicación y costo de transportación desde las mismas.

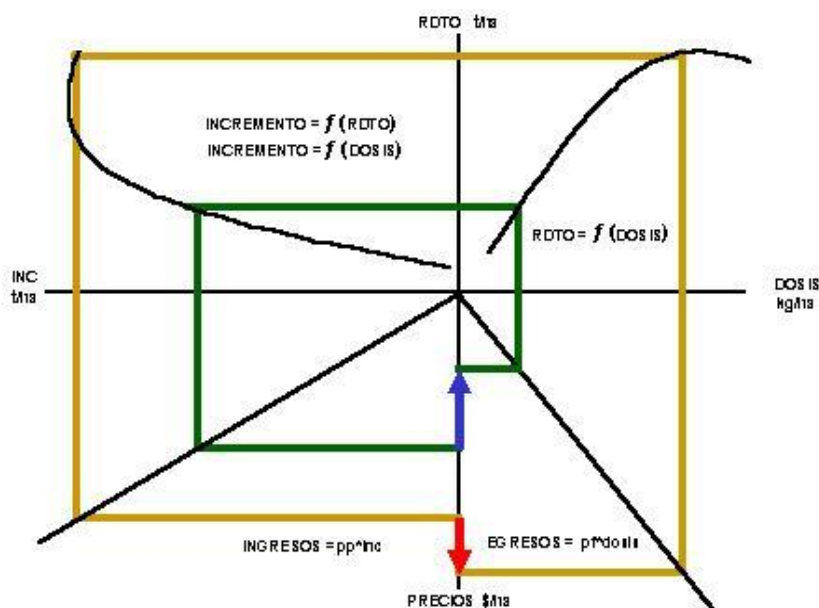


Figura 3. Esquema del procedimiento seguido para la evaluación económica de las recomendaciones (Adaptado de Alle, 1967). Se muestran: Caso 1 (verde) efecto económico favorable de la fertilización; Caso 2 (amarillo) efecto económico desfavorable de la fertilización.

Los incrementos en la producción, modelados en función de las dosis, están representados en el segundo cuadrante de la Figura 3 y en el tercero los ingresos generados por los incrementos alcanzados.

$$Inc = f(Dosis)$$

Donde: Inc son los incrementos en t/ha. La dosis están expresadas en kg/ha de N.



Los ingresos están dados por:

$$I = pp * Inc$$

Donde: I representa los ingresos en \$/ha y pp el precio de la producción en \$/t (p.e. Precio de la tonelada de caña = \$ 11.05 MN descontando los gastos de corte, alza y tiro).

La diferencia entre los ingresos y los egresos es el valor presente neto (VPN):

$$VPN = I - E$$

o sea

$$VPN = pp * Inc - pf * Dosis$$

Donde: VPN es el valor presente neto en \$/ha.

La función VPN igualada a cero permite estimar las dosis extremas (aquellas en las que los ingresos son iguales a los egresos) y las dosis económicas (intervalo comprendido entre las dosis extremas, correspondiendo con aquellas en las que los ingresos son mayores que los egresos). Así:

$$VPN = 0$$

Implica:

$$pp * Inc = pf * Dosis$$

por tanto:

$$pp/pf = Dosis/Inc$$

Lo que indica que el equilibrio económico se alcanza cuando la relación dosis/incremento es igual a la relación precio de la caña/costo del fertilizante. Así, para que se produzcan beneficios económicos debe cumplirse que:

$$pp/pf > Dosis/Inc$$

Para apreciar esquemáticamente este efecto compárense los casos 1 y 2 ( Figura 2).

La dosis óptima corresponde al VPN máximo, lo que se obtiene igualando a cero la primera derivada del valor presente neto con respecto a la dosis:

$$d(VPN)/d(Dosis) = 0$$

sustituyendo y derivando se obtiene:

$$d(VPN)/d(Dosis) = pp * d(Inc)/d(Dosis) - pf = 0$$

de donde

$$d(Inc)/d(Dosis) = pf/pp$$

lo que expresa que la dosis óptima se encuentra donde la pendiente de la función incremento es igual a la relación precio del fertilizante/precio de la producción.

Para conocer cual es el incremento del rendimiento a partir del cual una dosis es redituable, se halló el producto de la dosis en cuestión por el inverso de la relación entre el precio del fertilizante y el precio de la producción.

#### **3.2.4 Fundamentos para la evaluación del riesgo de la respuesta**

El procedimiento seguido comprendió:

- Cálculo de las probabilidades de respuesta para incrementos de producción múltiples de 10, registrados en las bases de datos, teniendo en cuenta las condiciones de igualdad de respuesta a las que se arribaron en la determinación de las dosis.
- Incorporación de las probabilidades calculadas a la base de datos.
- Modelación de la respuesta en función de los incrementos y las dosis.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de los datos de cosechas, en correspondencia con los incrementos producidos, unido a la probabilidad del error  $\alpha$  y al coeficiente de variación, mostró que a cosechas altamente significativas podía corresponder, ocasionalmente, un nivel muy bajo de incremento del rendimiento, y viceversa, es decir, a cosechas sin diferencias significativas podía corresponder alto incremento del rendimiento. Esta dificultad se solventó rechazando las observaciones dudosas y reajustando los resultados de los modelos discontinuos.

Los intentos para relacionar variables con el rendimiento relativo, con todas las cosechas, resultaron infructuosos. Esto era de esperarse, normalmente para procesar un gran volumen de información hay que agrupar o discriminar la misma, lo que constituye una tarea importante para la debida explotación de los datos. En la forma adoptada para agrupar los experimentos, o las cosechas, intervinieron criterios lógicos, económicos y edafológicos.

El análisis de componentes principales, realizado con los datos de las cosechas de nitrógeno, explicó en los 3 primeros ejes 80 % de la varianza total de las variables analizadas. En el primer componente se encontraron las propiedades del suelo y en el segundo el rendimiento, no teniendo peso los errores experimentales ni las variedades como se muestra en la Figura 4.

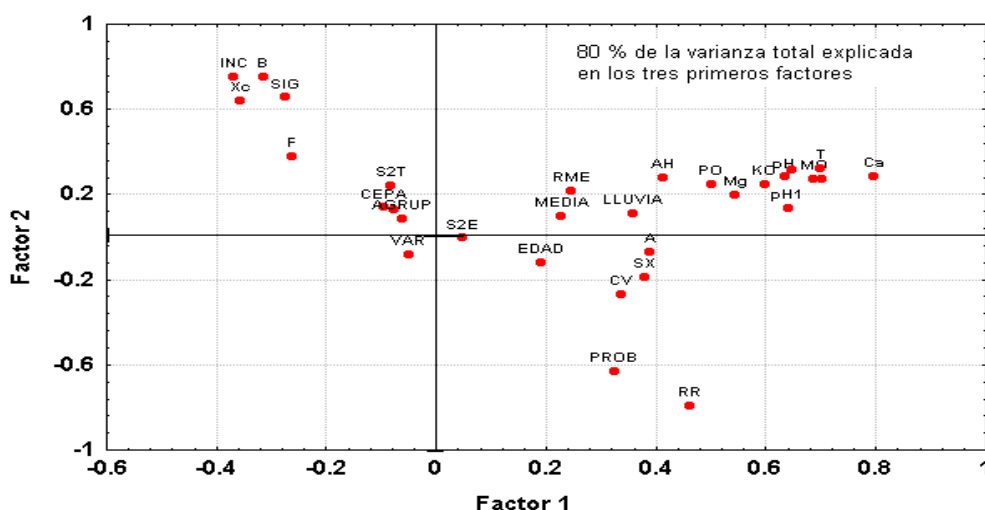


Figura 4. Análisis de componentes principales para las cosechas de nitrógeno.

Las variables descritas en el análisis de componentes principales fueron: incremento (INC), dosis (Xc), coeficiente de regresión de los modelos lineales (B), respuestas

significativas (SIG), F de Fisher (F), varianza de los tratamientos (S2T), varianza del error (S2E), agrupamiento agroproductivo de suelo (AGRUP), subtipo de suelo según la II Clasificación Genética (SUELO, oculto en la figura detrás de AGRUP), variedades (VAR), edad (EDAD), rendimiento agrícola medio de los tratamientos (MEDIA), rendimiento máximo estable (RME), lluvia (LLUVIA), rendimiento agrícola del testigo con fondo (A), coeficiente de variación del error (CV), probabilidad del error  $\alpha$  (PROB), error típico (SX), rendimiento relativo (RR), acidez hidrolítica (AH), fósforo asimilable (PO) y potasio asimilable (KO), calcio intercambiable (Ca), magnesio intercambiable (Mg), potasio intercambiable (K), materia orgánica (MO), pH en agua (PH), pH en KCl (PH1) y capacidad de cambio catiónico (T).

A partir de los resultados del análisis de componentes principales se realizó un análisis de regresión por el método paso a paso (STEPWISE), dando como resultado el modelo mostrado en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Modelo de regresión de la respuesta al nitrógeno (n = 1219).

Factores	B	Error Est. B	t	Probabilidad
Intercepto	89.50617*	2.181543*	41.02884*	0.000000*
Cepa	-0.49577*	0.163095*	-3.03976*	0.002432*
Edad	0.66166*	0.116577*	5.67578*	0.000000*
Suelo	-0.04408*	0.022040*	-1.99974*	0.045724*
Agrupamiento <sup>1</sup>	-0.66046*	0.200525*	-3.29365*	0.001014*
pH en agua	0.99362*	0.153718*	6.46391*	0.000000*
pH en KCl	-1.00060*	0.233238*	-4.29003*	0.000019*
Materia Orgánica	1.07239*	0.403641*	2.65679*	0.007980*

<sup>1</sup> Agrupamiento Agroproductivo

El análisis de los factores relacionados con el fertilizante nitrogenado, a partir de las ecuaciones obtenidas de la regresión, mostró que influían sobre la respuesta, expresada por el rendimiento relativo (RR): el suelo, la cepa, la edad, la materia orgánica y la reacción del suelo (pH en agua y en cloruro de potasio).

El análisis de varianza de los diferentes factores con respuesta ante la fertilización nitrogenada (RR), mostró un comportamiento semejante al observado en el análisis de componentes principales, destacándose el efecto de la cepa, el suelo (agrupamiento agroproductivo y también el subtipo de la II Clasificación Genética de Suelos de Cuba), la edad y la materia orgánica (Cuadro 4).

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSION

El efecto de la edad está relacionado con el de la cepa. Aunque el factor provincia resultó destacado, debe tenerse en cuenta que en él se reflejan efectos del suelo, lluvia, variedades, etc., los cuales fueron disímiles en las diferentes provincias.

Cuando se seleccionaron solo las cosechas de plantas, los factores cepa (primaveras del año, primaveras quedadas y fríos) y edad, dejaron de ser significativos.

Cuadro 4. Factores que afectaron la respuesta al N según el análisis de varianza del RR.

Factores	S <sup>2</sup> Tratamientos	S <sup>2</sup> Error	F	Probabilidad
Para todas las cepas				
Provincia	3286.68	172.35	19.8	0.000 *
Cepa	2498.73	180.24	13.5	0.000 *
Variedad	392.46	188.37	2.08	0.000 *
Edad	1207.45	182.29	6.62	0.000 *
Suelo	1325.26	168.77	7.85	0.000 *
Agrup. Agrop.	1798.59	183.55	9.80	0.000 *
Lluvia	383.67	91.79	4.18	0.000 *
R. Max. Est	197.34	193.97	1.01	0.425 NS
A	329.9	170.79	1.93	0.000 *
pH-H <sub>2</sub> O	287.99	160.84	1.79	0.000 *
pH- KCl	66.04	203.09	0.81	0.807 NS
Materia orgánica	1166.86	193.26	6.03	0.000
Sólo para cepas de plantas				
Provincia	128.3	67.36	1.90	0.036 *
Cepa	71.89	68.83	1.04	0.350 NS
Variedad	120.32	65.18	1.85	0.004 *
Edad	48.73	70.29	0.69	0.801 NS
Suelo	202.36	57.77	3.50	0.000 *
Agrup. Agrop.	260.04	64.96	4.00	0.000 *
Materia orgánica	212.04	84.50	2.51	0.030 *

#### 4.1 Factores relacionados con la fertilización nitrogenada

##### Los factores cepa y suelo

El análisis de las medidas de tendencia central por cepas y agrupamientos de suelos, con relación a la respuesta ante la fertilización nitrogenada, mostró comportamientos diferentes. En el análisis para todos los suelos, se observó un aumento de la respuesta,

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSION

según avanzaba el número de cortes, aunque a partir del quinto retoño fue más dispersa, encontrándose casos en los que no había respuesta (Figura 5).

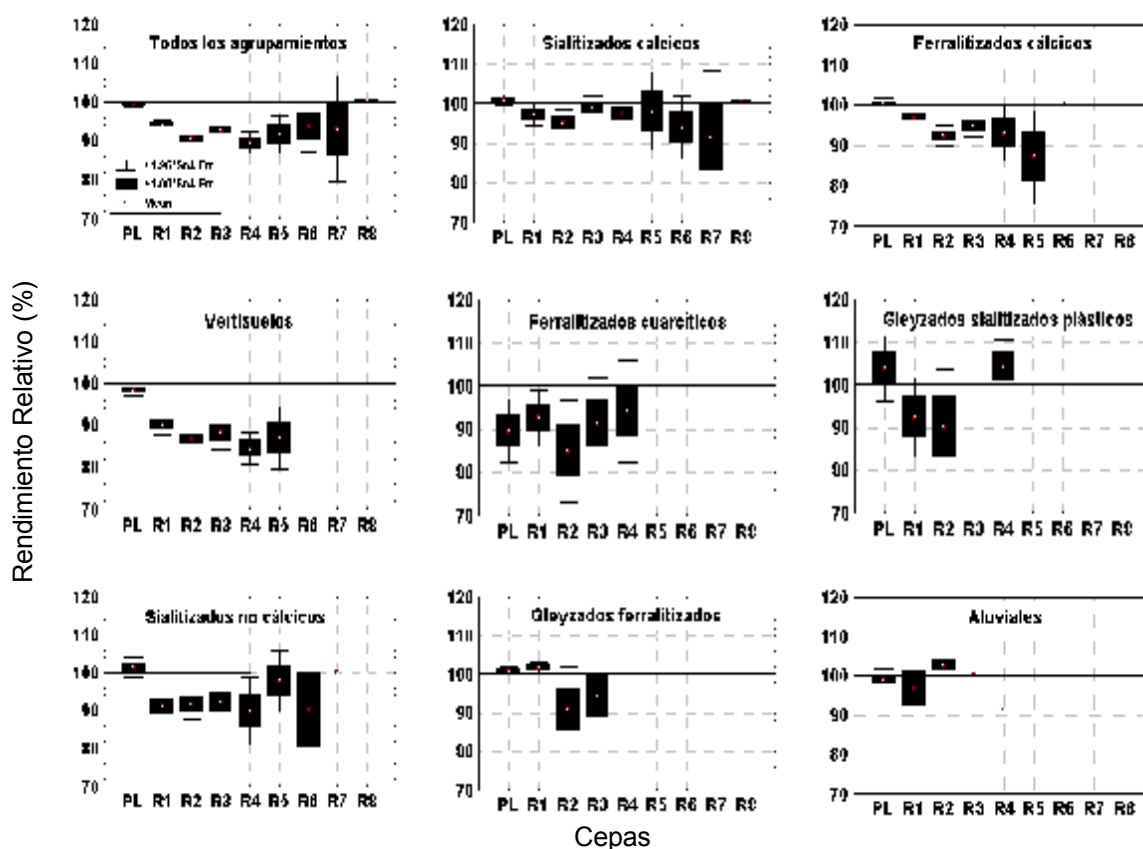


Figura 5. Efecto de la fertilización nitrogenada por cepas en distintos agrupamientos de suelo

En el análisis por agrupamiento agroproductivo se observó que en los suelos Ferralitizados cuarcícos, la cepa no tenía efecto sobre la respuesta del cultivo ante la aplicación de fertilizantes nitrogenados, pues en todas se encontró un aumento en el nivel de producción, este resultado parece estar inducido por los niveles de MOS que pueden ser bajos y por tanto escasas las reservas de N, así como que en los Vertisuelos y los Aluviales la respuesta era leve en las cepas de planta, lo que también ocurrió con los Gleyzados sialitizados plásticos, de considerarse la total amplitud del intervalo de confianza de 95 %, a pesar de ser suelos afectados por hidromorfía, sin que en los restantes grupos se manifestara efecto positivo digno de destacar (Figura 5). Los efectos observados en los Vertisuelos, Gleyzados sialitizados y Aluviales, podrían estar relacionados con el sobre-humedecimiento.

La exigua manifestación de efectos positivos de la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento agrícola de cepas de plantas, en el cultivo de la caña de azúcar, es un hecho reiterado, reportado por numerosos autores en Cuba (Cuellar, 1974; Alomá, 1983; Villegas *et al.* 1983; Pérez, 1985; Angarica, 1985; Iznaga, 1986; León y Lorenzo, 1987; García, 1987; León 1990; Cabrera y Bouzo, 1999; Pineda, 2001; Rodríguez y Osorio, 2001) y en otros países cañeros (Samuels y Capó, 1956, Wood, 1968, Fogliata, 1973, Husz, 1972; Fasihi *et al.* 1980; Mutanda, 1983; Pérez, 1999 y CFSEMG, 1999).

De acuerdo con León (1990), la nutrición nitrogenada está muy ligada a la mineralización de la materia orgánica del suelo, pues la transformación de los compuestos nitrogenados presentes en la misma, primero a amonio y después a nitritos y nitratos, formas asimilables del nitrógeno, ocurre en condiciones aeróbicas, mientras que la reducción biológica de los nitratos, importante vía de pérdida del nitrógeno, ocurre en condiciones anaeróbicas; de allí que una mejor estructura del suelo, que mejore la aireación, acrecienta la actividad de los organismos responsables de la mineralización en tanto que reduce la actividad de los denitrificantes, todo lo cual favorece la disponibilidad y suministro de nitrógeno para las plantas. Estas condiciones, según expresa de León, (1990) se les propician a las cepas de planta a través de las labores de preparación del suelo que preceden a la plantación, las que además de atenuar los efectos de la compactación, incorporan restos vegetales, aumentando el contenido de materia orgánica del suelo, mejorando además las condiciones para el desarrollo del sistema de raíces. A conclusiones similares han arribado Fogliata (1973), Pérez (1982), Angarica, *et al.* 1990, Rodríguez y Osorio (2001). Por otra parte, según Samuels y Capó (1956) y García (1987), las cepas de planta realizan una menor extracción de nitrógeno.

Iznaga (1986), en suelo Ferralíticos rojos, muy difundidos en el país, sobre todo en la mitad occidental, no sólo observó total ausencia de respuesta en cepas de planta ante la aplicación de fertilizantes nitrogenados, sino que en los demás cortes, se alcanzaba un máximo en el segundo retoño, a partir del cual comenzaba a disminuir el efecto sobre el rendimiento agrícola, hasta que en el quinto retoño la respuesta estaba ausente. Esto corresponde con la difusión observada en este estudio en las cepas más viejas. Iznaga (1986) atribuyó este efecto a la acumulación de materia orgánica a causa de las raíces y plantones muertos durante todo el ciclo, unido a condiciones físicas propicias para su adecuada descomposición y mineralización en la parte central de cada cepa de caña de

azúcar, así como que en las más viejas, los espacios vacíos contribuían a un menor aprovechamiento del fertilizante.

El tipo de arcilla predominante en el suelo también puede jugar un importante papel en el aprovechamiento de los fertilizantes nitrogenados por las plantas. El predominio de arcillas del tipo 2:1 produce a agrietamiento, que puede provocar daños al sistema radical limitando la capacidad de las plantas para tomar nutrientes del suelo (Agafonov *et al.* 1973). A este tipo de arcilla se atribuye también fijación incambiable de nitrógeno amoniacal.

Agafonov *et al.* (1978) destacaron además que la plasticidad de estos suelos afecta la estructura, limitando el intercambio de oxígeno del sistema de raíces con el ambiente, por lo que influye en la manifestación de estados anaeróbicos por largo período de tiempo.

El predominio de este tipo de arcillas en unos suelos, y el intenso lavado de nitrógeno en otros, así como la presencia de hidromorfía o compactación, son en general las circunstancias que llevaron a la manifestación en mayor o menor grado de respuesta en las cepas de planta en los distintos grupos de suelos.

Los grupos de suelos, segregados por su mayor o menor propensión de efectos positivos ante la fertilización nitrogenada sobre las cepas de planta fueron los siguientes:

Grupo 1: Respuesta probable en cepas de planta	Grupo 2: Respuesta poco probable en cepas de planta
q Vertisuelos	q Sialitizados cálcicos
q Ferralitizados cuarcíticos	q Sialitizados no cálcicos
q Gleyzados sialitizados plásticos	q Ferralitizados cálcicos
q Aluviales	q Gleyzados ferralitizados

#### **El factor materia orgánica del suelo**

La relación entre la materia orgánica del suelo (MOS) y el rendimiento relativo mostró que en la medida en que los niveles de materia orgánica eran menores, mayor era la respuesta. Con porcentajes de materia orgánica mayores que 6 % no se observó respuesta, por otra parte ésta se incrementó rápidamente cuando los porcentajes de materia orgánica fueron menores que 3 % (Figura 6).



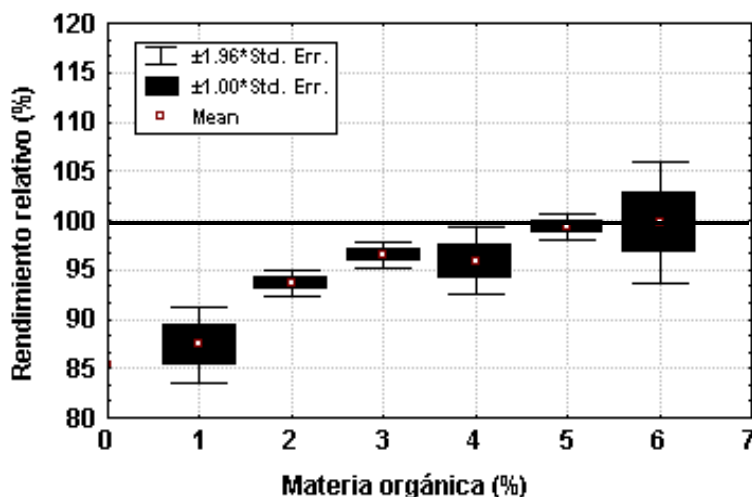


Figura 6. Relación entre la materia orgánica del suelo y el rendimiento relativo

A semejantes resultados han llegado diferentes autores, entre ellos Hernández (1996), trabajando en suelos Ferralíticos cuarcíticos de la provincia Sancti Spíritus y Pérez (1999) en diferentes suelos de Tucumán, Argentina, todos ellos dedicados al cultivo de la caña de azúcar. Así Hernández, al relacionar las propiedades del suelo con la respuesta de las cepas de planta ante las aplicaciones de nitrógeno encontró dos grupos perfectamente definidos: uno donde las cepas de planta respondían a la fertilización nitrogenada, con valores de materia orgánica inferiores a 2.5 %, y otro sin respuesta, al que correspondía los porcentajes de 2.5 en adelante. Fue tal el efecto observado por este autor, que asumió el contenido de materia orgánica, conjuntamente con el rendimiento esperado, como criterios para el establecimiento de dosis de nitrógeno en cepas de planta para los suelos estudiados. Por su parte Pérez (1999) encontró, en el contenido de materia orgánica del suelo explicación a las variaciones de los incrementos del rendimiento debidos a fertilización nitrogenada, lo que en su trabajo estuvo en correspondencia con los resultados obtenidos con las determinaciones de la capacidad de mineralización de nitrógeno del suelo. Este autor estableció tres categorías: menor que 2 % de materia orgánica, de 2 a 3, y mayor que 3, asociadas a incrementos decrecientes del rendimiento ante la fertilización.

También, Rodríguez y Osorio (2001) consideraron que la MO es un importante índice relacionado con la nutrición nitrogenada, al mostrar que los contenidos de la misma disminuyen con las cosechas sucesivas, lo que puede ser una explicación de por qué la frecuencia de respuesta de la caña de azúcar a la fertilización nitrogenada se incrementa con el envejecimiento de la cepa hasta cierto límite.

El comportamiento entre la MOS y la respuesta de la caña de azúcar ante la aplicación del nitrógeno, manifiesto en el presente estudio bajo condiciones de suelos monocultivados, constituye un criterio de prioridad al momento de aplicar fertilizantes nitrogenados en aquellos suelos que presentan valores de materia orgánica menores a 2,5 %. León *et al.*, (2001b) estudiaron los factores que influyen en la transformación de la MOS encontrando que el cultivo continuado con caña de azúcar aumentó el contenido de carbono (C) orgánico, su fracción ligera y el N total del suelo, representado en un modelo predictivo para modificar las cantidades de portadores nitrogenados aplicados al suelo.

### **El factor lluvia**

En los análisis de segregación y varianza realizados, así como en los modelos de regresión obtenidos, la lluvia formó parte del grupo de factores que mostraron influencia sobre la respuesta del cultivo ante las aplicaciones de nitrógeno. El efecto de las lluvias sobre los cultivos agrícolas ha sido estudiado por numerosos investigadores (Tamm, 1958; Allen *et al.* 1968; Angarica, 1972; Henderson *et al.* 1977; Alcock y Morton, 1985; León, 1997; Arzola *et al.* 1998, Cabrera y Bouzo, 1999; Rodríguez y Osorio, 2001).

En la mayoría de los estudios los autores coinciden sobre la acción contribuyente de las lluvias en la satisfacción de las necesidades del N por las plantas, fundamentada por remoción a partir de la atmósfera y el retorno al suelo de parte de los compuestos volátiles que como el amoníaco y óxidos de nitrógeno se habían perdido, así como otros compuestos formados por la acción fotoquímica, descargas eléctricas y combustión de carburantes, pudiendo estar la magnitud de este aporte entre 16 y 28 kg/ha al año (Infante, 1988; León, 1997; Rodríguez y Osorio, 2001). Además, conociendo que las plantas toman el N en mayor cuantía por las raíces, en forma de iones  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$  provenientes de la solución del suelo, numerosos reportes coinciden al plantear que de existir deficiencias de este nutrimento, las raíces necesitarían mayor cantidad de agua para tomarlo.

En las recomendaciones de fertilizantes nitrogenados correspondientes a la década de los 80 en Cuba, López (1981) consideró la lluvia como un factor más a tener en cuenta para el cálculo de las dosis, en atención a su efecto sobre el rendimiento agrícola, así a mayor lluvia mayor aporte de nitrógeno para compensar el mayor consumo del nutriente por la planta. Este análisis condujo a recomendar 20 g de N por cada mm de lluvia anual estimada.

INICA (1979) reportó que a bajos registros de lluvias correspondía mayor necesidad del N por la planta, y que dicha demanda disminuía en la medida que aumenta la lluvia, hasta valores de 1600 mm donde económicamente no se justificaba adicionar fertilizante nitrogenado al suelo, esto se explicaba porque la caña de azúcar toma el N de la solución del suelo.

Angarica (1972) observó como los altos valores puviométricos en suelos con deficiente drenaje interno se afectaba la disponibilidad de N asimilable por la planta, lo que el autor atribuyó a un descenso de la nitrificación debido al prolongado exceso de humedad, correspondiente al período más lluvioso del año, además bajo dichas circunstancias pudo ocurrir reducción en los compuestos nitrogenados, así como pérdida por volatilización.

El estudio sobre la influencia de la lluvia, a partir de los datos con que hoy se cuenta, continua en proceso de análisis y hasta el momento no se dispone de toda la información necesaria para modelar ésta respuesta, pues el registro actual de la base de datos contiene las lluvias totales, siendo necesario su expresión diaria o al menos decenal para relacionarla con diferentes etapas del desarrollo del cultivo. Hasta tanto concluya dicho estudio, no será prudente modelar el efecto de este factor sobre la demanda del nitrógeno, razón por la que no se consideró en el modelo que ésta tesis presenta.

#### **El factor variedad**

La interacción nitrógeno variedad también ha sido estudiada por numerosos investigadores nacionales y foráneos. Un hecho aceptado es que debido a las diferencias morfológicas y fisiológicas que muestran las variedades entre si, éstas difieren en la capacidad de extracción y asimilación de los nutrientes del suelo, en lo que interviene el desarrollo del sistema de raíces, el área foliar y su aptitud para acumular nutrimentos.

León (1997), comentó la variabilidad encontrada en reportes internacionales sobre la eficiencia de diferentes variedades de caña de azúcar, para hacer frente a excesos y deficiencias del N seguido de una relativa eficiencia en la utilización del nutrimento, destacando que con frecuencia no se observa interacción N-variedad en grado tal como para ser considerada factor modificador de la cantidad del N aplicar.

Stanford y Ayres (1964) realizando experimentos factoriales del N por variedades en campos de Hawai, relacionaron el rendimiento como materia seca y el N extraído con el N aplicado en plantaciones de 20 y 24 meses de edad, encontrando que las variedades

estudiadas tenían semejante requerimiento interno del N por toneladas de materia seca producida.

Se corroboró por el INICA (1979) basándose en resultados de experimentos de campo, que la relación N-variedad es imperceptible, ya que generalmente en los ensayos del N por variedades fueron otros los factores que dominan la respuesta, encubriendo la manifestación de la interacción N-variedad.

Chávez (1988) estudió el comportamiento de diferentes variedades de caña de azúcar en un suelo Ferralítico rojo típico frente a la fertilización nitrogenada, así como la extracción de este elemento por el cultivo. La autora observó que en todos los experimentos y cepas evaluadas no se evidenció interacción entre los niveles de nitrógeno y las variedades utilizadas, por lo que afirmó que no existe diferencias entre las variedades y los niveles de asimilación de este nutrimento.

En la base experimental que soporta ésta tesis se estudiaron un total de 26 variedades, en 291 experimentos, de ellos 71 correspondieron a estudios de interacción N-variedades, sin embargo éstos estudios al ser analizados de forma independiente no mostraron respuesta concluyente. En los análisis de componentes principales y varianza del rendimiento relativo se encontraron las variedades como un factor más a considerar en el estudio del N, lo que significa una alerta sobre la consecuencia de profundizar en la interacción N-variedad.

Así los resultados experimentales disponibles en este trabajo resultan aún insuficientes para considerar a las variedades como criterio determinante de dosis de fertilizante nitrogenado.

#### **La reacción del suelo (pH)**

Tanto en el análisis de componentes principales, como en el modelo de regresión de la respuesta al nitrógeno, y el análisis de varianza del rendimiento relativo de los factores que afectan la misma, el pH mostró influencia sobre el incremento de la producción frente a las aplicaciones con nitrógeno.

Varias son las formas en que la reacción del suelo puede influir sobre la asimilación o disponibilidad de nitrógeno por las plantas. La reacción del suelo está relacionada con la velocidad de descomposición de la materia orgánica, favoreciendo o afectando las condiciones para la amonificación y la nitrificación (Arzola *et al*, 1998).

La fijación y aprovechamiento de nitrógeno atmosférico es también dependiente de la reacción del suelo. La actividad de la nitrogenasa, enzima que fija al nitrógeno atmosférico reduciéndolo a amoníaco, depende en buen grado del pH, con valores óptimos en el intervalo de 6.8 a 7.8. Valores superiores a 5.5 o superiores a 9 reducen notablemente la actividad de esta enzima. Los géneros de bacterias que participan en la fijación asimbiótica de nitrógeno atmosférico resultan generalmente afectados por pH bajos (excepto el género *Beijerinckia*).

El comportamiento de las determinaciones de pH, en agua o en cloruro de potasio, mostró diferencias, fue más efectivo el pH en agua, real expresión de acidez actual del suelo (pues el determinado en la extracción con cloruro de potasio obra sobre la acidez cambiante). Sin embargo a la altura de los conocimientos actuales no se consideró oportuno incluir el pH como criterio para el cálculo de dosis, hasta tanto se amplíen los estudios que fomenten y justifiquen su uso.

#### **El factor rendimiento (RME) y el valor A**

En este trabajo el rendimiento máximo estable (RME) fue considerado uno de los factores del modelo propuesto para las recomendaciones, dada su significativa participación en la respuesta del cultivo, según se mostró el análisis de varianza del rendimiento relativo (ver Cuadro 4). Cuando se analizó el rendimiento alcanzado sin la aplicación de fertilizantes nitrogenados (pero con fondo de fósforo y potasio) expresado por el factor A en el análisis de varianza del rendimiento relativo, contra la respuesta que se lograba con aplicaciones de nitrógeno, se observó que los mayores efectos correspondían a los rendimientos mínimos potenciales más bajos, cesando prácticamente al nivel de 140 t/ha en adelante (Figura 7). Debe tenerse en cuenta que los bajos rendimientos en parcelas experimentales no estaban asociados ni a enyerbamiento ni a la despoblación. Así, para suelos con pocas limitaciones, independientemente de la índole de las mismas, la satisfacción de los requerimientos de nitrógeno por la planta tienden a ocurrir de forma natural siendo menos necesaria la fertilización mineral.

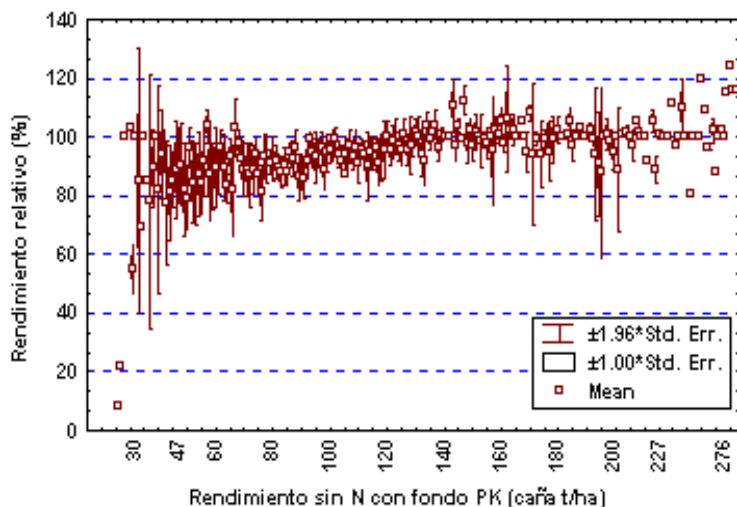


Figura 7. Respuesta ante aplicaciones de nitrógeno en suelos con diferentes potenciales mínimos.

Un hecho generalmente aceptado es que, para elementos móviles como el nitrógeno y el potasio, el rendimiento juega un papel importante en la definición de las dosis de los mismos a aplicar al suelo, con el fin de satisfacer los requerimientos nutricios del cultivo (León *et al.* 2001a).

Muchas de las recomendaciones de nitrógeno propuestas para el cultivo de la caña de azúcar han tenido en cuenta este factor entre sus bases, como son las que ha tenido en Cuba desde 1981 hasta la fecha (López, 1981; Villegas *et al.* 1993; Villegas *et al.* 1996 y León *et al.* 1998), y otras con carácter regional (Angarica, 1985; García, 1987; León, 1990; Hernández 1995; Pineda, 2001) o las recomendaciones de Pérez (1999) en Argentina, y en general las de muchos otros países.

El rendimiento se usa para la estimación de la demanda del nitrógeno, tanto por el método de balance de nutrientes referido por Yágodin *et al.* (1986), como por los métodos basados en la interpretación de respuesta del cultivo en experimentos de niveles de nitrógeno y su relación con variables edáficas y climáticas. Arzola *et al.* (1998), destacan la importancia de este factor con el fin de establecer las dosis de N a aplicar, pues consideran que a mayor rendimiento mayor extracción del elemento por el cultivo y por ende más rápido se agotaran sus reservas en el suelo, recomendando aplicar mayores dosis de N para compensar las exportaciones por las cosechas.

### **El factor edad**

Según Faunconnier y Bassereau (1980) la edad es el primero de los cuatro factores que determina la concentración de elementos nutritivos en la hoja de la caña de azúcar. Van Dillewijn (1975) concibe la edad de la caña de azúcar como un factor determinante en el crecimiento, composición química de los jugos, aprovechamiento del agua, efectividad del fertilizante nitrogenado y la maduración de la planta para la cosecha, destacando que a mayor edad ocurría una disminución gradual en el equilibrio de los órganos productivos y consumidores, manifiesto en la reducción de la capacidad de la planta para responder a la influencia de factores externos, como la fertilización y el riego, lo que sugiere la aplicación de estos insumos en el período donde la eficiencia de los mismos por la planta sea máxima, definidos antes del período de crecimiento máximo y durante él, de ahí el empeño de aplicar la mayor proporción del N tan pronto como sea posible.

Según Cornelison y Cooper, citados por Dillewijn (1975) la respuesta al N aplicado en la etapa de auge del crecimiento (gran período de crecimiento), es mayor tanto en la brotación (fase heterogónica) como en la maduración de los tallos de la caña, resultado que fue asociado al máximo desarrollo y actividad del sistema de raíces, así como de las hojas que tiene lugar en ese preciso momento.

El momento o la época de aplicación del fertilizante nitrogenado ha sido objeto de estudio en la agricultura cañera, debido a que la edad de las plantaciones es determinante en el aprovechamiento del nutrimento por la planta.

León (1997), expresó que la caña de azúcar es una planta que en edades temprana de su desarrollo, tiene la capacidad de acumular nutrimentos con mayor rapidez que materia seca, por lo que sugiere que en esta etapa de su vida puede extraer nutrimentos en exceso para su ulterior utilización. Al respecto Dillewijn (1975) observó que el ritmo de absorción del N, aparentemente, es independiente de las necesidades inmediatas de la planta, y el N absorbido después de los requerimientos del momento, puede ser almacenado para ser utilizado en el posterior crecimiento.

León (1997) refirió que, durante los primeros seis meses de vida, los retoños pueden acumular 8 o más veces la cantidad de materia seca que la que acumula la caña planta para igual período y absorber 2,5 veces más N, además subrayó, que aún recién cortada la cepa precedente, ésta dispone de un sistema de raíces que no por ser antiguo deja de subsistir y realizar sus funciones hasta la emisión de nuevas raíces.

Téngase en cuenta que el vegetal puede almacenar N, lo que se realiza a través de los ácidos aspártico y glutámico, los que pueden absorber una molécula más de amoníaco y formar así sus amidas, la aspargina y la glutamina, sustancias que se acumulan en la célula vegetal sin producir daños y constituyen una reserva del N en el vegetal. De esta forma la planta es capaz de almacenar nitrógeno en el interior de sus células, para ser usado cuando lo necesite el vegetal (León, 1997).

Atendiendo al deterioro de las condiciones físicas del suelo en los ciclos de cosechas, el factor edad es valorado para realizar determinadas labores de cultivos, que le permitan a la cepa disponer de mejores condiciones de aireación, así como reemplazar el viejo sistema de raíces por uno nuevo.

La información experimental que sirvió de base para desarrollar este trabajo contó con 364 cosechas de fraccionamiento de N, en los que se estudiaron diferentes niveles (100, 50+50, 25+75, kg del N/ha) en distintos tipos de suelos y cepas, los que fueron analizados de forma independiente del resto de las cosechas que conforman la base de datos general.

Los resultados obtenidos coincidieron con diversos estudios reportados en Cuba y en el extranjero (King, 1968; Pérez, 1982; León, 1997; Arzola *et al*, 1998; Cabrera y Bouzo, 1999) que han demostrado que el fraccionamiento del N en condiciones de secano no aumenta la efectividad del fertilizante nitrogenado ni el rendimiento del cultivo, sin embargo, los autores coincidieron en su gran mayoría al reportar efectos desfavorables en la calidad del jugo por las aplicaciones tardías, así como el encarecimiento de la actividad, por lo que recomiendan aplicar para cualquier condición todo el N en dosis únicas, al momento de la plantación, si las circunstancias del suelo son las propicias, e inmediatamente después del corte en los retoños.

#### **4.2 Modelo para la estimación de las dosis de nitrógeno**

Los factores suelo, cepa y contenido de materia orgánica brindaron una indicación sobre dónde era probable la respuesta de la caña de azúcar ante las aplicaciones de fertilizantes nitrogenados, pero no aportaron información sobre la cantidad de N a aplicar.

El intento de relacionar directamente los rendimientos con las dosis resultó infructuoso, sin embargo, la relación entre los índices de consumo y los rendimientos esperados proporcionó una vía para la estimación de las mismas (Figura 8). Los índices de consumo representan la relación entre la dosis y el rendimiento:



$$IC \text{ (kg/t)} = \text{dosis (kg/ha)} / \text{rendimiento (t/ha)}$$

Los índices de consumo más altos correspondieron a los suelos 1 dentro de cada grupo de cepas y a los retoños dentro de cada grupo de suelos.

Las dosis del nitrógeno, estimadas para cada condición a partir de la correspondencia entre los índices de consumo y el rendimiento esperado, se muestran en los cuatro modelos que aparecen en la Figura 9.

Una muestra "tabular" de dosis estimadas por estos modelos se ofrece en el Cuadro 5, en el que se tuvo en cuenta índices de consumo medios para diferentes intervalos de rendimiento.

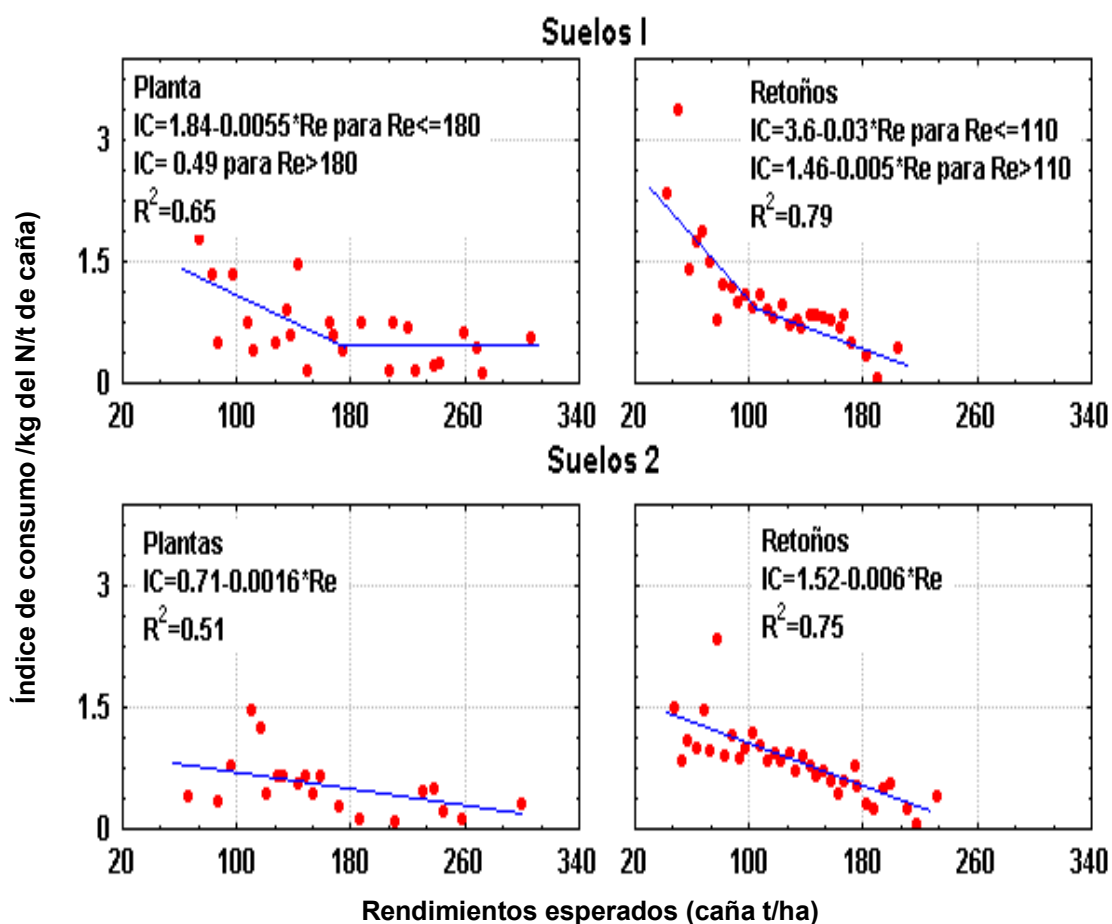


Figura 8. Relación entre índices de consumo y rendimiento esperado por grupos de suelo y cepas.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSION

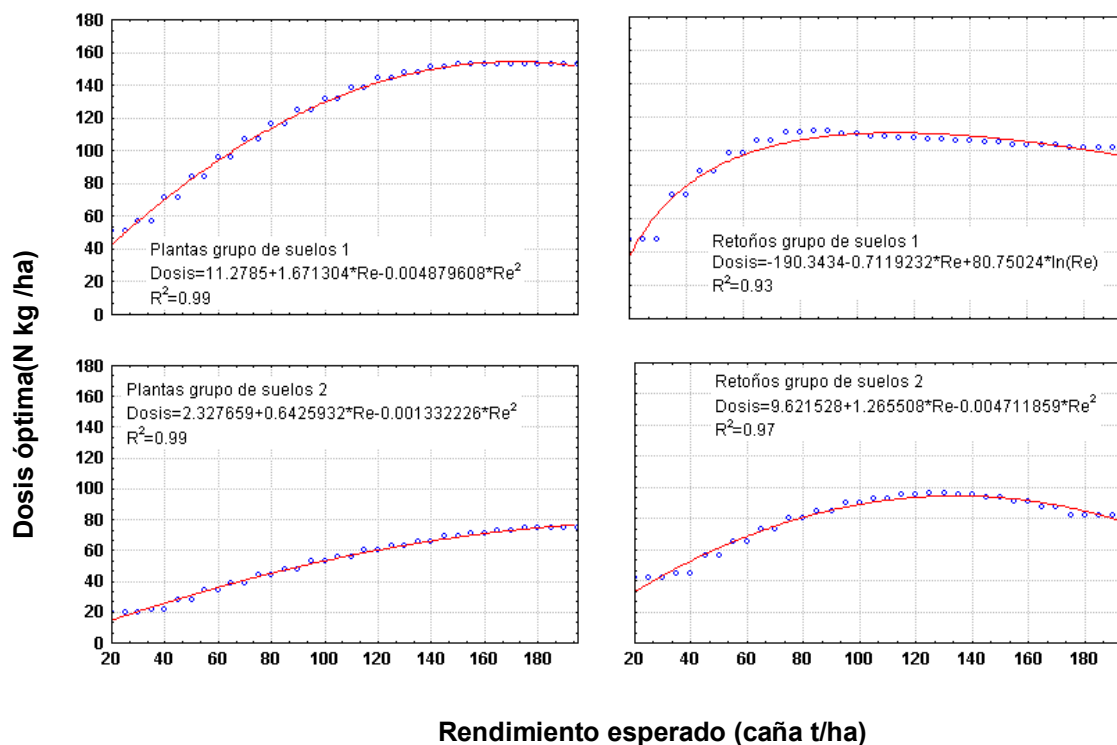


Figura 9. Relación entre dosis y rendimiento esperado por grupos de suelo y cepas.

Cuadro 5. Recomendaciones para el nitrógeno.

Rendimiento t/ha	Plantas		Retoños	
	Suelo1	Suelo2	Suelo1	Suelo2
	kg/ha			
< 30	< 50	< 20	< 50	< 40
30-40	65	25	70	50
40-50	75	30	85	60
50-60	90	35	95	65
60-70	100	40	100	70
70-80	110	45	105	80
80-90	120		85	
90-100	125	50	110	90
100-110	135	55		
110-120	140	60		
120-130	145	65	105	95
130-140	150			
140-150	155	70		105
150-160		75	100	85
160-170		80	100	80
170-180		85	100	75
180-190	90	75	< 95	75
190-200	95			
> 200	< 145	> 80	< 95	< 70

Según Nelson (1999) se debe recordar que no existe un modelo ideal. Hay que tener mucho cuidado para evitar que el modelo escogido produzca estimaciones sesgadas del óptimo. Este es probablemente un criterio más importante que el tamaño del  $R^2$  (coeficiente de determinación múltiple), ya que muchos modelos producen  $R^2$  similares, pero el óptimo estimado por cada uno de ellos es muy diferente.

Es necesario mencionar que se presentan problemas con los modelos tradicionales cuando los modelos forman una meseta. En esta situación, los modelos cuadrático, raíz cuadrada y Mitscherlich sobreestiman la cantidad óptima del nutriente así como el rendimiento estimado en este punto óptimo. Esto se debe a que el ajuste matemático de los datos mueve el óptimo hacia la derecha.

### 4.3 Evaluación económica

Aunque con la adecuada utilización de los fertilizantes se logran aspectos tan importantes como la preservación de la fertilidad del suelo y la reducción de la contaminación ambiental, el objetivo primordial de su uso ha sido el de incrementar los rendimientos. Pero en ocasiones el incremento que se logra con la fertilización no es siquiera suficiente para sufragar el gasto en que por ella se incurre. Hoy más que antes el aspecto económico es de suma importancia, siendo necesario considerar a la fertilización como una inversión económica, teniendo el uso de los fertilizantes como premisa el ser redituable. Es propósito de esta sección es modelar el impacto de la respuesta económica de las recomendaciones de fertilizantes nitrogenados, así como determinar el intervalo de variación de las dosis redituables y determinar las dosis óptimas.

La relación de los incrementos con las dosis mostró buen ajuste con ecuaciones de segundo grado, lo que facilitó el cumplimiento de los objetivos propuestos. El Cuadro 5 muestra las funciones incremento obtenidas para las distintas condiciones.

Cuadro 5. Funciones incremento con la fertilización nitrogenada bajo distintas condiciones.

Condición	Funciones Incremento	$R^2$
Planta, suelos 1	$Inc = 1.8446 + 0.3620Dos - 0.00136 Dos^2$	0.60
Retoños, suelos 1	$Inc = -0.2998 + 0.3476Dos - 0.0013 Dos^2$	0.57
Planta, suelos 2	$Inc = 0.6111 + 0.3137 Dos - 0.0014Dos^2$	0.53
Retoños, suelos 2	$Inc = -4.5143 + 0.4747Dos - 0.0018Dos^2$	0.48

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSION

A partir de las variables incremento y dosis se establecieron las funciones para el valor presente neto [  $VPN = (Inc \times pp) - (Dosis \times pf)$  ]. El Cuadro 6 muestra las ecuaciones obtenidas para las condiciones definidas en el estudio.

Cuadro 6. Funciones para el valor presente neto.

Condición	Funciones del valor presente neto
Planta, suelos 1	$VPN = 20.3827 + 3.1801Dos - 0.0151Dos^2$
Retoños, suelos 1	$VPN = -3.3127 + 3.0215Dos - 0.0141Dos^2$
Planta, suelos 2	$VPN = 6.7522 + 2.6466Dos - 0.0157Dos^2$
Retoños, suelos 2	$VPN = -49.8826 + 4.9256Dos - 0.0196Dos^2$
Nota: Para el cálculo del VPN se tuvieron en cuenta los siguiente precios: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Precio de la caña \$ 11.05 MN (descuento gastos de corte, alza y tiro).</li> <li>• Precio de los productos activos 0.82.</li> </ul>	

Las relaciones pp/pf y su inverso para distintos portadores de fertilizantes se muestran en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Relaciones precio del fertilizante precio de la producción para los portadores del N.

Portadores	pf	pp	Relación pp/pf	Relación pf/pp
	\$/kg	\$/t	t/kg	kg/t
Urea	0.82	11.05	13.475609	0.0742081
Nitrato de amonio	0.88	11.05	12.556818	0.0796380
Amoniaco	0.60	11.05	18.416666	0.0542986

Los resultados de la evaluación económica para diferentes dosis de N y condiciones se muestran en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Resultados de la evaluación económica.

Condición	Dosis Económica <sup>1</sup>	Máxima ganancia				
		Dosis	Incremento	Ingresos	Egresos	VPN
	kg/ha	t/ha		\$/ha		
Plantas, suelos 1	0 - 257	105.80	24.83	274.35	86.34	188.01
Retoños, suelos 1	0 - 213	105.15	22.02	243.32	87.86	155.46
Plantas, suelos 2	0 - 171	85.53	17.11	189.02	69.11	119.91
Retoños, suelos 2	10 - 241	111.25	26.71	295.18	103.04	192.15
Nota: <sup>1</sup> Los valores extremos del intervalo representan dosis extremas (aquellas en las que el VPN = 0)						

Estos modelos para el nitrógeno también se realizaron en función del rendimiento esperado (rendimiento máximo estable en la base de datos), pues esta variable fue el criterio para la estimación de las dosis (Figura 10).

Para cualesquiera de las circunstancias de suelo y cepa, el incremento medio, primero aumentó según fue mayor la dosis, y después disminuyó. Los incrementos más altos correspondieron a las cepas de retoños y a los suelos del grupo 1 (suelos con limitaciones por hidromorfía o compactación). En los retoños, aún con las probabilidades mínimas, que también se calcularon, se observaron incrementos de rendimiento, lo que no fue notable con las cepas de planta en ninguno de los dos grupos de suelo.

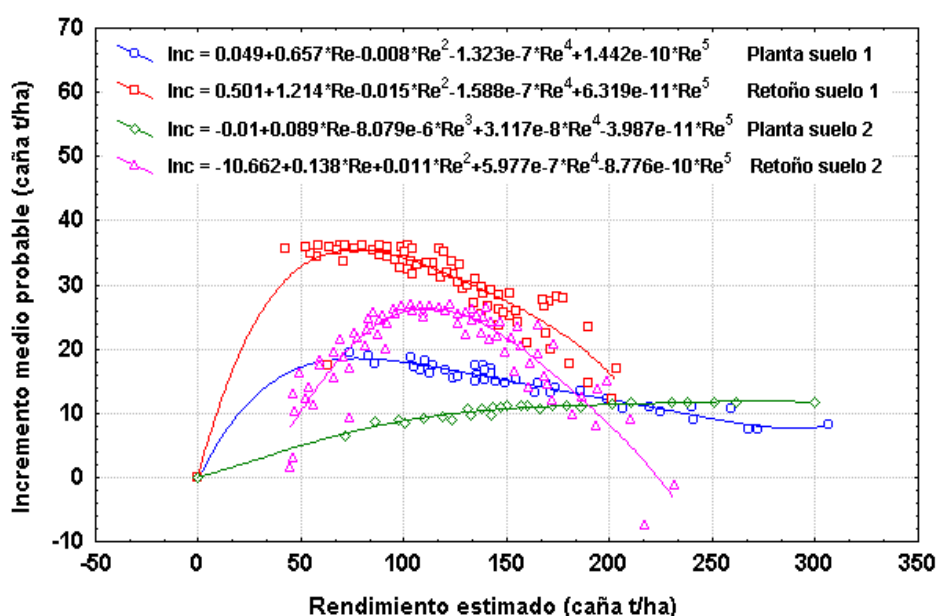


Figura 10. Incrementos de rendimientos medios probables en función del rendimiento esperado para las cosechas de nitrógeno.

Obsérvese que de acuerdo a la expresión

$$pp/pf = \text{Dosis}/Inc$$

de donde

$$Inc = pf/pp * (\text{Dosis})$$

y teniendo en cuenta que la relación pf/pp para la urea es 0.0742081 y que las dosis del N para rendimientos esperados de hasta 100 t/ha no exceden los 100 kg/ha, bastarían incrementos no superiores a 7.42 t/ha para que las dosis fueran económicas, lo que, como se observa en la Figura 10, es completamente factible.

#### 4.4 Riesgo de la respuesta

Con relativa frecuencia ocurre que la aplicación de los fertilizantes no incrementa el rendimiento, por lo que resulta conveniente conocer la probabilidad de que la aplicación de determinada dosis produzca un incremento dado. Este aspecto resulta útil para establecer prioridades durante el desarrollo de la campaña de fertilización cuando existen restricciones por falta de portadores.

Todas las relaciones mostradas hasta aquí se definieron sin tomar en cuenta la probabilidad de respuesta y asumiendo una función de incremento dependiente de la dosis aplicada. Por otra parte los análisis económicos se realizaron con las cosechas en las que la aplicación de fertilizantes produjo incrementos, es decir no se tuvo en cuenta la frecuencia de respuesta. Dado lo anterior fue conveniente estudiar el riesgo de la respuesta. Es intención de esta sección determinar la frecuencia de respuesta de la aplicación de fertilizantes en caña de azúcar (sobre la base de los resultados experimentales). La probabilidad de alcanzar determinado incremento con la aplicación de una dosis de N se muestra en la Figura 11.

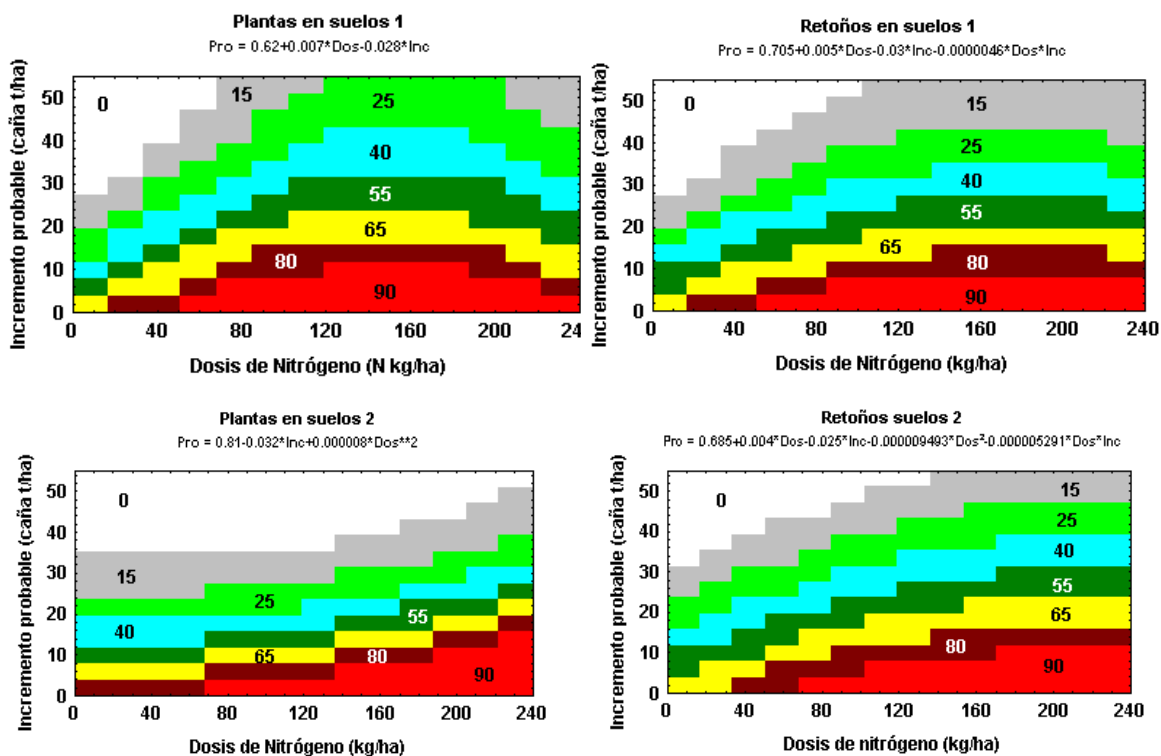


Figura 11. Probabilidad de obtener incrementos con diferentes dosis de nitrógeno en 4 condiciones de recomendación.

El orden de las condiciones cepas-suelos por su probabilidad de alcanzar mayores incrementos a dosis más bajas fue:

Plantas-Suelos 1 > Retoños-Suelos 1 > Retoños-Suelos 2 > Plantas-Suelos 2

Este orden se corrobora al compararse con las probabilidades de alcanzar los incrementos correspondientes a la máxima ganancia (Cuadro 8). De existir restricciones para el uso de los fertilizantes nitrogenados por no disponer de portadores u otra causa, debe darse prioridad de acuerdo al orden citado.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

1. El procedimiento mostrado para el cálculo de las dosis de fertilizantes nitrogenados, integra todos los aspectos concernientes al uso racional de los nutrimentos minerales en la agricultura cañera.
2. De acuerdo al análisis de la información los criterios para la fertilización nitrogenada se pueden resumir en: suelo, cepa y rendimiento esperado.
3. Los modelos mecanicistas obtenidos para las diferentes condiciones de suelos y cepas mostrados en el cuerpo del trabajo, brindan la información necesaria para predecir las necesidades de N correspondiente al sistema suelo-planta, así como la dosis necesaria para satisfacerla.
4. Las recomendaciones para la aplicación de fertilizantes nitrogenados se presentan de forma tabular, atendiendo a los modelos mecanicistas ajustados a la respuesta del cultivo en relación con los factores obtenidos como modificadores de las dosis.
5. La respuesta de la caña de azúcar a la fertilización nitrogenada aumenta cuando el contenido de materia orgánica del suelo disminuye, así a niveles inferiores de 2,5 % es notable la probabilidad de respuesta. Este criterio debe ser utilizado en el establecimiento de prioridades para el uso del N en el cultivo de la caña de azúcar.
6. No se consideró oportuno incluir el resto de los factores obtenidos de los análisis efectuados como criterio para el cálculo de dosis, hasta tanto se amplíen los estudios que sustente y justifiquen su uso.
7. El N debe aplicarse enterrado, lo más pronto posible después del corte. Cuando su uso en la cepa de planta sea imprescindible debe aplicarse al momento de la plantación.
8. Se establecen procedimientos para el análisis económico de las recomendaciones y para la estimación del riesgo de la respuesta.
9. El N mostró un alto porcentaje de probabilidad de respuesta por la caña de azúcar, considerando las variables analizadas.
10. El orden de las condiciones cepa-suelos por su probabilidad de alcanzar mayores incrementos a dosis más bajas fue:

Plantas-Suelo 1 > Retoños. Suelos 1 > Retoños-Suelos 2 > Plantas-Suelos 2.



11. Los resultados obtenidos por esta vía correspondieron, en general, con los reportados internacionalmente para condiciones y circunstancias similares, lo que de cierto modo certificó el valor de las recomendaciones propuestas.

### **5.2 Recomendaciones**

1. Utilizar el procedimiento metodológico relatado para conocer con mayor eficiencia el nivel de respuesta de la caña de azúcar frente a otros nutrimentos, enmiendas y abonos orgánicos.
2. De existir restricciones para el uso de los fertilizantes nitrogenados por no disponer de portadores u otra causa, debe darse prioridad según el orden citado en la conclusión 10, del mismo modo que a los suelos con tenores menores a 2,5 % de MOS.
3. Continuar profundizando en los factores que determinan la respuesta a la fertilización nitrogenada, como resultado de procedimiento estadístico-matemático descrito en el trabajo.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Agafonov, O., R. M. Delgado, L. Rivero y G. Tatevosian (1978): Propiedades físicas de los Vertisuelos de Cuba, relacionado con las particularidades de su génesis. Ciencias Agrícolas. No 3. ACC. 47-76 pp.
2. Agafonov, O.; J. E. Roldós y R. Avilés (1973): Influencia de la densidad del suelo Rojo Ferralítico sobre otras propiedades físicas y el crecimiento, desarrollo y productividad de la caña de azúcar. Serie Caña de Azúcar, No. 63. ACC. 19 pp.
3. Alcock, M. R. and A. J. Morton (1985): Nutrient content of through-fall and stem-flow in woodland recently established on heath-land. Journal Ecology 73. 625-632 pp.
4. Alle, D. G. (1967): Matemática Económica. Edit. Rev. 900 pp.
5. Allen, S. E.; A. Carlisle; E. J. White and C. C. Evans (1968): The plant nutrient of rainwater. Journal of Ecology 52(2). 497-504 pp.
6. Alomá, J. (1973): Recomendaciones de fertilización para el área de los centrales que bordean la bahía de Nipe. Serie Caña No. 35. 15 pp.
7. Alomá, J. (1983): Introduction into production of experimental results obtained with variedades and fertilization during the last twenty year in Cuba. Procc. XVIII Cong. ISST.
8. Alonso, G. (1916): Tecnología de la Caña de Azúcar. Primera parte, Historia Natural, Fitotecnia y Patología de la Planta. Escuela Azucarera de la Habana. Imprenta y papelería de rambla, Bouza y C. 65-79 pp.
9. Anderson, R. L and L. A. Nelson (1975): A family of model involving intersecting straight lines and concomitant experimental designs use in evaluation response to fertilizers nutrients. Biometrics 31: 303-318.
10. Angarica, B. E. (1972): Efecto de diferentes portadores de nitrógeno en la fertilización de la caña de azúcar. XL Conferencia ATAC, 7 pp.
11. Angarica, E. (1985): Caracterización agroquímica y uso de los fertilizantes en la caña de azúcar en suelos Oscuros Plásticos Grises Amarillentos de las provincias de Holguín y Santiago de Cuba. Tesis en opción al grado científico de doctor en Ciencias Agrícolas. INICA. 119 pp.
12. Angarica, E. M; E. Pérez; Beatriz Montero (1990): Requisitos de N, P y K para caña de azúcar bajo condiciones agroclimáticas de la provincia de Holguín. EPICA “Gerardo Pérez” Cristino Naranjo. INICA-MINAZ.
13. Arain MA, Murabi KA, Khan MA. (2000) : Some physico-chemical characteristics of

- soil in sugarcane cultivated areas of Nawabshah, Sindu, Pakistan. *Pakistan J. of Botany* 32: 93-100.
14. Arzola, N. y A. Alfonso (2001): La materia orgánica en el suelo. Parte 1. Formas y transformaciones. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Boletín Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo. No. 4 Nov. 01. ISSN 1609-1876. 140 pp.
  15. Arzola, N.; A. Menéndez,; M. León; E. García y A. Cabrera (1998): Elementos básicos sobre suelos y uso de fertilizantes en el cultivo de la caña de azúcar. INICA-MINAZ. Curso 1 del SERFE. 60-72 pp.
  16. Arzola, N.; O. Fundora y J. Machado (1981): Suelo, planta y abonado. Primera impresión. Edit. Pueblo y Educ. 56-60 pp.
  17. Ascanio, O y F. Sulroca, (1986): Nuevo Agrupamiento agroproductivo de los suelos cañeros de Cuba. En archivo del Dpto. de Suelos y Agroquímica del INICA. 35 pp.
  18. Atkinson, A. C. (1985): Plots: Transformation and Regression, and introduction of graphical methods of diagnostic regression analysis. Claredon Press, Oxford.
  19. Baldini, J. I; F. L Olivares; A. S Hermerly; J. B. Jr. Rise; A. L. M Oliveira; V. L. D Baldini; S. R Gois; V. M Reis and J. Dobereiner (1998): Nitrogen fixing endophytes: recent advances in the association with graminaceous plants growth in the tropics. In. Biological nitrogen fixation for the 21<sup>st</sup> century. Ed. Elmerich, C Kondorosi, A. B. Newton, W. E Klumeer Academic Publishers. 203 206 pp.
  20. Bartholomew, W. V.(1972): Soil nitrogen and supply process and crop requirement. Tech Bull. No. 6. ISFEI series, North Carolina State University, Raleigh, N.C.
  21. Bautista F. y C. Durán (2000): Cambios químicos en el suelo por aplicación de materia orgánica disuelta tipo vinazas. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 16(3):89-101.
  22. Bautista F. y C. Durán (2001): La materia orgánica soluble tipo vinazas en el mejoramiento de Acrisoles y Fluvisoles. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Boletín Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo. No. 4 Nov. 01. ISSN 1609-1876.
  23. Bautista F.; Rivas H.; Durán C.; Palacio G (1998): Caracterización y clasificación de suelos con fines productivos en Córdoba, Veracruz, México. *Investigaciones Geográficas* 36, pp. 21-33.
  24. Beauchamp C. E. (1947): Relación entre la vitalidad de los campos de caña y su respuesta a la aplicación de abonos. *Memorias ATAC*. 45-48 p.

25. Beauchamp, C. E. y F. Lazo (1937): Estudios sobre la fisiología de la caña de azúcar. VII. La influencia de los elementos fertilizantes sobre el crecimiento de la caña de azúcar. Memorias ATAC. 241-260 p.
26. Beaufils, E. R. (1973): The Diagnosis and Recommendation Integrated System. Univ. of Natal Soil Sci. Bul. 1.r
27. Becker, A. ; J. I. Ossana; M. P. Cantú; T. B. Musso (2002): Erosión hídrica laminar en relación a la degradación de suelos en el suroeste de la provincia de Córdoba. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Com. IV. 5 pp.
28. Benintende, M; S. Benintende; M. Sterren (2000): Efecto del manejo sobre la mineralización del nitrógeno en distintos suelos. Ciencia, Docencia y Tecnología 20: 231-267 pp.
29. Bock, B. R. y F. J. Sikova (1990): Modified Quadratics/Plateau Model for Describing Plant Responses to Fertilizers. Soil Sci. Soc. of America Journal. Volume 54. No 6.
30. Boul, S. W y M. L Stokes (1997): Soil profile alteration under long-term high-input agriculture, 97-110 pp. 51. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
31. Boussigault E. y W. Payen (1841): C. R. Ac. Sc., t. XIII, p. 323.
32. Boussingault y Lawes (1900): Trente annés d'xpérimentation agricole, de Lawes y Gilbert. Consultar A. Ronna. 1 Vol. La Maison rustique, edit.
33. Boyd, (1970): Some recent ideas on fertilizers response curves. Paper presents at the CARFIA. International Potash Institute, Berne, Swiss.
34. Cabrera, A. (1984): Manual de técnicas analíticas para laboratorios de agroquímica y suelos. Folleto circulado por el Dpto. de Suelos y Agroquímica del INICA. La Habana.
35. Cabrera, A. (1997): Generalidades sobre la nutrición de la caña de azúcar en Cuba. SERFE. Dpto. de Suelos y Agroquímica del INICA. 38-39 pp.
36. Cabrera, A. y L. Bouzo (1999): Fundamentos técnico-económicos para el uso de fertilizantes y enmiendas en caña de azúcar. Curso 1 del SERFE. INICA-MINAZ. 151 pp.
37. Camacho, R. E. Malavolta, J. Guerrero, T. Camacho (2001): Crecimiento vegetativo del sorgo en respuesta a la nutrición fosfatada. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Boletín Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo. No. 4 Nov. 01. ISSN 1609-1876.
38. Carabia, J. P., (1937): Historia de la caña de azúcar en Cuba . Memorias ATAC (1937-1938). 294-327 p.

39. Carefoot, J. M., J. B. Bole and T. Entz. (1989): Relative efficiency of fertilizer N and soil nitrate at various depths for the production of soft white wheat. *Can. J. Soil Sci.* 69-867-874.
40. Cate R. B. , Jr. and L. A., Nelson (1965): A rapid methods for correlation of soil test analysis with plant response data. *Tech. Bull. No. 1 ISFEL Series.* North Carolina State University, Raleigh, N. C. 33 p.
41. Cate R. B. Jr. (1971): Improving the interpretation of soil fertility correlation data a comparison of continuous models, using the variety of data sets. PhD Thesis. North Carolina State University, Raleigh, N. C.
42. Cate, R. B y L. A. Nelson (1971): A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into tow classes. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 35 (4): 658-659 pp.
43. CFSEMG-Comissao de fertilidade do solo do estado de Minas Gerais (1999): Recomendacoes para o uso de correctivos e fertilizantes em Mina Gerais-5ta aproximacao. Vicoso: Universidade Federal de Vicoso. 359 pp.
44. Chávez, I. (1988): La fertilización nitrogenada de la caña de azúcar en un suelo Ferralítico Rojo Típico en la república de Cuba. Tesis presentada para optar por el grado científico de Master en Ciencias, en la especialidad de edafología. Colegio de Postgraduados, Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas, Centro de Edafología Montecillos México. 80-85 pp.
45. Cian, D; Sterren, M; Benintende, M; Benintende, S (2000). Ajuste de la tasa de mineralización de las capas subsuperficiales por distribución de microorganismos en profundidad FERTIBIO 2000. 22 al 26 octubre. Santa María. Brasil (En: [www.ufsm.br/fertbio2000](http://www.ufsm.br/fertbio2000))
46. Colwell, J. D. (1967): The calibration of soil tests. *J. Aust. Instit. Agric. Sci.* 33: pp: 321-330.
47. Colwell, J. D. (1988): Statistical procedures for developing general soil fertility models for variable regions. CSIRO. Divisional Report na 93. Australia.
48. Colwell, J., D. (1994): Estimating Fertilizer Requirements, a quantitative approach. CSIRO division of Soils, Canberra Laboratories Acton, Australia. Chapter 5. 85 pp.
49. Cook, R. & Wisberg, S. (1982): Residuals and influence in Regression. Chapman and Hall, New York.
50. Cooke, G. W. (1967): The control of Soil Fertility. Acad. Press. Inglaterra. 384 pp
51. Cuellar, I. (1980): El contenido de potasio en los suelos Pardos y la respuesta de la caña de azúcar a la fertilización potásica. Primer Forum Científico CMICT. Sancti

- Spíritus. 6 pp.
52. Cuellar, I. A. (1974): Fertilización de la caña de azúcar con N, P y K. Resúmenes de trabajos técnicos. Primera Jornada Científica del INICA, ACC, 21 pp.
  53. De la Fé, C. F.; V. M Paneque; R. Ortiz; J. M Calaña; L. Quesada; J. González; L. Rodríguez; R. Nuñez; E. Riquildo (2002): Metodología para el manejo integral de la caña de azúcar en Cuba. INCA. Ponencia XIV Forum d Ciencia y Técnica, San José de las Lajas.
  54. Del Toro, F.; A. Dávila; N. Alonso (1985): El cultivo de la caña de azúcar. Universidad Central de la Villas. Fctad. Ciencias Agrícolas. Dpto. Producción Vegetal. 176 p.
  55. Demolon, A., (1972): Principios de Agronomía 2. Crecimiento de los vegetales cultivados. OMEGA. Casanova, 220. Barcelona.
  56. Dibb, D., (2000): Eficiencia en el uso de nutrientes: verdades y mitos. Informaciones Agronómicas. INPOFOS. No. 41, 5-9 p.
  57. Dillewijn, C. Van (1975): Nutrición: Botánica de la caña de azúcar. Edit. Rev. La Habana. 257-354 pp.
  58. Elmerich C. (1984): Molecular Biology and Ecology of diazotrophic associated with non leguminous plants. Biotechnology, 1: 967-970.
  59. Espinosa, J., S. Belalcazar, A. Chacón, y D. Suárez (1998): Fertilización del plátano en altas densidades. Memorias de la XIII Reunión de ACROBAT, Ecuador 98. Guayaquil-Ecuador.
  60. Etchevers, J. (1999): Técnicas de diagnóstico del sistema de producción y del estado nutrimental de los cultivos. Com. V. XIV congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Universidad de la Frontera TEMUCO, Chile.
  61. Farshad, A and J.A. Zinck, (2001): Assessing agricultural sustainability using the six-pillar model: Iran as a case study. In: Gliessman, S. (Ed.), Agroecosystem sustainability: Developing practical strategies. CRC Press, Boca Raton, pp.137-151.
  62. Fasihi, S. D., K. D. Malik and J. O. Reriss (1980): Studies on the effects of various nitrogen and irrigation levels on the yield of sugar cane varieties BL 4 and L 116. Mem. XVII Cong. ISSCT. 52-62 pp.
  63. Fassbender H. W. (1972): Química de suelos, con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. San José, Costa Rica. Edit. IILA. 234-238 pp.
  64. Faunconnier, R. y D. Bassereau (1980): La Caña de Azúcar. Brasil Azucarero. No

1. 10-16 pp.
65. Fernando, L.; N. Milanés y A. Castillo (2001): Pérdidas de nitrógeno total por la quema de la caña de azúcar en el ingenio San José de abajo S. A. de C. V. Córdoba, Veracruz, México. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencias del Suelo. Varadero, Cuba. 4 pp.
66. Figueroa, L. R., (2000): Consideraciones acerca de la evaluación de la fertilidad de los suelos. Ing. Agr. MSc. Argentina. Sección de Suelos y Nutrición Vegetal. EEAOC- Avance Agroindustrial, 45-47pp.
67. Fitts, J. W. (1959): Research + extension = bigger farming profits. *Plan Food Review*, 5 (2): 10-12 pp
68. Fogliata, F. A (1973): Cantidad de materia orgánica y nutrientes que se incorporan al suelo con la remoción de las cepas de la caña de azúcar. *Bol.* 935, 127-129 pp.
69. Fundora O., N. Arzola y J. Machado (1992): *Agroquímica*. Segunda reimpresión. Edit. Pueblo y Educ. 66-70 pp.
70. García, E. (1987): Efectividad de la fertilización NPK en la caña de azúcar sobre suelos pardos con carbonatos de la provincia de Camagüey. Tesis en opción al grado Científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. INICA, L a Habana, 118 pp.
71. García, F. (2000): Rentabilidad de la fertilización algunos aspectos a considerar. *Informaciones Agronómicas*. No. 39, 1-6 pp.
72. González JL, G. A. Maddoni; M. R Napoli (1997): Modeling grain yield and grain yield response to nitrogen in spring wheat crops in the Argentinean Southern Pampa. *Field Crop Research* 51: 241-252.
73. Hauck, R. D. (1971): Quantitative estimates of N-cycle processes. N15 in soil plant studies. IAEA. Viena. Austria.
74. Henderson, G. S; W. F. Harris; D. E. Todd and T. Grizzard (1977): Quantity and chemistry of throughfall as influenced by forest type and season. *Journal of Ecology* 65. 365-374 pp.
75. Hernández, A., J. Pérez, O. Ascanio, F. Ortega, L. Avila, A. Cárdenas, A. Marrero, N. Companioni, R. Villegas, I. Cuellar, M. Castellanos, T. Tatevosian, L. Shishov, O. Agafonov y V. Shishova (1975): *II Clasificación Genética de los Suelos de Cuba*. *Rev. Agricultura*, VIII (1), pp 47-69.
76. Hernández, J. (1996): Evaluación manejo y corrección de la fertilidad y lo suelos Ferralíticos cuarcíticos dedicados al cultivo de la caña de azúcar. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. Sancti Spíritus.

- INICA-MINAZ. 76 p.
77. Hernández, J. y L. Herrera (1993): Estrategias metodológicas utilizadas en el desarrollo de modelos para realizar recomendaciones de fertilizantes y su evaluación agro-económica. UCV. Facultad de Agronomía Maracay, Venezuela.
  78. Herrera, L. (1992): Desarrollo de un sistema de recomendaciones de nitrógeno para maíz en el estado de Yaracuy a través del análisis conjunto de experimentos, I Jornada Científica Nacional del Maíz. Guanare, Venezuela.
  79. Herrera, L. (1999): Metodología para la recomendación de dosis de nutrimentos utilizando el análisis de discriminante. 14 Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Comisión V, Universidad de la Frontera TEMUCO. Chile
  80. Humbert, R. P., (1968): The Growing of Sugar Cane. Elsevier, 652 pp.
  81. Hunsz, G. S. (1972): Nutrients requirements and fertilization sugar cane. Cultivation and Fertilization. In. Series of monograph on tropical and subtropical crops, 41-67 pp.
  82. Infante, C. (1988): Ciclo del Nitrógeno en el cultivo de la caña de azúcar (San Felipe, Edo. Yaracuy. Tesis doctoral para optar al Grado Científico de Doctor en Ciencias Univ. Central de Venezuela, 176 pp.
  83. INICA (1979): Resultados experimentales obtenidos en la fertilización nitrogenada y fosfórica de la caña de azúcar en Cuba. ACC. La Habana. 110 p.
  84. INICA (1990): Normas Metodológicas del Departamento de Suelos y Agroquímica. Tomo 1. 100 pp.
  85. INPOFOS (2000): Manual Internacional de Fertilidad de Suelos. PPI Education and PPIC Education. Cap. 3, 3-1 pp
  86. Iznaga, O. (1986): Efectividad de los fertilizantes nitrogenados en la caña de azúcar en suelos Ferralíticos Rojos Saturados. Tesis en opción de grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. La Habana. 124 pp.
  87. Jenkinson, D. S and J. H. Rayner (1997): The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. Soil Sci. 123,5. pp: 235-298.
  88. Jonson, G. V. (1991): General Model for Predicting Crop Responses to Fertilizer. Agronomy Journal. Vol. 83, 368-373 pp
  89. King, N. J. (1968): Manual del cultivo de la caña de azúcar. Edic. Rev. 465 pp.
  90. Körshens, M.; A. Weizel; E. Schulz (1998): Turnover of organic soil matter (SOM) and long-term balances tools for evaluating sustainable productivity soils. Z. Pflanzernähr. Bodenk., 161, 409-424.



91. Lal, H.; G Hoogenboom; J. P. Calixte; J. W. Jones and F. H. Beinroth, (1993): Using Crop Simulation Models and GIS for Regional Productivity Analysis. *Aim. Soc. Of Agric. Eng.*, 36 (1): 175-184 p.
92. León, M E.; R. Villegas e I. Cuellar (1997): Consideraciones sobre la fertilización de la caña de azúcar en Cuba. Informe INICA-MINAZ. Ciudad de la Habana, p: 3
93. León, M. (1990): Características agroquímicas de los suelos y efecto de los fertilizantes en la producción de caña de azúcar en la provincia de Ciego de Ávila. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. La Habana, 120 pp.
94. León, M. (1997): Bases para la fertilización mineral de la caña de azúcar. INICA-MINAZ. Curso 1 del SERFE, Dpto. de Suelos y Agroquímica 1-20 pp.
95. León, M. E (1993): Fertilización de la caña de azúcar. Capt. 4 "Fertilización Nitrogenada". Dpto. de Suelos y Agroquímica del INICA. Mimeografiado. 150 pp.
96. León, M. E y M. A. Lorenzo (1987): la fertilización N, P y K de la caña de azúcar en la provincia de Ciego de Ávila en base a resultados experimentales. *Prim. Activo Prov. Invest. Prod. de Suelos y Agroquímica. C. Ávila.* 7-21 pp.
97. León, M. E. y R. Villegas (1996): Fundamentación científico técnica de las necesidades de fertilizantes minerales en el cultivo de la caña de azúcar y sus métodos de diagnóstico. Proyecto de Investigación. INICA-MINAZ. 1-4 p.
98. León, M. E; Arzola, N.; R., Villegas y Maribel González (2001b): Evolución de la materia orgánica en suelos cultivados con caña de azúcar. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Varadero Cuba, Simposio Fertilidad del suelo. Boletín No 4. ISSN 1609-1876. 5 pp.
99. León; M. E.; R., Villegas; A., Menéndez; I., Machado y Maribel González (2001a): Generación de recomendaciones de fertilizantes sobre bases experimentales. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Varadero Cuba, Simposio Fertilidad del suelo. Boletín No 4. ISSN 1609-1876. 32 pp.
100. López, E. (1981): Metodología para recomendaciones de fertilizantes en el cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum Officinarum L.*) MINAZ. 33 pp.
101. Lozano, F., N. Milanés y A. Castillo (2001): Pérdidas de nitrógeno total por la quema de la caña de azúcar en el ingenio San José de Abajo S. A. de C. V. Córdoba, Veracruz, México. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Varadero Cuba, Simposio Fertilidad del suelo. Boletín No 4. ISSN 1609-1876. 115 p.

102. Machado, I., A., Menéndez, M. de León y R., Villegas (2000): Metodología estadístico matemática utilizada en la fundamentación científica y nuevas recomendaciones de fertilizantes en el cultivo de la caña de azúcar. Forum de Base INICA. 12 p.
103. Malavolta, E.; y G.C Vitty (1997): Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: Potafos. 319 pp.
104. Martín, J. R; G. E Gálvez; R. De Armas; R. Espinosa; R. R Vigoa y A. León (1987): La Caña de Azúcar en Cuba. Edit. Cient-Téc. 588 p.
105. Martínez Viera R. y B. Dibut (1999): Los biofertilizantes como pilares básicos de la Agricultura Sostenible. En Curso Taller sobre Gestión Medioambiental de Desarrollo Rural, La Habana, pp. 62-81.
106. Mazzarino, M. (2002): Circulación de nutrientes en ecosistemas naturales: conservación en la vegetación y dinámica en el suelo. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo
107. McCaty, G. W. N. L. Lissenko y J. L Stan (1998): Short term changes in soil carbon and nitrogen pools during tillage management transition. Soil Science Society American Journal 62; 1564- 1571.
108. Menéndez, A. (1991): Correlación de las insuficiencias de N, P y K en caña de azúcar, mediante el análisis de tejido vegetal. Tesis en opción de grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. La Habana. 124 pp
109. Michelena, R. (2001): Experiencias en manejo de cuencas en países de Centro y Sudamérica. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Com. IV. 5 pp.
110. Milanés, N. y F. Pardo (1978): Estudio comparativo de tres métodos para calcular pol por ciento y variabilidad de la fibra por ciento en caña de azúcar. Rev. Cienc. de la Agric. (3), 3-8 pp.
111. Milanés, N., F. J. Arreola, A. Castillo (2001): Degradación de los suelos Cambisoles por el cultivo continuo de la caña de azúcar en el ingenio San Miguelito, Veracruz, México. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Boletín Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo. No. 4 Nov. 01. ISSN 1609-1876. 192 pp.
112. Miller, A. J. (1990): Subset, Selection in Regression. Chapman and Hall, London. Journal Statistical Soc. 147 p.
113. MINAZ (1988): Instrucciones metodológicas para el servicio agroquímico cultivo de la caña de azúcar. 78 pp.

114. Murrell, S. And R. Munson (1999): Phosphorus and potassium economics in crop production. Parts 1, 2 and 3. Better Crops with Plant Food. No 3, p. 20-31. Potash and Phosphate Institute. Norcross, Georgia, EEUU.
115. Mutanda, P. P. (1983): Response of sugar cane to nitrogen fertilizer and climate on two major soils in W. Kenya. Procc. XVIII ISSCT. 1(1). 119-152 pp
116. Nelson, L. (1999): Estadística en la investigación del uso de fertilizantes. INPOFOS. 18-27 pp.
117. Opaso, J. y Carrasco, M., (1999): Predicción de la fertilización de corrección de fósforo mediante un modelo simplificado. 14 Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Comisión V, Universidad de la Frontera TEMUCO.
118. PALMAVEN (1999), Filial de PVDSA, Análisis de suelo y su interpretación, Serie Técnica Aprenda Fácil. 5-9 p.
119. Parton, W.J., Stewart, W.B. and Cole, C.V. (1988): Dynamics of C,N,P, and S in grassland soils: A model. Biogeochemistry 5:109-131.
120. Penney, D. C., R. C. Mckenzie, S.C. Notan and T.W. Goddard (1996): Use of crop yield and soil-landscape attribute maps for variable rate fertilization. In Proceceddings Great Plañis Soil Fertility Conference, Denver, Colorado. 6: 126-140.
121. Pérez, F.(1999): Los suelos y el uso de los fertilizantes en la caña de azúcar en Tucumán. Argentina. Tesis en opción al grado Científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. 140 pp.
122. Pérez, F., J Scandaliaris, R. Villegas y G. Fadda (2002): Efecto de la fertilización fosfórica sobre los niveles productivos de caña de azúcar en Tucumán. Informaciones Agronómicas. INPOFOS. Vol. 46, pp: 11-13.
123. Pérez, H. (1982): Fertilización nitrogenada de la caña de azúcar. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. INICA. La Habana. 130 pp.
124. Pérez, H. (1985): Uso del nitrógeno en la caña de azúcar. Boletín INICA. Edición Especial. 1-70 pp.
125. Pérez, J.; J. Roldós; M. Casas y P. L. Cortegaza (2001): Inoculantes microbianos: utilidad de su empleo en la diversificación de la agricultura cañera cubana. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Boletín Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo. No. 4 Nov. 01. ISSN 1609-1876.
126. Pérez, L. y L. Herrera (1998): Aplicación de análisis discriminante para realizar recomendaciones de dosis de nutrientes en maíz (*Zea maiz. L*) UCV. Facultad de

- Agronomía Maracay, Venezuela.
127. Pineda, E. (2000): Los factores edáficos y la respuesta de la caña de azúcar a los fertilizantes. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. (Aun no defendida)INICA-MINAZ, ETICA Villa Clara.
  128. Pineda, E.; A. Menéndez y I. Rodríguez (2001): Factores edáficos asociados a la respuesta de la caña de azúcar a los fertilizantes nitrogenados. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Boletín Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo. No. 4 Nov. 01. ISSN 1609-1876. 116 pp.
  129. Ponce de León, D. y C. Balmaceda (1999): El recurso suelo en el cultivo de la caña de azúcar INICA. La Habana. 115 pp.
  130. Rebolledo, H. (1999): Estimación de diferentes modelos de regresión a experimentos de fertilización y su comparación con fines de generar recomendaciones óptimas económicas. 14 Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Comisión V, Universidad de la Frontera TEMUCO.
  131. Reynoso, A. (1867): Consideraciones respecto de los abonos, dirigidas a los agricultores cubanos. Imprenta Esteriotipia de Ribadeneira, Madrid, 151 pp.
  132. Reynoso, A. (1978): Ensayo sobre el Cultivo de la Caña de Azúcar. Tercera edición, corregida y aumentada. Paris, Ernest Leroux, Librero-Editor. 193 pp.
  133. Roberts, T. L. y J. L. Henry (2001): El muestreo de suelos: los beneficios de un buen trabajo. Informaciones Agronómicas. Enero 2001. No. 42. INPOFOS. 4-13 pp.
  134. Rodríguez, J.; D. Pinochet; F. Matus (2001): Fertilización de los cultivos. Santiago-Talca- Valdivia. I.S.B.N.: 956-288-880-0.
  135. Rodríguez, S. R. y Nilva Osorio (2001): La fertilización con nitrógeno en un experimento de larga duración después de 15 cosechas sucesivas en Las Tunas. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Boletín Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo. No. 4 Nov. 01. ISSN 1609-1876.
  136. Ruiz, María, A. Uset, J. Ruiz, Alicia del Valle, H. Medina y Maira Ferrer (2001): Sistema para estimar la afectación en los rendimientos de la caña de azúcar por clima y suelos. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Boletín Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo. No. 4 Nov. 01. ISSN 1609-1876.
  137. Salgado G.,S., L. Bucio A., L. C. Lagunas E. y D. Riestra (2001): Manejo integral del cultivo de la caña de azúcar en Tabasco. Campus Tabasco, IRENAT-Colegio de Postgraduados. H. Cárdenas, Tabasco. 250 p
  138. Samuels, E. P and B. G. Capó (1956): The response in sugar cane in Puerto Rico to

- various nitrogen sources. Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico. Vol. 36 (3).
139. Sánchez H.,R., D.J. Palma L., C.F. Ortiz G., J.J. Obrador O, y U. López (2000): Efecto de los residuos post-cosecha sobre las propiedades químicas y rendimiento de caña de azúcar en un suelo Vertisol de Tabasco. In: Memorias del IX Día el Cañero. Campus Tabasco, CP-ISPROTAB. H. Cárdenas, Tabasco. pp.42-49.
  140. Sandoval, E. M. A (1997): Indicadores de calidad de suelos con diversos manejos. Tesis de MSc. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 76 pp.
  141. SERFE (2001): Demanda de Fertilizantes Minerales para la Caña de Azúcar en Cuba. Informe INICA-MINAZ. 45 pp.
  142. Shaap, M and FJ. Leij, (1998) :Database related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions. Soil Science, 163(10):765-779.
  143. Shishov, L. L.; Viera Shishova; J. J. Cordero; M. Castellanos (1973): Informe preliminar sobre lixiviación de elemento nutritivos en algunos dedicados al cultivo de la caña de azúcar. Serie Caña de Azúcar . No 60. INICA. ACC. 10 pp.
  144. Sims, J. T. (1999): Soil fertility evaluation. pp. D113-D153. In M. E. Sumner (Ed). Handbook of Soil Science. CRC Press, Boca de Raton, Fl.
  145. Solé, R. V., J. G. P. Gamarra, M. Ginovart, and D. López. (1999): Controlling chaos in ecology: from deterministic to individual-based models. Bulletin of Mathematical Biology 61:1187-1207.
  146. Stanford, G. y A. S. Ayres (1964): The internal nitrogen requirement of Sugar Cane. Soil Sci. 98:339-344.
  147. Strebin, S y A, Urrutia. (1999): Manual de Fertilización de la Caña de Azúcar para los Estados Portuguesa y Cojedes, Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales “ Ezequiel Zamora” (UNELLEZ).
  148. Sumner, M. E. (2001): Diagnostico de los requerimientos de fertilización de cultivos extensivos. Informaciones Agronómicas. INPOFOS. No 44. 8-13 pp.
  149. Tamm, C. O. (1958): The atmosphere. Encyclopedia of Plant of Physiology 4: 233-242 pp.
  150. Terry L. R. (2002): Fertilidad del suelo, altos rendimientos y rentabilidad. Informaciones agronómicas No. 46, Feb. 2002, p. 6-10.
  151. Urquiaga, S., A. S. de Resende, B. J. Alves y R. Boddey (2001): Potencial de la fijación biológica de nitrógeno en la productividad de sistemas agrícolas de América Latina. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Boletín

Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo. No. 4 Nov. 01. ISSN 1609-1876.

152. Urquiaga, S.; B. Alves; R. Boddey; J. Dobereiner (1999): La fijación biológica del nitrógeno como soporte de la agricultura sostenible en América Latina. XIV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Chile. Universidad de la Frontera, TEMUCO.
153. Vera, S. G. (2000) :Influencia de diferentes agrosistemas sobre la densidad aparente de un Vertisol del Plan Chontalpa, Tabasco. Tesis profesional. CEP-CSAEGRO. Cocula, Guerrero. 33 p.
154. Verchot LV; Z. Holmes; L. Mulon; P. M. Groffman; G. M. Lovett (2001): Gross vs net rates of N mineralization and nitrification as indicators of functional differences between forest types. *Soil Biol. Biochem.* 33:1889-1901.
155. Villegas, R. (1999): Manual de procedimientos del SERFE. Prólogo. INICA-MINAZ. 60 pp.
156. Villegas, R. y Regla. M. Chang, (1996): Análisis de la fertilización nitrogenada en cepas de caña planta. Reporte del Dpto. de Suelos y Agroquímica INICA. Ciudad de la Habana. 17 pp.
157. Villegas, R., M. López, M. E. de León (1993): Bases para la fertilización NPK de la caña de azúcar en Cuba. INICA-MINAZ. 8 pp.
158. Villegas, R., O. Iznaga, e I. Cuellar (1983): Metodología para el montaje y conducción de experimentos de campo de nutrición y suelos. Dpto. de Suelos y Agroquímica. INICA. 17 pp.
159. Voisin, A. (1966): Nuevas leyes científicas en la aplicación de los abonos. Editorial Tecnos S. A. Madrid.
160. Whipker, B. E (1997): Greenhouse media. Extracting methods and recommended ranges. 5<sup>th</sup> Soil and Plant Analyses Symposium, Bloomington, Minnesota.
161. Wiedenfeld, P.R. (2000): Water stress during different sugarcane growth periods on yield and response to N fertilization. *Agric. Water Management* 43:173-182.
162. Wood, G. H. (1968): Nitrogen fertilizers use for sugar cane. Amounts of N required *Procc.. S. Africa. Sugar. Tech. ASSOC.* 52 (3), 225-241 pp.
163. Yágodin, B. A., A. Peterburgski, J. Asárov, V. Diomin, B. Pleshkov, N. Reshénikova (1986): *Agroquímica II*. Edit. Mir Moscú. 203-206 pp.