

IMPACTO AGROECONÓMICO DE LA RECOMENDACIÓN DE FERTILIZANTES NITROGENADOS EN PLANTACIONES CAÑERAS EN CUBA

Pablo Pablos Reyes¹, Antonio Menéndez Sierra², Iraida Cabrera¹, Nilda Lora¹, Mario de León³, Emma Pineda², Jesús González y René Barbosa

¹ETICA Oriente Sur Estación Territorial de Investigaciones de la Caña de Azúcar.

²ETICA Estación Territorial de Investigaciones de la Caña de Azúcar Villa Clara.

³INICA Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar.

Email: ppablos@etica.ciges.inf.cu Teléfono: 502254 y 502540

RESUMEN

En el Servicio de Recomendaciones de Fertilizantes y Enmiendas (SERFE), cómo coordinador de todas las actividades relacionadas con la fertilización para la caña de azúcar, se establece una red de Lotes Control (LC), para comprobar la efectividad de las recomendaciones realizadas. Cada LC estuvo formado por tres tratamientos (Testigo sin fertilizante, la dosis recomendada por el SERFE y la doble de esta dosis) distribuidos en banda de seis surcos cada uno en áreas comerciales. Se presentan los resultados de 305 cosechas de estos, distribuidos en todo el país, donde predomina la cepa de retoños (95 %) y el Agrupamiento Agroproductivo Sialitizado Cálculo (43.8 %). El análisis de las cosechas de estos lotes arrojó que: a) el SERFE tiene una efectividad y eficiencia de 74 y 38 %, respectivamente; b) en los campos de altos rendimientos, las dosis están subestimadas, mientras que en los campos de bajos rendimientos se sobreestiman y c) el criterio rendimiento esperado para estimar las dosis de nitrógeno, se realiza al parecer sin bases técnicas, que hacen que éste no sea confiable. Se obtuvieron funciones para estimar los incrementos de rendimiento al aplicar fertilizante nitrogenado y la dosis crítica de este nutriente, se establecen modelos para el cálculo del Valor Actual Neto (VAN) para las diferentes condiciones suelo-cultivo definidos en el estudio. El VAN para todos los suelos estudiados, resultó más elevado en el tratamiento con la dosis óptima económica calculada, de donde se establece que las dosis vigentes en el SERFE resultan insuficientes para alcanzar el máximo beneficio económico, todo lo que conduce a la necesidad de realizar ajustes para lograr una mayor eficiencia del sistema.

Palabras clave: caña de azúcar, fertilizante nitrogenado, valor actual neto, impacto agroeconómico

AGROECONOMIC IMPACT OF THE NITROGEN FERTILIZATION RECOMMENDATIONS IN CUBAN SUGARCANE PLANTATIONS

ABSTRACT

The guide of all the activities in sugar cane fertilization is the Service of Fertilizer Recommendations and Amendments (SERFE). This service has to deal with the establishment of control plots (CP) in order to study the effectiveness of fertilizer recommendations. Each Control Plot was formed by three treatments (a control one without fertilizer, the recommended rates by SERFE and a twofold dose) distributed in stripes of six furrows each in commercial areas. The results of 305 harvests distributed throughout the country are shown, prevailing ratoon crops (95 %) and Cambisol soils (43,8 %). The analysis of harvest data shows that: a) SERFE has an effectiveness and an efficiency of 74 and 38 % respectively; b) the rates for high – yield fields are underestimated, on the other hand for low-yield fields the rates are overestimated; c) the criterion for the expected yield in order to estimate the nitrogen rate is carried out, apparently without technical bases which makes it unreliable, this paper shows the need for carrying out adjustments

to achieve a higher efficiency of the system. To estimate rise in yield when nitrogenous fertilizer is applied and the critical dose of this nutrient were obtained analytical functions; and a model for Net Present Value (NPV) calculation was settled down for different soil-cultivation conditions defined in the study. The NPV for all the studied soils was higher in the treatment with the calculated economic good rate, which settles down that the effective doses in the SERFE aren't enough to reach the maximum economic benefits, all that leads to the necessity of carrying out adjustments to achieve a bigger efficiency of the system.

Key words: nitrogen, sugar cane, nitrogen fertilizer; Net Present Value, agro-economic impacts

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar es cultivada por más de 100 países en más de 20 millones de hectáreas en el mundo, en donde se producen 1,300 millones de toneladas de caña (D'Hont, 2008). Estudios realizados en diferentes partes del mundo reportan que por lo menos entre 30 y 50% del rendimiento de los cultivos es atribuible a los nutrientes aplicados por medio de los fertilizantes minerales comerciales (Stewart *et al.*, 2005; Fixen y García, 2007). En Cuba, los resultados obtenidos en caña de azúcar muestran incrementos en los niveles de rendimiento entre un 15 y 40 % con estos productos (Sulroca, 1996).

En 1997 se generalizó en Cuba, como rector de la fertilización de la caña de azúcar, el Servicio de Recomendaciones de Fertilizantes y Enmiendas (SERFE), resultado de las investigaciones conducidas por más de cuatro décadas por el Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA) (Pineda *et al.*, 2000).

El nitrógeno para la caña de azúcar se aplica en la actualidad, sobre la base de recomendaciones revisadas, corregidas y ajustadas. Estas recomendaciones, vigentes desde 1998, establecieron las dosis a partir del rendimiento esperado, en cuatro escenarios determinados por características del suelo (hidromorfía y compactación manifiesta) y cepas (caña planta y retoños). Como los resultados que dieron lugar a las recomendaciones fueron obtenidos de experimentos de campo, cuyas condiciones y manejo podían diferir de la de los campos comerciales, el SERFE estableció un sistema de "Lotes Control" (LC), consistentes en ensayos en bandas que brindan información para comprobar las recomendaciones y de ser necesario, realizar los ajustes pertinentes para las diferentes condiciones de manejo a lo largo y ancho del país, (Fernández, *et al.*, 2000).

Pasados más de 10 años de establecido el SERFE y con la información de gran cantidad de cosechas de Lotes Control, se presenta un análisis de los resultados obtenidos con el objetivo de determinar la efectividad y eficiencia de las recomendaciones actuales para el nitrógeno y proceder a su perfeccionamiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

La elaboración de este trabajo comprendió datos de cosechas de 305 LC en condiciones de secano, conducidos según las Normas y Procedimientos Metodológicos del SERFE (Villegas *et al.*, 1999), de los que un 46 % correspondió a la parte oriental del país, 30 % a la central y 24 % a la occidental; comprenden nueve Agrupamientos Agroproductivos (Ascanio y Sulroca, 1986) de suelos donde se cultiva la caña de azúcar, predominando los Sialitizados Cálcicos (43,8 %), Vertisuelos (16,8 %) y Ferralitizados Cálcicos (14,5 %) (Tablas 1 y 2). El estudio abarcó 37 variedades de caña de azúcar, predominando las variedades 'CP 52-43' y 'C323-68' y la cepa más evaluada fue la de retoños, con el 95 % de las cosechas y 5 % en plantaciones nuevas (en campañas de frío y primavera) cosechadas en ciclo largo.

Tabla 1. Distribución de los lotes control por provincia

Provincia	n*	%	Provincia	n*	%	Provincia	n*	%
Pinar del Río	37	12	Villa Clara	24	8	Holguín	33	11
Habana	18	6	Sancti Spíritus	27	9	Granma	6	2
Matanzas	18	6	Ciego de Ávila	1	-	Stgo.de Cuba	94	31
Cienfuegos	16	5	Camaguey	24	8	Guantánamo	7	2

n* Cantidad de cosecha de lote control

Tabla 2. Distribución de los lotes control por Agrupamiento Agroproductivo

Agrupamiento Agroproductivo	n*	%	Agrupamiento Agroproductivo	n*	%
Ferralitizado Cálcico	44	14.5	Vertisuelos	51	16.8
Ferralitizado Cuarcítico	26	8.6	Gleyzado Sialitizado	5	1.6
Fersialitizado Cálcico	20	6.6	Gleyzado Ferralitizado	9	3.0
Sialitizados Cálcicos	133	43.8	Aluvial	11	3.6
Sialitizado no Cálcico	5	1.6			

n* Cantidad de cosecha de lote control

Cada LC contó con tres tratamientos, distribuidos en bandas de seis surcos cada uno a una distancia de plantación de 1,60 m, con un área que varió entre 1 008 m² y 2 400 m² en dependencia de la longitud de los surcos del campo comercial donde fue montado: RT1, sin fertilizantes, representante de la fertilidad natural, constituye un "testigo"; RT2 dosis recomendada por el SERFE para el lugar donde se encuentra el LC y RT3, consistente en el doble de la dosis recomendada por el SERFE. La aplicación del fertilizante se realizó de forma mecanizada con la fertilizadora F-350, calibrando la máquina para satisfacer las dosis a aplicar. El uso de una doble dosis se debe a la necesidad de garantizar que el rendimiento que con ella se obtenga, forme parte del rendimiento máximo estable (RME). En el análisis estadístico se consideró como un cuarto tratamiento el rendimiento esperado, con el que se calculó la dosis a aplicar en los LC. Aquellos LC que según las recomendaciones del SERFE requerían de fósforo y potasio, contaron con las cantidades suficientes.

En las cepas de planta, el fertilizante se aplicó en el fondo del surco al momento de la plantación; en los retoños se aplicó, dentro de los 30 días siguientes a la cosecha, enterrado a una profundidad de 10 a 15 cm a ambos lados de la cepa. Como no siempre la dosis recomendada se satisface con la fertilizadora, se llevó el control de la dosis real aplicada y se determinó la diferencia en relación con la dosis recomendada, se hizo además una regresión lineal simple entre ellas para conocer el error medio estimado. Para el nitrógeno se utilizaron como portadores la urea y el nitrato de amonio y para el fondo fosfórico y potásico, superfosfato triple y cloruro de potasio, respectivamente. En todo momento se mantuvieron los campos libres de malezas.

El rendimiento agrícola se determinó mediante el pesaje de los tallos de cada tratamiento en las básculas de los centros de recepción de las empresas azucareras. A los resultados de las cosechas se le realizaron análisis de varianza simple (ANOVA) de tipo efecto fijo y de regresión modelo lineal considerando como variable dependiente la dosis aplicada y el error de estimación. En todos los análisis anteriores se empleó el paquete estadístico Stagraphics 5.0 (STATISTICAL GRAPHICS CORP, 2000).

Para determinar la eficiencia y efectividad de las dosis recomendadas de nitrógeno, se estableció como límite para considerar atractivo el efecto de la fertilización un incremento de caña mayor o igual a 5 t caña·ha⁻¹, lo cual satisface a nivel nacional, la relación del precio del fertilizante y el precio del producto (t de caña) para el rendimiento medio obtenido y las dosis medias empleadas; superior a 15 t·ha⁻¹ para considerarlo muy atractivo, e incremento menor de 5 t·ha⁻¹ las dosis recomendadas no tenían efecto positivo. En este caso la eficiencia se define como las veces que se obtienen incrementos superiores a 5 t caña·ha⁻¹ y la efectividad cuando la dosis recomendada resulta adecuada.

El rendimiento esperado (RE) utilizado para el cálculo de las dosis de nitrógeno debe ser igual al rendimiento observado (RO) con un error de estimación tolerable. A los efectos del análisis se fijó este error en $\pm 10 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, esta diferencia se traduce en error de estimación de las dosis de nitrógeno, dado que el rendimiento esperado es un criterio para la determinación de las mismas. Cuando el error de estimación fue mayor que $10 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ las dosis de nitrógeno se sobrestimaron y cuando fue menor se subestimaron.

Además se realizó un análisis económico utilizando como criterio, el valor actual neto (VAN), para seleccionar la alternativa más beneficiosa. Es el criterio de selección preferido en el análisis de alternativas mutuamente excluyentes, como es el caso de variantes en la fertilización nitrogenada. Conlleva a una decisión futura basada en los precios actuales, mostrando de forma clara cuando los ingresos superan a los egresos (Copelan et al., 2000). Para el cálculo del VAN se utilizó la fórmula:

$$VAN = \sum_{i=1}^n \frac{FC}{(1+td)^i} = \sum_{i=1}^n \frac{I-E}{(1+td)^i}$$

donde “FC” representa el flujo de caja, es la diferencia entre ingresos “I” y egresos “E”, ambos en \$ ha⁻¹; “td” es la tasa de descuento, asumiendo un 7 % anual, (MFP, 2006) y “n” las etapas incluidas en la inversión, que para este caso es 1, ya que la fertilización nitrogenada en Cuba se realiza de forma única para cada ciclo productivo o cepa (Cabrera y Bouzo. 1999).

Para cada condición (dominio de recomendaciones¹) se estableció una función del incremento, para ello se utilizó, la ecuación cuadrática, que mostró buen ajuste: $\text{Inc} = a + b \cdot \text{Dosis} + c \cdot \text{Dosis}^2$, donde “a” es la constante y “b” y “c” los coeficientes de los términos de primero y segundo grados, respectivamente. Esta función permitió determinar el incremento estimado con relación a cantidades variables de insumos. En su utilización se asumió que: a) hay relación causal entre insumos (x_i : N), y productos (y : caña de azúcar); b) hay rendimientos decrecientes para cada insumo (x_i) y c) hay retornos a escala decreciente, por lo que un incremento proporcional de todos los insumos resultará en un incremento menor en la producción. Los ingresos adicionales para cada alternativa fueron determinados en función de los incrementos de producción “Inc”, expresados en t caña·ha⁻¹, modelados a su vez en función de las dosis ($\text{Inc} = f(\text{Dosis})$), expresados en kg·ha⁻¹ de producto activo (N). La expresión para los ingresos fue:

$I = \text{Inc} \cdot \text{pp}$, donde “pp” es el costo de una tonelada caña.

A partir de las ecuaciones del incremento en función de las dosis se estimaron las funciones para el VAN de las que se dedujeron las dosis óptimas económicas (correspondientes al mayor VAN) igualando a cero dVAN/dDos.

¹ Circunstancias lo suficientemente semejantes como para poder recibir la misma recomendación de fertilizante.

Para la evaluación económica en moneda nacional (de utilidad al nivel de los productores), el valor de una tonelada de caña fue de 29.61 CUP·t⁻¹, resultado de descontar a 50.90 CUP·t⁻¹, precio oficial de la caña (MFP, 2006) el valor 21.29 CUP·t⁻¹, costo de la cosecha (cc), comprendiendo corte, alza y tiro. El valor estimado de la caña se dedujo de un precio del azúcar de 286.00 USD·t⁻¹ y un rendimiento industrial base 96 de 11.00 %, (MINAZ, 2008).

La expresión para los egresos fue: $E = pf \cdot \text{Dosis}$, donde “pf” es el costo del producto activo (N). Para la evaluación económica en moneda nacional, el valor de pf fue 0.66 CUP·kg⁻¹ de N aplicado como urea, al precio de 303.20 CUP·t⁻¹, precio estabilizado para el productor, (MINAZ, 2008).

La expresión para el flujo de caja (FC) fue:

$$FC = I - E = pp \cdot \text{Inc} - pf \cdot \text{Dosis} = pp \cdot a + pp \cdot b \cdot \text{Dosis} + pp \cdot c \cdot \text{Dosis}^2 - pf \cdot \text{Dosis}$$

La expresión para el valor actual neto (VAN) fue:

$$VAN = FC/1.07 = (pp \cdot \text{Inc} - pf \cdot \text{Dosis})/1.07 = (pp \cdot a + pp \cdot b \cdot \text{Dosis} + pp \cdot c \cdot \text{Dosis}^2 - pf \cdot \text{Dosis})/1.07$$

A partir de las funciones antes descritas se estimaron los incrementos de producción para las dosis óptimas económicas. Comparando estos incrementos con los medios correspondientes a las dosis del SERFE y las dobles dosis, aportados por la bases de datos de los LC.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evaluación de los resultados de las cosechas de los LC (se incluyen plantas y retoños) a través del análisis de varianza, mostró diferencias significativas entre los tratamientos (Tabla 3). Los tratamientos que recibieron nitrógeno independientemente de la dosis aplicada, superaron significativamente al testigo; de igual forma la doble dosis supera también a la recomendación del SERFE. Resultados similares ya fueron informados por Fernández *et al.*, (2000), al obtener resultados superiores con el doble de la dosis recomendada. Al comparar la dosis del SERFE respecto al tratamiento no fertilizado, se obtuvo un incremento de rendimiento en caña de 11.73 t·ha⁻¹ (21,2%); resultados similares con incrementos superiores (30%) fueron obtenidos por Pineda (2002) y de 5.2 t·ha⁻¹ con el doble de la dosis recomendada por el SERFE (Tabla 4). De esta evaluación se infiere: a) la importancia de la fertilización con N para la caña de azúcar y; b) que para alcanzar el RME se requiere de dosis algo mayores que las vigentes. El hecho de que el rendimiento esperado, (uno de los criterios utilizados para estimar las dosis del SERFE), superara al rendimiento que se alcanzó con las dosis recomendadas (ver Tabla 4), es también indicador de insuficiencia del modelo vigente.

Tabla 3. Análisis de varianza para los lotes controles.

Causas de Variación	Suma de Cuadrados	Grado libertad	Cuadrado Medio	Fcal *	p **
Tratamientos	50642.10	3	16880.70	50.07	0.0000
Error	408959.00	1213	337.15		
Total	459601.00	1216			

* Estadígrafo F de Fisher calculada

** probabilidad estadística

Tabla 4. Comparación de las medias de los rendimientos por tratamientos (n=305)

Tratamientos	Valores		
	Media	Mínimo	Máximo
Testigo	43.47 c	42.02	44.93
Recomendación	55.20 b	53.74	56.66
Doble Recomendación	60.40 a	58.94	61.86
Rendimiento Esperado	57.64 a	56.18	59.09

Como se puede apreciar, el doble de la dosis supera a la recomendación del SERFE y ésta al control sin fertilizante; de esto se puede deducir que, como promedio, las dosis de nitrógeno aplicadas han estado por debajo de los requerimientos; a pesar de haberse estimado las mismas a partir del rendimiento esperado y este ser, significativamente superior al alcanzado, derivándose de ello que la recomendación estaba sobreestimada. Resultados similares fueron obtenidos por De León *et al.*, (2004) al encontrar que las dosis actualmente recomendadas por el SERFE están por debajo de las dosis óptimas estimadas.

Sin embargo, es necesario tener en cuenta que en los resultados de cosecha de los LC existe gran dispersión de los datos, atribuible a factores que no forman parte de las recomendaciones vigentes, pero que influyen y restan eficiencia a las mismas (Figura 1). En todos los tratamientos se observaron valores bajos de producción y las diferencias están, fundamentalmente en los límites superiores.

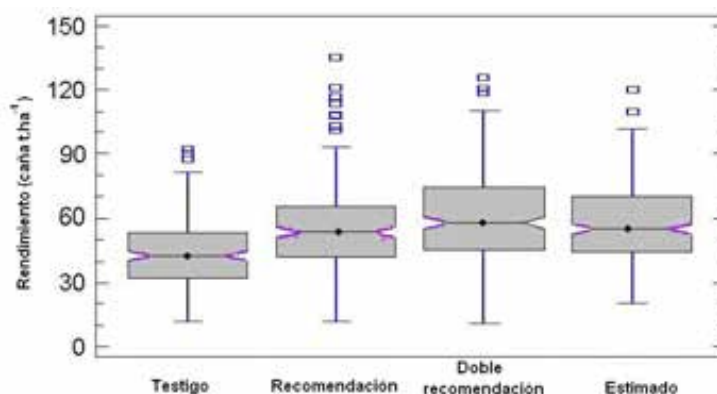


Figura 1. Dispersión de los datos de producción por tratamiento para los lotes controles.

Eficiencia y efectividad del SERFE

Si se establece el indicador de 5 t caña·ha⁻¹ como límite de incremento en caña para considerar atractivo el efecto de la fertilización con nitrógeno y 15 t·ha⁻¹ para considerarlo muy atractivo, la diferencia de rendimiento entre el tratamiento sin fertilizantes y la recomendación del SERFE, mostró resultados atractivos en 74.43% de los casos y muy atractivos en 28.8 % (Figura 2, izquierda). Las diferencias de rendimiento entre el tratamiento correspondiente a la dosis del SERFE y la doble dosis, mostró resultados atractivos en 26.89 % de los casos y muy atractivos en 9.51 % (Figura 2, derecha). De este análisis se concluye que el SERFE tiene una eficiencia de 74 % y una efectividad de 38 %, ya que en 26 % de los casos se recomendó fertilizante que no incrementó el rendimiento y en 36 % (veces que la doble dosis supera la recomendación con más de 5 t·ha⁻¹), debió aplicarse una dosis superior, al lograrse incrementos con la doble dosis en está.



Figura 2. Respuesta a la fertilización nitrogenada en los Lotes Controles. La alta respuesta es cuando el incremento obtenido es mayor de 15 t.ha⁻¹ de caña, al compararlo con el tratamiento testigo y la dosis recomendada por el SERFE; con respuesta cuando el incremento está entre 5 y 15 t.ha⁻¹ y sin respuesta cuando es menor de 5 t.ha⁻¹.

El rendimiento esperado de la aplicación del fertilizante

Las diferencias entre el rendimiento esperado y el real (error de estimación) en 305 cosechas se muestran en la Figura 3. En 58 % de los casos se estimó de más o de menos. Cuando se estimó de más, 32 % de los casos, parte superior de la figura se aplicó más fertilizante que el que correspondía según el modelo utilizado. El exceso de nitrógeno afecta la salud humana y los ecosistemas fundamentalmente como NO₃ (Roy *et al.*, 2006; Estrada *et al.*, 2007; Moreno, 2010,), contribuye al cambio climático a través de las emisiones de N₂O (Macedo *et al.*, 2008), además de participar en la fertilización de plantas indeseables. Cuando se estimó de menos, 26 % de los casos se afectó la producción (11.1 t.ha⁻¹ como promedio²).

Cuando se analizó el error de estimación con relación al rendimiento observado (Figura 4) se pudo apreciar que los campos de baja producción eran los sobreestimados mientras los de alta producción eran subestimados.

Otro de los problemas fundamentales esta asociado con la dosis aplicada; la Figura 5 muestra la relación entre la dosis de nitrógeno recomendada y la dosis aplicada, en la misma se observa que la aplicación de nitrógeno tiene, como promedio, una desviación de ± 7.58 kg N.ha⁻¹, asociado con la precisión de los equipos empleados para la fertilización muy limitado en la aplicación de dosis bajas.

² Diferencia promedio entre los rendimientos correspondientes a la dosis recomendada y la doble dosis cuando esta última resulta significativamente superior.

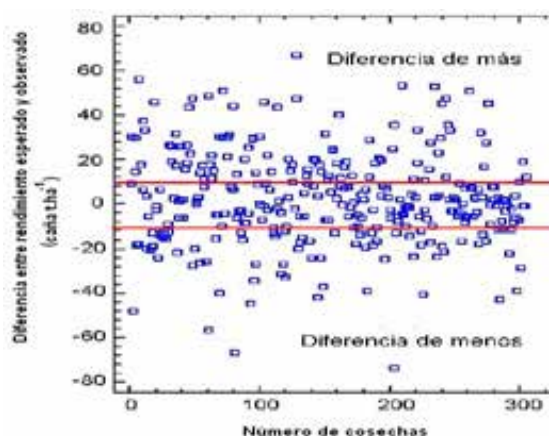


Figura 3. Error de estimación del rendimiento esperado con relación al rendimiento observado en los lotes controles. Las líneas rojas representa el error de estimación definido como tolerable en este análisis $\pm 10 \text{ t ha}^{-1}$, mientras que los puntos las cosechas analizadas (305).

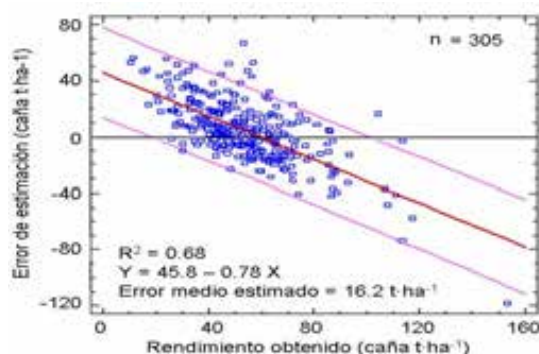


Figura 4. Error de estimación en función del rendimiento observado en tratamientos con dosis del SERFE.

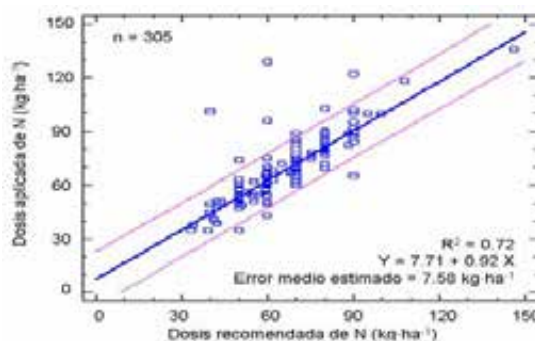


Figura 5. Relación entre dosis recomendadas y real de nitrógeno aplicada en los lotes control.

La combinación de estos dos factores: altas aplicaciones a los campos con bajas producciones y respuesta observada en los campos de alta producción, se observa en la Figura 6. En la misma se aprecia cómo el índice de consumo de nitrógeno disminuye con el aumento de la producción y en esa misma medida aumenta la respuesta a los fertilizantes. Se reporta que una producción alta y estable en los retoños, demanda, por lo general, de una relación entre el N aplicado y la caña producida de 1.0 a 1.5 kg t^{-1} de tallos (Berstch, 2003; Cuellar *et al.*, 2003), recomendando este último como criterio regulador de la dosis en relación con el rendimiento esperado, aunque, en condiciones locales este índice puede bajar a valores entre 1.1 – 1.2 kg de N t^{-1} de tallos (INICA, 1993).

Estos resultados ponen de manifiesto que: a) no se aprovecha todo el fertilizante aplicando de más a los campos de bajo rendimiento que no responden a las aplicaciones de nitrógeno, pues las causas de su baja producción son ajenas a la fertilización (despoblación, estrés hídrico, manejo agronómico inadecuado) y, b) se deja de producir al aplicar menos fertilizante que el necesario en las áreas de buena población y manejo, donde los factores limitantes son mínimos o están atenuados.

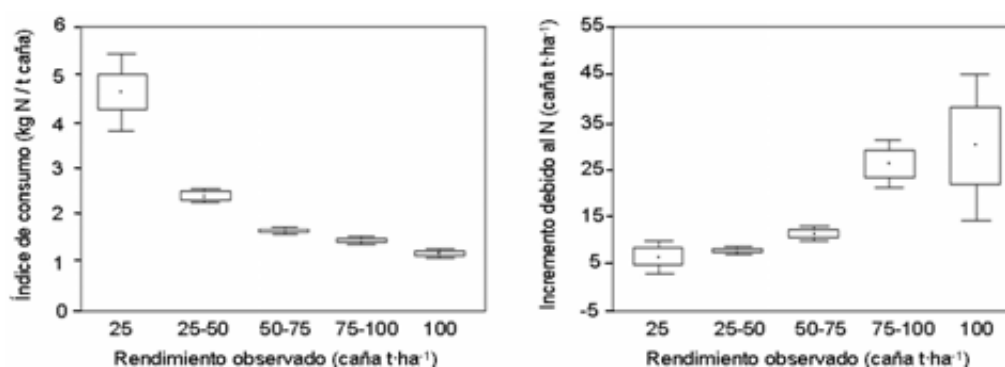


Figura 6. Contradicción de la fertilización nitrogenada según resultados de Lotes Controles.

La causa fundamental de la imprecisión del sistema actual de recomendaciones de nitrógeno para caña de azúcar, está en la deficiente estimación del rendimiento para el que se fertiliza (rendimiento esperado). En Cuba la caña de azúcar se fertiliza inmediatamente después del corte o lo mas próximo posible a éste, por esa razón la caña que se fertiliza siquiera ha brotado, el año de crecimiento está por transcurrir y con él, las condiciones en que se desarrollará el cultivo (clima, malezas, plagas y enfermedades, entre otros), pero además, debido a problemas logísticos el rendimiento del campo se infiere con al menos cuatro meses de antelación a la cosecha, esto hace que el rendimiento esperado más que una estimación sea una predicción. A ello se une el falso criterio, aún arraigado entre productores, de que la solución para los campos de bajo rendimiento es la alta aplicación de nitrógeno, lo que contribuye a que se declare un rendimiento esperado sobrestimado en los peores campos.

La diferencia entre el “rendimiento esperado”, utilizado para la fertilización y el “rendimiento estimado”, como pronóstico para la producción de azúcar, es del orden de las 20 t·ha⁻¹, lo que hace del rendimiento esperado un indicador incierto.

Análisis económico

Como en el tratamiento I la dosis fue cero, el incremento también fue cero (punto 0, 0); por lo que, para el término constante de las referidas funciones se obtuvo el rendimiento sin fertilizantes. La Tabla 5 muestra las ecuaciones para el incremento de producción de los lotes controles (LC) para suelos del Agrupamiento Agroproductivo.

Al comparar la media de los incrementos de producción estimados para las dosis óptimas económicas con los incrementos medios correspondientes a las dosis del SERFE y las dobles dosis aportados por la bases de datos de los LC, se observó que los mayores incrementos correspondían a los tratamientos con doble dosis, pero muy cercanos a los que se lograron con la dosis óptima económica (sólo 2.64 t caña ha⁻¹ al nivel de todos los suelos, con una dosis de N de 48.6 kg·ha⁻¹ mayor). Teniendo en cuenta que la relación precio por unidad de fertilizante: precio de la caña (pf/pp) es igual a 0.08573 t·kg⁻¹, se requiere producir al menos 4.17 t·ha⁻¹ de caña, para cubrir esta diferencia de dosis, lo que no satisface el incremento de producción logrado. Las diferencias de incremento obtenidos entre las dosis del SERFE y las dosis dobles y óptimas económica, fueron de 4.81 y 2.17 t·ha⁻¹ de caña, respectivamente, con incrementos de dosis de 70.00 y 21.44 kg·ha⁻¹ requiriéndose incrementos mínimos de 6.00 y 1.83 t caña ·ha⁻¹, por lo que los únicos resultados admisibles correspondieron con la dosis óptima económica, lo que muestra que con el actual sistema de fertilización nitrogenada no se logran los mayores incrementos (Tabla 6).

Tabla 5. Funciones de incremento en los LC para suelos del Agrupamiento Agroproductivo

Agrupamiento Agroproductivo	Función para el incremento en función de las dosis ($a + b * \text{Dosis} + c * \text{Dosis}^2$)
Ferralitizados Cálcidos	$43.9 + 0.226940 * \text{Dos} - 0.0005937 * \text{Dos}^2$
Ferralitizados Cuarcíticos	$38.1 + 0.125556 * \text{Dos} - 0.0001678 * \text{Dos}^2$
Fersialitizados Cálcidos	$42.6 + 0.300486 * \text{Dos} - 0.0012760 * \text{Dos}^2$
Sialitizados Cálcidos	$41.4 + 0.185929 * \text{Dos} - 0.0006561 * \text{Dos}^2$
Sialitizados no Cálcidos	$45.4 + 0.192627 * \text{Dos} - 0.0004524 * \text{Dos}^2$
Vertisuelos	$43.6 + 0.210411 * \text{Dos} - 0.0005892 * \text{Dos}^2$
Gleyzados Ferralitizados	$43.0 + 0.116216 * \text{Dos} - 0.0002757 * \text{Dos}^2$
Gleyzados Sialitizados	$37.5 + 0.256429 * \text{Dos} - 0.0006551 * \text{Dos}^2$
Aluviales	$40.2 + 0.222027 * \text{Dos} - 0.0005716 * \text{Dos}^2$
Todos los suelos	$41.9 + 0.199928 * \text{Dos} - 0.0006244 * \text{Dos}^2$

Tabla 6. Dosis media del SERFE por Agrupamiento Agroproductivo, doble dosis del SERFE, dosis óptima estimada, incrementos medios correspondientes a cada una de ellas y valor actual neto correspondiente a la dosis óptima económica.

Agrupamiento Agroproductivo	Dosis								
	SERFE			Doble SERFE			Óptima económica		
	Dosis	Inc.	VAN	Dosis	Inc.	VAN	Dosis	Inc	VAN
	kg N.ha ⁻¹	t.ha ⁻¹	\$.ha ⁻¹	kg N ha ⁻¹	t.ha ⁻¹	\$.ha ⁻¹	kg Nha ⁻¹	t.ha ⁻¹	\$.ha ⁻¹
Ferralitizados Cálcidos	67	12.5	88.15	134	19.8	107.16	118.9	18.6	108.9
Ferralitizados Cuarcíticos	72	8.2	25.91	144	14.6	29.25	118.9	12.5	30.6
Fersialitizados Cálcidos	72	15.0	114.76	144	16.8	57.91	84.14	16.2	117.2
Sialitizados Cálcidos	70	9.8	49.25	140	13.2	15.09	76.34	10.4	49.59
Sialitizados no Cálcidos	59	9.8	61.38	118	16.4	81.91	118.1	16.4	81.9
Vertisuelos	73	12.2	77.33	146	18.2	73.20	106.7	15.7	85.6
Gleyzados Ferralitizados	74	7.1	9.66	148	11.2	-19.86	55.2	5.6	10.9
Gleyzados Sialitizados	70	14.7	113.36	140	23.1	143.43	130.2	22.3	144.2
Aluviales	74	13.3	90.20	148	20.3	99.20	119.2	18.3	105.3
Todos los suelos	70	10.9	64.00	140	15.7	48.63	91.4	13.1	67.7

Por su parte el valor actual neto (VAN), muestra de forma clara la medida en que los ingresos superan a los egresos, y conlleva a decisiones futuras basadas en los precios de hoy; éste fue, para todos los suelos, más alto en el tratamiento con la dosis óptimas económica.

De todo lo anterior se establece que las dosis vigentes en el SERFE resultan insuficientes para alcanzar el rendimiento máximo estable. En algunos suelos esta situación no es tan precaria, por ejemplo en los Sialitizados Cálcidos, dada sus condiciones de fertilidad natural y buenas propiedades físicas.

CONCLUSIONES

1. La evaluación de las recomendaciones de fertilización nitrogenada actuales, mostró la necesidad de modificar los criterios diagnósticos y la identificación y delimitación de dominios de recomendaciones más precisos, con vistas a establecer dosis de fertilizantes nitrogenados más acordes con los requerimientos de este cultivo al nivel de unidades mínimas de manejo.
2. Las funciones obtenidas permitieron estimar la dosis crítica de N y los incrementos de rendimiento de la caña de azúcar por la aplicación de este nutriente. Los modelos para el cálculo del VAN en las diferentes condiciones suelo-cultivo definidas en el estudio constituyen herramientas para definir los escenarios de mayor prioridad de aplicación.
3. En los Lotes Control el VAN fue más alto en el tratamiento con la dosis óptima económica obtenida, siendo las dosis vigentes en el SERFE insuficientes para alcanzar el máximo beneficio económico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- Bertsch, F. 2003. Absorción de nutrientes por los cultivos. San José Costa Rica. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
- 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.
- Copeland, T., Koller, T., Murrin, J. 2000. Valuation, measuring and managing the value of companies. 3rd ed. McKinsey Company Inc. 494 p.
- Cuellar, I.; M. de León; A. Gómez; D. Piñón; R. Villegas e I. Santana. 2003. Caña de azúcar, Paradigma de sostenibilidad. La Habana. Editorial Publinica: 87-94.
- De León, M., J. Campos, I. Machado, G. Betancourt y L. Soler. 2004. Lotes controles del SERFE, vía para incrementar el rendimiento agrícola de la caña de azúcar. 5p.(monografía).
- D'Hont, A.2008. Sugarcane: A Major Source of Sweetness, Alcohol, and Bio-energy. Springer. Genomics of tropical crop plants. Springer.p. 483-513.
- Estrada, B.M., Nikolskii, G.A., Mendoza, P.J.D., Cristóbal, A.D., De la Cruz; L.E, Brito, M.N., Gómez, V.A. y Bakhlaev, E.O. 2007. Lixiviación de nitrógeno inorgánico en suelo agrícola bajo diferentes tipos de drenaje en el trópico húmedo. Universidad y Ciencia. 1: 1-13.
- Fernández, A; L. Madan.; P. L. Cortegaza; A. Valdés; R. Blanco. 2000. Los lotes controles; eslabón fundamental del servicio de recomendaciones de fertilizantes y enmiendas en el cultivo de la caña de azúcar. Dpto. Suelos y Agroquímica. EPICA Matanzas, INICA, MINAZ. (Archivos INICA).
- Fernández, A. L. Madan, A. Chinea, A, Fernández, P. Cortegaza, R. Blanco, A. Valdés, N. Hernández y R. Blanco. 2000. La fertilización química superficial: una práctica nociva para el productor de caña de azúcar. Resúmenes del Evento 40 Aniversario EPICA Santiago de Cuba.
- Fixen, P.E. y F.O. García. 2007. Decisiones efectivas en manejo de nutrientes... más allá de la próxima cosecha. Informaciones agronómicas 64:5-11.
- INICA. 1993. Bases para la fertilización NPK de la Caña de Azúcar en Cuba.
- Macedo I.C; Seabra J.E.A. and Silva JEAR.2008. Greenhouse gas emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/06 averages and a prediction for 2020. Biomass and Bioenergy, 32: 582-595.
- MFP. 2006. Resolución No. 143-2006, sobre el nuevo precio de la caña de azúcar. Ministerio de Finanzas y Precios.
- MINAZ. 2008. Lineamientos generales para la aplicación de bioestimulantes y fertilizantes a la caña de azúcar en el 2009. Ministerio del Azúcar. 11 p. (monografía).

- Moreno Seceña, J.C. 2010. Evaluación del manejo del nitrógeno en el agroecosistemas caña de azúcar. Veracruz, 115 p. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduado Campus Veracruz.
- Pineda, E. C. Carballo, H. Pérez y H. del Río. 2000. Implementación de un nuevo programa de fertilización cañera en Villa Clara. Revista Centro Azúcar 4: 51-55.
- Pineda, E. 2002. Factores asociados con la respuesta de la caña de azúcar a los fertilizantes minerales. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor. en Ciencias Agrícolas. 102 p.
- Roy, R. N.; Finck, A.; Blair G .J. and Tandon H. L. S 2006. Plant nutrition for food security: A guide for integrated nutrient management.. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 16, FAO, Rome.
- STATISTICAL GRAPHICS CORP. 2000. STATGRAPHICS Plus. Versión 5.0. Paquete estadístico.
- Stewart, W.M., D.W.Dibb, A.E.Johnston y T.J.Smyth. 2005. The contribution of comercial fertilizer nutrients to food production. Agronomic Journal. 97:1-6.
- Sulroca, F. 1996. Principios básicos para la fertilización de la caña de azúcar en Cuba. Dpto. Suelos y Agroquímica. Dirección de Agronomía, MINAZ.
- Villegas, R.; M de León; J. Campos; A. Valdés; A. Fernández; A. Menéndez; A. Cabrera; M. Pérez; 1999.Manual de procedimientos del SERFE. INICA-MINAZ.56 pp.