



COMPARACIÓN DE DOS MODELOS DE RESPUESTA A DOSIS DE NITRÓGENO EN MAÍZ Y CAFETO

Comparison of two models of response to nitrogen doses in corn and coffee

**Gloria M. Martín Alonso¹, Alberto Pérez Díaz²,
Ramón Rivera Espinosa¹, Carlos Bustamante González³,
Rolando Viñals Núñez³ y Mario Varela Nualles¹**

ABSTRACT. The common method to generate fertilizer recommendations is by fitting yield data for each crop separately through mathematical models. This work was carried out with the objective of comparing two response equation models to nitrogen rates in two economically important crops, corn and coffee, besides defining the most appropriate criteria to select the model that offers an adequate optimal fertilization rate. Thus, N doses from 0 to 200 kg ha⁻¹ for corn (*Zea mays*) were studied along with different types of crop rotation: fallow followed by corn; fallow-corn inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF); jackbean-corn and jackbean-corn inoculated with AMF, in experiments performed during 2003 and 2006. In the case of coffee crop, N doses from 0 to 400 kg ha⁻¹ were studied depending on plant age, within the first two productive cycles of a *Coffea canephora* plantation, during 1996 and 2007. The rectilinear discontinuous model with lineal equations and the curvilinear continuous model with second degree equations were compared. Maximum yield, optimum economic rate and partial productivity factor were estimated by the equations obtained from each model. In both crops studied, the rectilinear discontinuous model offered lower fertilizer dose estimations than the one obtained by the curvilinear model, so that together with the partial productivity factor, they constitute effective methods to estimate the amount of nutriment to be applied, avoiding N overdoses..

RESUMEN. El método común para generar recomendaciones de fertilización, es ajustar los datos de rendimiento en forma independiente para cada cultivo, a través de modelos matemáticos. El trabajo se realizó con el objetivo de comparar dos modelos de ecuaciones de respuesta a dosis de nitrógeno, en dos cultivos de importancia económica: maíz y café y definir los criterios más adecuados para seleccionar el modelo que ofrezca una dosis óptima de fertilización. Se estudiaron dosis de nitrógeno que oscilaron desde 0 hasta 200 kg ha⁻¹ para el cultivo del maíz (*Zea mays*) en presencia de diferentes tipos de rotación: barbecho seguido de maíz; barbecho maíz inoculado con hongos micorrízicos arbusculares (HMA); canavalia maíz y canavalia maíz inoculado con HMA, en experimentos ejecutados durante los años 2003 y 2006. En el caso del café, se estudiaron dosis que oscilaron entre 0 a 400 kg ha⁻¹, en dependencia de la edad de la planta, durante los dos primeros ciclos productivos de un cafetal de *Coffea canephora*, entre los años 1996 y 2007. Se compararon el modelo discontinuo rectilíneo con ecuaciones lineales y el curvilíneo continuo, con ecuaciones de segundo grado. Con las ecuaciones obtenidas en cada modelo se estimó el rendimiento máximo, la dosis óptima económica y el factor parcial de productividad. El modelo discontinuo rectilíneo, en los dos cultivos estudiados, ofreció estimados de la dosis óptima de fertilizante a aplicar inferiores al que el que se obtiene mediante el modelo curvilíneo, por lo que de conjunto con el factor parcial de productividad, constituyen métodos efectivos para estimar la cantidad de nutrimentos a aplicar en un cultivo, evitando aplicaciones excesivas de nitrógeno.

Key words: *Coffea canephora*, application rates, maize, linear models

Palabras clave: *Coffea canephora*, dosis de aplicación, maíz, modelos lineales

¹ Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), gaveta postal 1, San José de las Lajas, Mayabeque, CP 32 700.

² Facultad Agroforestal de Montaña, Universidad de Guantánamo, Carretera a Santiago de Cuba, km 2 ½, Guantánamo, Cuba.

³ Instituto de Investigaciones Agroforestales. UCTB-Tercer Frente, CP 92700, Santiago de Cuba, Cuba.

✉ gloriam@inca.edu.cu

INTRODUCCIÓN

Una actualización de las proyecciones de Naciones Unidas sobre el crecimiento de la población mundial, afirma que la actual estimada en 7 000 millones, aumentará en mil millones en los próximos 12 años^A, lo que trae por consecuencia la necesidad de incrementar el rendimiento de los cultivos y la eficiencia de la producción agraria para cubrir la demanda de alimentos para una población en constante aumento (1).

El nitrógeno (N) ha sido determinante en el incremento de las producciones agrarias en los últimos cincuenta años. Distintos estudios demostraron que una tercera parte del incremento de la producción mundial agrícola en los años setenta y ochenta del siglo XX se debió al aumento del uso de fertilizantes. Sin embargo, cuando el N no se utiliza de manera adecuada, puede tener efectos negativos sobre el medio ambiente. Los problemas más importantes que puede generar el nitrógeno son debidos a las pérdidas que se producen por lavado, volatilización y desnitrificación (2).

La aplicación de las cantidades adecuadas de nutrientes es un aspecto clave en el incremento de la producción agrícola. En la actualidad, las recomendaciones de fertilización utilizadas por los agricultores son muy generales y en algunos casos no se relacionan con los requerimientos de nutrientes del cultivo y la disponibilidad en el suelo, dando lugar a un uso desequilibrado e ineficiente de los fertilizantes y a elevados costos de producción.

En términos generales, no existe un método de análisis para medir la disponibilidad de N en el suelo que pueda ser utilizado rutinariamente por los laboratorios, debido en gran parte, a las transformaciones del N en el suelo, las que son influenciadas por las condiciones ambientales. Por lo tanto, las recomendaciones sobre las necesidades de N deben basarse en las curvas de respuesta obtenidas en diferentes condiciones edafoclimáticas (3).

En función de esto, especial atención han tenido los modelos matemáticos para la predicción de la respuesta productiva de los cultivos a los fertilizantes, pues permiten dar 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 agroecosistema y otras variables útiles para la toma de decisiones^B.

El método común para generar recomendaciones de fertilización, es ajustar los datos en forma

independiente para cada cultivo, a través de modelos matemáticos. Usualmente se propone el modelo cuadrático, el cual tiene la desventaja de sobreestimar las dosis óptimas. Por ello resulta aconsejable el ajuste y comparación de varios modelos antes de efectuar recomendaciones de fertilización (4).

Entre los modelos que se recomienda analizar están, el cuadrático con meseta; el logístico, utilizado como modelo de crecimiento; el exponencial o de Mitscherlich; el senoidal; modelos polinomiales con diversos exponentes en la variable predictora, como el valor 0,5 (para el modelo raíz cuadrada), 0,75 o 1,5 u otro valor adecuado para modelar la curvatura de la respuesta (5).

Uno de los modelos desarrollados es el discontinuo rectilíneo (6), que tiene un punto inicial de respuesta con el nutriente al mínimo (factor limitante) y un punto final, que es el rendimiento máximo estable. La interpretación mediante el modelo discontinuo da estimaciones lógicas de los requerimientos de los nutrientes. La interpretación curvilínea de esos mismos datos ofrece predicciones irrazonables del requerimiento de nutrientes.

Debido a esta problemática es que se realizó la presente investigación, con el objetivo de comparar dos modelos de ecuaciones de respuesta a dosis de nitrógeno, en dos cultivos de importancia económica, maíz y café y definir los criterios más adecuados para seleccionar el modelo que ofrezca una dosis óptima de fertilización.

MATERIALES Y MÉTODOS

Maíz

En la investigación se evaluó la influencia de *Canavalia ensiformis* (L.) D.C., empleada como abono verde en sucesión y de la inoculación micorrízica del maíz (*Zea mays* L.) con una cepa eficiente de HMA sobre los requerimientos de fertilizante nitrogenado de este cultivo en suelo Nitisol Ródico Étrico (7). Se realizó un experimento en parcelas ubicadas en el Departamento de Servicios Agrícolas del Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), a 23°01' Lat N y 82°08' Long O, a 138 m s. n. m., municipio San José de las Lajas, Mayabeque, en el occidente de Cuba. El experimento se ejecutó durante el período mayo-octubre (estación de lluvias) en los años 2003 y 2006.

El diseño experimental empleado fue de parcelas divididas, con cuatro repeticiones. Durante el primer año (2003) se establecieron como parcelas principales

^AServicio de Noticias de las Naciones Unidas. *Centro de noticias de la ONU en español - La población mundial crecerá en mil millones en la próxima década* [en línea]. cod. Servicio de Noticias de las Naciones Unidas, [Consultado: 15 de enero de 2016], Disponible en: <<http://www.un.org/spanish/News/story.asp?newsID=26703#.VphCeU9BcYt>>.

^BRodríguez, de la T. E. *Bases de conocimientos para generar modelos predictivos de respuesta a los fertilizantes nitrogenados en agroecosistemas cañeros* [en línea]. [Tesis de Maestría], Universidad Agraria de La Habana, La Habana, Cuba, 2002, 86 p., [Consultado: 26 de junio de 2014], Disponible en: <<http://www.monografias.com/trabajos-pdf/conocimientos-modelos-fertilizantes-nitrogenados-agroecosistemas/conocimientos-modelos-fertilizantes-nitrogenados-agroecosistemas.pdf>>.

las secuencias siguientes: 1) barbecho por dos meses y siembra posterior de maíz, 2) canavalia como abono verde precedente al cultivo de maíz y 3) canavalia como precedente y el maíz se inoculó con la cepa de HMA *Glomus cubense*, cepa INCAM 4 (8) procedente del cepario del INCA por la técnica de recubrimiento de semillas, empleando un inoculante de calidad mínima garantizada, 20 esporas g⁻¹ de inoculante y en una dosis equivalente al 10 % del peso de la semilla.

En cada secuencia se evaluaron como subparcelas, cinco dosis de fertilizante mineral nitrogenado (0; 50; 100; 150 y 200 kg N ha⁻¹). Se empleó la variedad de maíz "Francisco mejorado", patrocinada por el Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical Alejandro de Humboldt (INIFAT) de Cuba.

Durante el segundo año (2006) se estudiaron las mismas secuencias descritas y se añadió una secuencia más consistente en barbecho por dos meses y siembra posterior de maíz inoculado con la misma cepa de HMA.

La canavalia precedente al maíz se sembró en el mes de mayo de los años estudiados; se empleó como marco de plantación la distancia de 0,45 x 0,30 m y dos semillas por nido. Cada parcela tenía 12 surcos de canavalia y 7 m de largo. Como área de cálculo se consideraron los ocho surcos centrales de cada parcela.

El abono verde se cortó e incorporó a los 60 días de germinado, al inicio de la floración. El corte e incorporación al suelo se realizó mediante un arado integral de tres discos a una profundidad de 20 cm. Se utilizó nitrato de amonio (NH₄NO₃) como portador, fraccionado al 50 % de la dosis en el momento de la siembra y 50 % a los 30 días después de la germinación del maíz (Tabla I).

La siembra del maíz se realizó en el mes de agosto, de forma manual 20 días después de la incorporación del abono verde. Se empleó como marco de plantación la distancia de 0,90 x 0,30 m, en seis surcos por parcela y se consideraron los cuatro surcos centrales como área de cálculo. En el momento de la cosecha de maíz verde, se determinó el rendimiento (t ha⁻¹).

Las características del suelo y clima, así como los resultados agronómicos de este experimento se detallan y discuten en el volumen 43, número 2 de la revista Cuban Journal of Agricultural Science (9).

CAFETO

Con el propósito de determinar el efecto de la fertilización N sobre el rendimiento del *Coffea canephora*, se realizó este experimento en la localidad Cruce de los Baños, municipio Tercer Frente, macizo montañoso Sierra Maestra, a los 20°09' lat N y 76°16' long O, a 35 km ONO de la ciudad de Santiago de Cuba, a 150 m s. n. m., en un suelo Cambisol háplico (10) y en La Alcarraza, situada en el municipio Sagua de Tánamo, macizo montañoso Nipe-Sagua-Baracoa, a los 20°35' lat N y 75°15' long O, a 118 km ESE de la ciudad de Holguín, con una altura de 300 m s. n. m., en la región oriental de Cuba, en un suelo Cambisol estagnico (7).

Las posturas fueron plantadas en mayo de 1996 a una distancia de 3 x 1,5 m entre plantas, para una población de 2 222 plantas ha⁻¹. En un diseño experimental de bloques al azar, se estudió la respuesta a cinco sistemas de fertilización nitrogenada (Tabla II), con cuatro réplicas, durante dos ciclos productivos. Las parcelas experimentales estuvieron compuestas por tres hileras de siete plantas cada una, de ellas las cinco centrales de cada surco se consideraron de cálculo.

Tabla I. Tratamientos estudiados en el experimento de maíz

Dosis	Secuencias			
	Barbecho-maíz (kg N ha ⁻¹)	Canavalia-maíz (kg N ha ⁻¹)	Canavalia-maíz+HMA (kg N ha ⁻¹)	Barbecho-maíz+HMA (kg N ha ⁻¹)
Fertilizante mineral	0	0	0	0
	50	50	50	50
	100	100	100	100
	150	150	150	150
	200	200	200	200

Barbecho: suelo en descanso por dos meses; Abono verde: *Canavalia ensiformis*; Fertilizante mineral: NH₄NO₃
Inoculación con HMA: EcoMic® a base de *Glomus cubense*

Tabla II. Dosis de nitrógeno (kg ha⁻¹) empleadas en los esquemas de fertilización estudiados en el cultivo de cafeto

Tratamientos	Primer ciclo productivo			Segundo ciclo productivo		
	1996	1997	1998-2002	2003	2004	2005-2007
N ₀	0	0	0	0	0	0
N ₁	30	45	50	50	75	100
N ₂	60	90	100	100	150	200
N ₃	90	135	150	150	225	300
N ₄	120	180	200	200	300	400

En el primer ciclo, la dosis de N en 1996, 2000, 2001 y 2002 se fraccionó al 50 %, con dos aplicaciones anuales (abril e inicio de octubre). En 1997, 1998 y 1999 se fraccionó en tres momentos a partes iguales (abril, julio y octubre), en ambas localidades.

En el segundo ciclo, la dosis de nitrógeno se fraccionó al 33 % y se aplicó todos los años en tres oportunidades (abril, junio e inicios de octubre). Como portador se utilizó urea. Los fertilizantes se incorporaron en forma de media luna, alrededor del tallo, a unos 50 cm de este.

Todos los años se cosecharon los frutos maduros de cada parcela, se pesaron (kg) y se extrapolaron a t ha⁻¹ de café cereza y posteriormente a tonelada de café oro por hectárea (t ha⁻¹ de café oro).

Las características del suelo y clima, así como los efectos agronómicos de este experimento se detallan en el volumen 38, número 4 de la revista Centro Agrícola (11) y en el volumen 46, número 8 de la revista Pesquisa Agropecuaria Brasileira (12).

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para la interpretación de los datos de la respuesta al fertilizante de cada experimento, se realizó el ajuste de datos según el modelo discontinuo rectilíneo (6). Para esto se tomaron los resultados de los rendimientos agrícolas y se ordenaron en función de las dosis crecientes de nutrientes, se estableció el rendimiento máximo estable, la pendiente de la respuesta y el punto de inflexión del rendimiento.

Al final se realizó la interpretación matemática de respuesta al nutriente:

$$y = a x + b \text{ (donde } y \text{ max se obtiene en la rec } x)$$

- y: rendimiento
- a: rendimiento con el nutriente al mínimo
- x: cantidad aplicada del nutriente
- b: pendiente de la respuesta
- y max: rendimiento máximo estable
- rec x: dosis óptima recomendada

Como modelo tradicional de ajuste se empleó el curvilíneo, empleando ecuaciones cuadráticas de segundo grado, y se determinó el punto crítico [dosis de N (x) con el cual el rendimiento (y) se hace máximo] mediante la primera derivada de la ecuación.

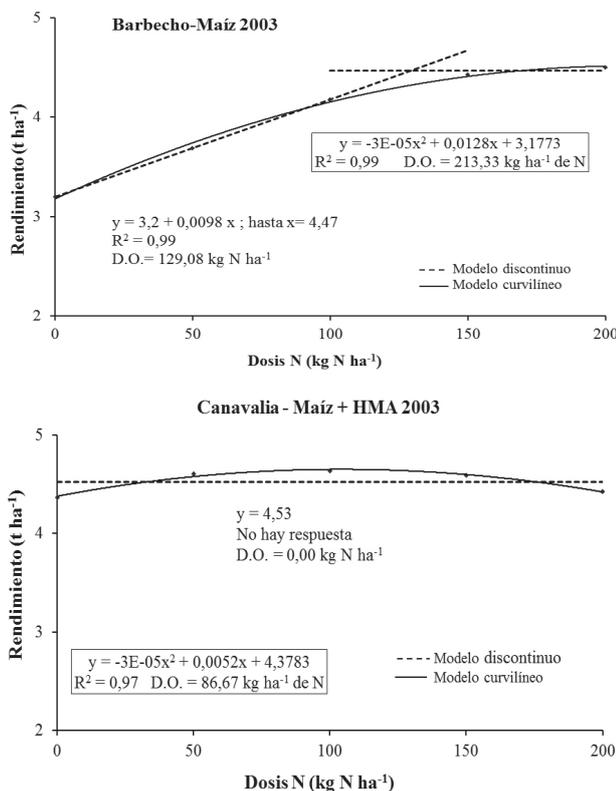
A partir del rendimiento estimado por el cálculo de cada uno de los modelos y donde se obtuvo una dosis óptima de fertilizante mineral nitrogenado, se determinó el factor parcial de productividad (FPP) mediante la siguiente ecuación (13):

$$FPP = \frac{\text{rendimiento del cultivo (kg ha}^{-1}\text{) / dosis del nutriente aplicado (kg ha}^{-1}\text{)}}{1}$$

RESULTADOS

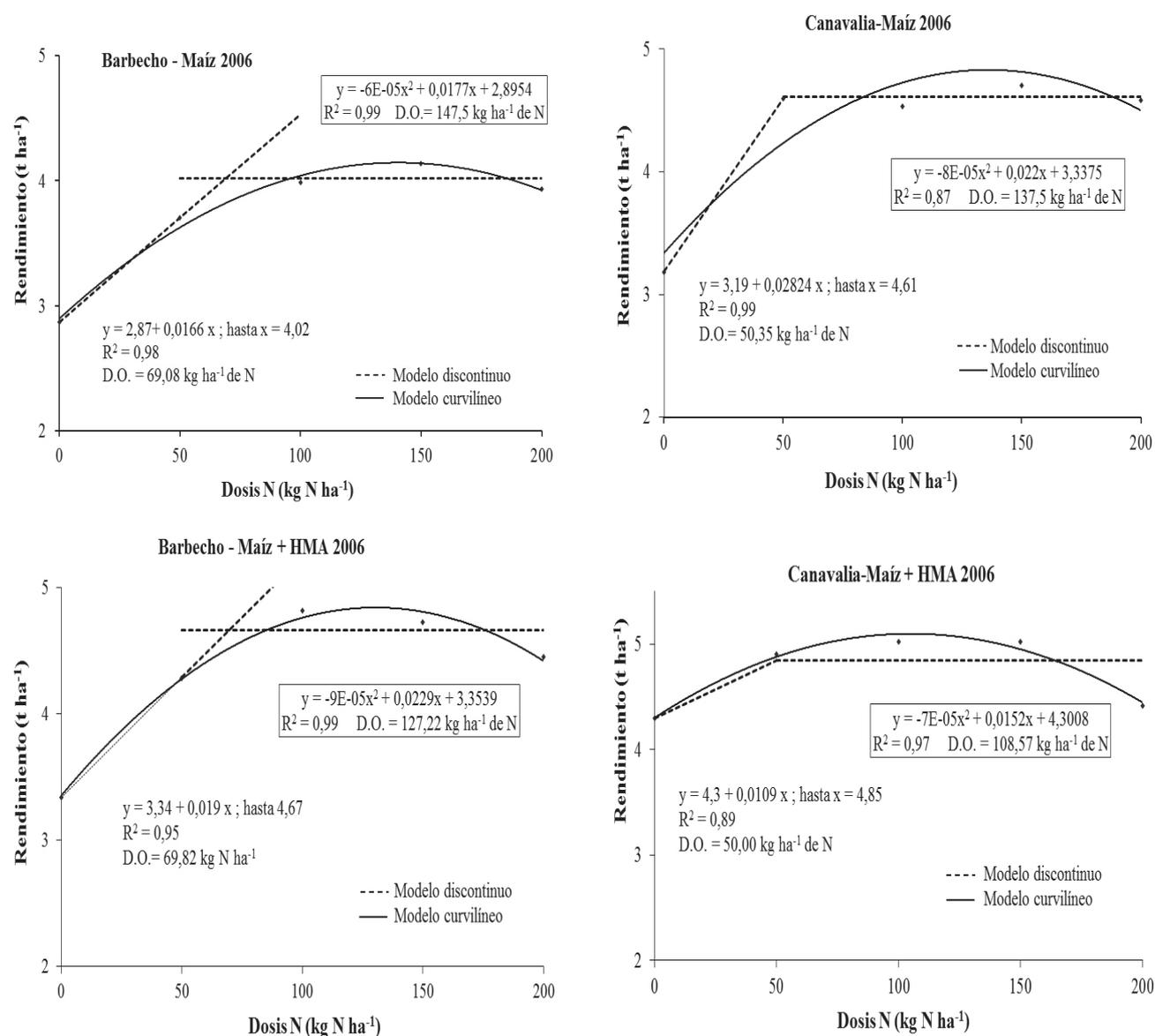
Maíz

En las Figuras 1 y 2 se puede observar los ajustes de respuesta a las dosis de fertilizante mineral nitrogenado mediante los modelos curvilíneo y discontinuo en las diferentes secuencias y años estudiados en el cultivo del maíz.



D.O.: dosis óptima recomendada
 HMA: a base de *Glomus cubense*
 Fertilizante mineral NH₄NO₃
 Barbecho: suelo en descanso por dos meses

Figura 1. Comparación de los modelos curvilíneo y discontinuo rectilíneo de la respuesta del maíz a dosis de fertilizante mineral nitrogenado, en presencia de abono verde e inoculación micorrízica. Año 2003



D.O.: Dosis óptima recomendada; HMA: a base de *Glomus cubense*; Fertilizante mineral NH_4NO_3 ; Barbecho: suelo en descanso por dos meses

Figura 2. Comparación de los modelos curvilíneo y discontinuo rectilíneo de la respuesta del maíz a dosis de fertilizante mineral nitrogenado, en presencia de abono verde e inoculación micorrízica. Año 2006

En todos los casos se observó un fuerte ajuste de la predicción de la respuesta (elevados coeficientes de determinación, R^2); sin embargo, el modelo curvilíneo sobreestimó los valores de la dosis óptima recomendada, lo cual trajo por consecuencia que al calcular el factor parcial de productividad, los valores obtenidos por este modelo fueron menos favorables que al hacer el mismo análisis empleando los datos del ajuste por el modelo discontinuo (Tabla III).

Este resultado básicamente se debe a que el factor parcial de productividad (FPP) se calcula teniendo en cuenta no solo el rendimiento, sino también la dosis de

fertilizante mineral aplicada y en todos los casos, como por el modelo discontinuo, la dosis recomendada fue menor, entonces eso provoca mayores valores de esta variable, lo que implicará además un ahorro económico por concepto de lograr el mayor rendimiento con la menor dosis del nutriente posible.

La evaluación del factor parcial de productividad como indicador del manejo eficiente del N mineral a corto plazo resulta importante en los sistemas agrícolas, debido a la naturaleza transitoria del N inorgánico en el suelo.

Tabla III. Resumen del rendimiento máximo y el factor parcial de productividad, empleando los datos obtenidos en los dos modelos de ajuste de respuesta al fertilizante por el cultivo del maíz

	Modelo curvilíneo		Modelo discontinuo	
	Rendimiento máximo (t ha ⁻¹)	FPP	Rendimiento máximo estable (t ha ⁻¹)	FPP
2003				
Barbecho-maíz	4,54	21,29	4,47	34,59
Canavalia-maíz	4,82	30,59	4,59	ND
Canavalia-maíz+HMA	4,60	53,12	4,53	ND
2006				
Barbecho-maíz	4,20	28,48	4,02	58,15
Barbecho-maíz+HMA	4,81	37,81	4,67	93,33
Canavalia-maíz	4,85	35,27	4,61	66,03
Canavalia-maíz+HMA	5,13	47,21	4,85	96,23

FPP: Factor Parcial de Productividad (kg de rendimiento por cada kg de N aplicado)

ND: no determinado debido a que en este modelo no es necesario realizar aportes de fertilizante mineral nitrogenado

CAFETO

En todas las cosechas, ciclos productivos y sitios experimentales, se encontró una respuesta positiva del café ante la aplicación de dosis crecientes de N. En las Figuras 3 y 4 se observa el ajuste de la respuesta a las dosis de N estudiadas, por los métodos curvilíneo y discontinuo, en ambos sitios experimentales y durante los dos ciclos de cosecha.

Al igual que en el maíz, se presentaron altos ajustes de los modelos de predicción de los rendimientos; sin embargo, es de notar como el modelo curvilíneo, en todos los casos, sobreestimó la dosis óptima recomendada, en comparación al modelo discontinuo, lo cual trajo por consecuencia que en la predicción del modelo curvilíneo, el factor parcial de productividad fuera muy inferior al obtenido con el ajuste de los resultados por el modelo discontinuo (Tabla IV).

En el café no solo el FPP fue mayor si se calcula a partir del ajuste por el modelo discontinuo sino que además, en algunas campañas y años, llegó a tener más del doble del valor, al ser comparada esta variable con la obtenida al emplear los datos del ajuste por el modelo curvilíneo.

DISCUSIÓN

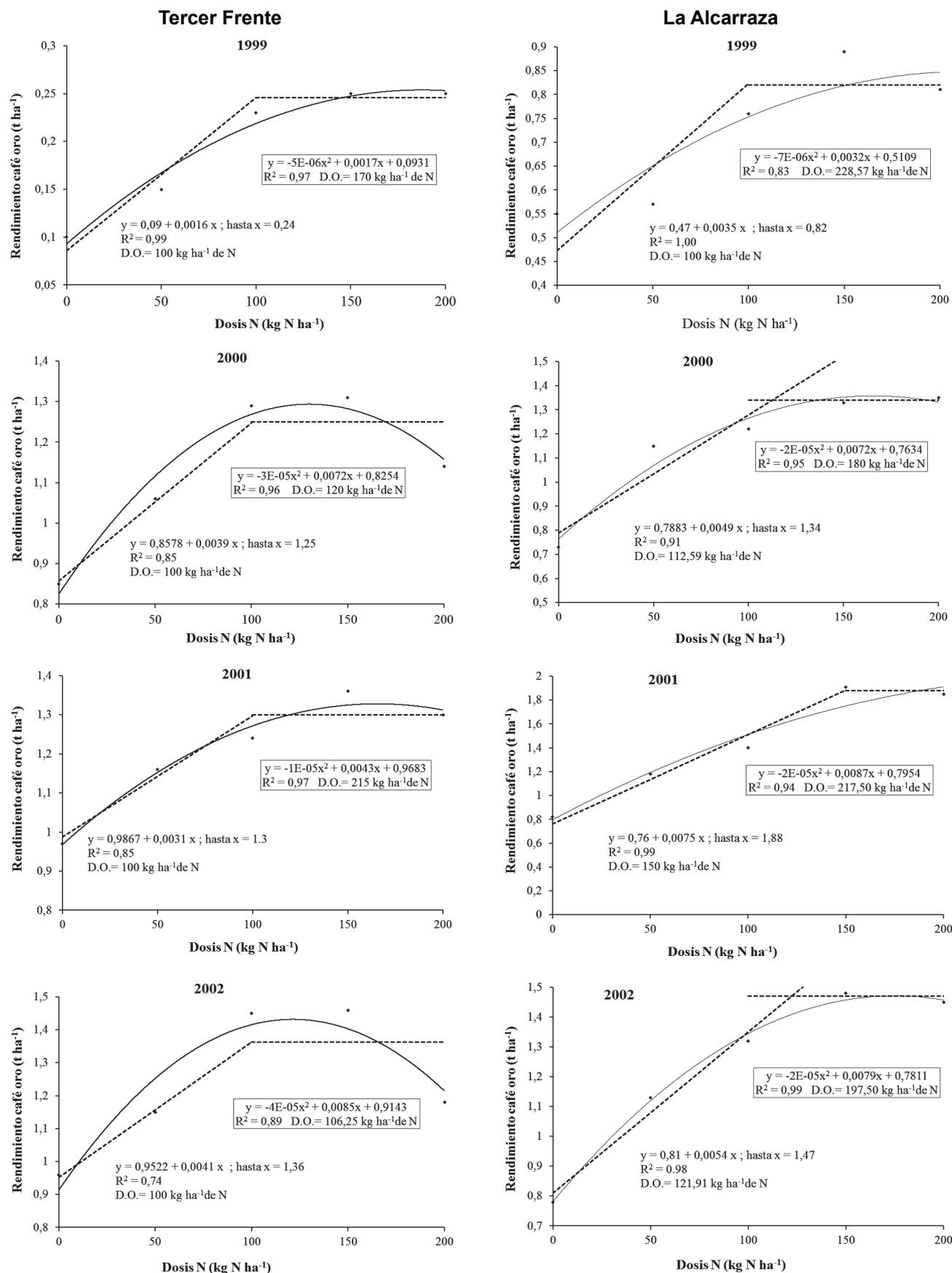
De manera general, no existe un consenso entre los investigadores para seleccionar un modelo estadístico para determinar los niveles críticos de nutrientes. Algunos prefieren utilizar modelos mediante los cuales se llega a un valor discreto, como el empleado en esta investigación; otros prefieren los modelos curvilíneos continuos, como el cuadrático, exponencial (principalmente Mitscherlich) y el inverso, en ese caso, se selecciona un valor arbitrario del rendimiento relativo (por ejemplo el 90 %), o el punto de inflexión de la curva o incluso el óptimo económico.

En la selección del modelo a seguir hay que evitar que se produzcan estimaciones sesgadas del óptimo, lo cual constituye un criterio más importante que el tamaño del R² (coeficiente de determinación), ya que muchos modelos presentan valores de R² similares, pero la dosis óptima estimada por cada uno de ellos es muy diferente (4), criterio que se tuvo en cuenta en el análisis de los resultados de la investigación, para seleccionar el modelo más adecuado a las condiciones experimentales.

El ajuste matemático de los datos a través de los modelos cuadrático, raíz cuadrada o Mitscherlich sobreestiman la cantidad óptima del nutrimento, así como el rendimiento estimado en el punto óptimo^B. Este fenómeno se observó en el análisis matemático realizado a los datos de los experimentos evaluados, en el cual, las dosis óptimas calculadas a través del modelo curvilíneo fueron muy superiores a las obtenidas con el modelo discontinuo.

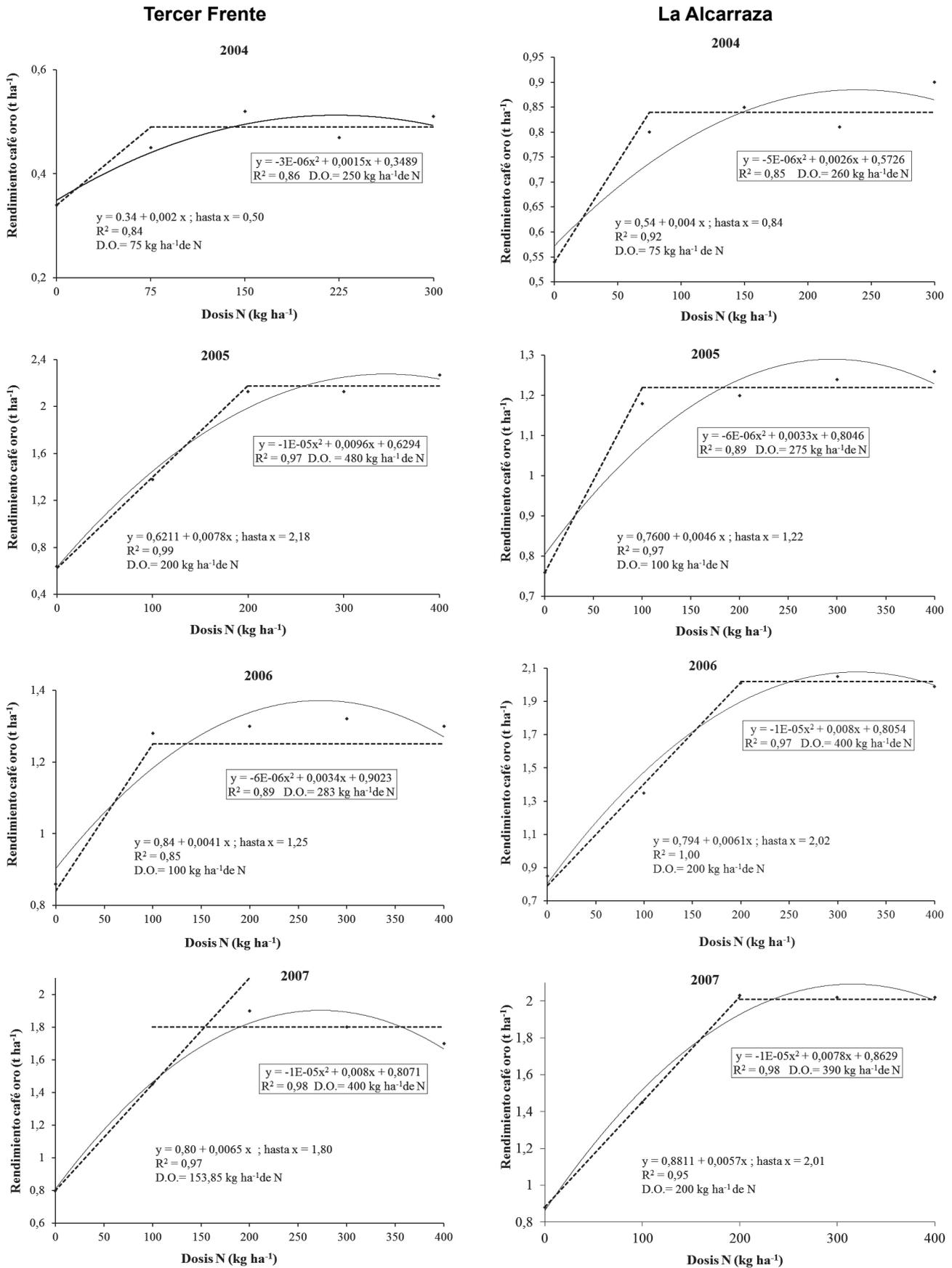
Numerosos investigadores en diferentes épocas del desarrollo de las ciencias agrícolas, se han dedicado a estudiar diversos modelos curvilíneos con el objetivo de lograr una dosis óptima del nutriente, sin embargo en su gran mayoría coinciden en reconocer las ventajas del modelo rectilíneo discontinuo, frente a las funciones asintóticas al momento de definir cantidades óptimas económicas, evitando así el sesgo a la derecha de los modelos curvilíneos^B.

En ese sentido, al comparar dos modelos matemáticos de curva de respuesta a la fertilización nitrogenada en el maíz se demostró que, aunque en las condiciones experimentales estudiadas, no se encontraron diferencias entre las dosis óptimas recomendadas por los modelos en estudio, el modelo lineal discontinuo resultó de más fácil explicación agronómica y aplicación práctica, por lo que se recomienda emplearlo en sistemas de fertilización para maíz cultivado en grandes extensiones (14).



D.O. Dosis óptima recomendada. RME Rendimiento máximo estable - - - Modelo discontinuo — Modelo curvilíneo

Figura 3. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento de *C. canephora* en su primer ciclo



D.O. Dosis óptima recomendada. RME Rendimiento máximo estable - - - Modelo discontinuo — Modelo curvilíneo

Figura 4. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento de *C. canephora* en su segundo ciclo

Tabla IV. Resumen del rendimiento máximo y el factor parcial de productividad, empleando los datos obtenidos en los dos modelos de ajuste de respuesta al fertilizante por el cultivo del café

Año	Modelo curvilíneo		Modelo discontinuo	
	Rendimiento máximo (t ha ⁻¹)	FPP	Rendimiento máximo estable (t ha ⁻¹)	FPP
Tercer Frente				
1999	0,24	1,40	0,24	2,40
2000	1,26	10,48	1,25	12,50
2001	1,43	6,65	1,3	13,00
2002	1,37	12,86	1,36	13,60
2004	0,54	2,15	0,5	6,67
2005	2,93	6,11	2,18	10,90
2006	1,38	4,88	1,25	12,50
2007	2,41	6,02	1,8	11,70
La Alcarraza				
1999	0,88	3,84	0,82	8,20
2000	1,41	7,84	1,34	11,90
2001	1,74	8,01	1,88	12,53
2002	1,56	7,90	1,47	12,06
2004	0,91	3,50	0,84	11,20
2005	1,26	4,58	1,22	12,20
2006	2,41	6,01	2,02	10,10
2007	2,38	6,11	2,01	10,05

En general es preferible un modelo con un limitado número de parámetros, que sea fácil de ajustar y que no produce sesgo en la estimación del óptimo. En ese sentido, el modelo discontinuo produce estimados conservadores del óptimo (4), lo cual resulta ventajoso para la recomendación de dosis óptimas de nutrientes, desde el punto de vista económico y medioambiental.

En esta investigación, no solo se ha comparado dos modelos de curvas de respuesta sino que además se ha empleado un parámetro para evaluar la cantidad de fertilizante que se recomienda por el modelo y que es aprovechada por el cultivo, en función del rendimiento esperado, lo que se conoce como eficiencia del uso del fertilizante o factor parcial de productividad (15).

En otras investigaciones se han encontrado que el factor parcial de productividad puede aumentar en presencia de un manejo adecuado de diferentes alternativas nutricionales. Ese resultado demostró un aumento en la eficiencia en el uso de los nutrientes, y por lo tanto puede resultar en un menor potencial de pérdidas de estos al ambiente (16).

El factor parcial de productividad toma valores más elevados en los sistemas de recomendación de fertilizantes con las menores dosis óptimas, en los dos cultivos estudiados, lo cual indica el aumento de la eficiencia de utilización del fertilizante nitrogenado por el maíz y el café, lo cual constituye otra consideración a tener en cuenta a la hora de seleccionar un modelo de respuesta a la fertilización que no indique aplicaciones excesivas de fertilizante mineral nitrogenado.

Por eso, el último paso antes de hacerse las recomendaciones es aplicar criterios económicos para determinar si la operación resultará en beneficio neto para el productor. En ese sentido, el modelo discontinuo indica la dosis óptima donde el rendimiento se hará máximo con la menor aplicación de nutrientes permisibles, para alcanzar un nivel de rendimiento económicamente factible (6).

De ese modo es recomendable no solo basarse en un modelo u otro de respuesta de las plantas a la adición de una fuente de nutrientes, sino que además, la selección de las dosis óptimas se haga teniendo en cuenta otros índices, como la eficiencia en la conversión de las cantidades de nutriente aplicadas en cantidades de rendimiento obtenido, así se valora además el impacto económico y medioambiental de las prácticas agronómicas a recomendar.

CONCLUSIONES

- ♦ El modelo discontinuo rectilíneo resulta más adecuado en el sistema de recomendación de dosis óptimas de fertilizantes nitrogenados para los cultivos de maíz y café, en comparación al modelo curvilíneo, que brinda dosis óptimas superiores, que implican un menor factor parcial de productividad de la dosis recomendada.

- ◆ El factor parcial de productividad, de conjunto con el modelo discontinuo rectilíneo, constituyen criterios adecuados para establecer el modelo de respuesta a los fertilizantes que recomiende la dosis óptima económica de fertilizante mineral nitrogenado para los cultivos de café y maíz.

BIBLIOGRAFÍA

1. Martín, A. G. M. y Rivera, E. R. A. *Micorrizas, abonos verdes y fertilización nitrogenada en el maíz: Opciones para el manejo integrado de la nutrición del cultivo*. edit. Editorial Académica Española, 6 de junio de 2011, 168 p., ISBN 978-3-8443-3854-6.
2. García-Serrano, J. P.; Lucena, M. J. J.; Ruano, C. S. y Nogales, G. M. "El suelo, los nutrientes, los fertilizantes y la fertilización" [en línea]. En: *Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España*, edit. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, España, 2010, p. 120, ISBN 978-84-491-0997-3, [Consultado: 15 de enero de 2016], Disponible en: <<http://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=428369>>.
3. Bernal, J. H.; Navas, G. E. y Hernández, R. S. "Requerimientos y respuestas a la fertilización del maíz en suelos de Sabanas Ácidas de Colombia". *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica versión Cono Sur*, vol. 15, 2014, pp. 6-10, ISSN 2222-0178.
4. Nelson, L. *Estadística en la investigación del uso de fertilizantes*. 1.ª ed., edit. Instituto de la potasa y el fósforo, Canadá, 1999, 66 p.
5. Cruz, M. I. R. y Moreno, R. O. H. "Modelos de respuesta modificados para fertilizantes en rotaciones de cultivos y su aplicación a trigo (*Triticum aestivum* L.)". *Agrociencia*, vol. 40, no. 6, 2006, pp. 721-730, ISSN 1405-3195.
6. Waugh, D. L.; Cate, R. B. y Nelson, L. A. *Modelos discontinuos para una rápida correlación, interpretación y utilización de los datos de análisis de suelos y las respuestas a los fertilizantes* [en línea]. Proyecto Internacional de Evaluación y Mejoramiento de la Fertilidad del Suelo, Inst. NC State University Agricultural Experiment Station, 1973, p. 119, [Consultado: 15 de enero de 2016], Disponible en: <<http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=CIMMYT.post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=018815>>.
7. IUSS Working Group WRB. *World Reference Base for soil resources 2014: international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. (ser. World Soil Reports, no. ser. 106), edit. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2014, 191 p., ISBN 978-92-5-108370-3.
8. Rodríguez, Y.; Dalpé, Y.; Séguin, S.; Fernández, K.; Fernández, F. y Rivera, R. A. "*Glomus cubense* sp. nov., an arbuscular mycorrhizal fungus from Cuba". *Mycotaxon*, vol. 118, no. 1, 5 de enero de 2012, pp. 337-347, ISSN 2554-8889, DOI 10.5248/118.337.
9. Martín, G. M.; Rivera, R.; Arias, L. y Rentería, M. "Effect of *Canavalia ensiformis* and arbuscular mycorrhizae on corn crops". *Cuban Journal of Agricultural Science*, vol. 43, no. 2, 2009, pp. 185-192, ISSN 2079-3480.
10. IUSS Working Group WRB. *World reference base for soil resources 2006. A framework for international classification, correlation and communication*. (ser. World Soil Resources Reports, no. ser. 103), 2nd ed., edit. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 2006, 128 p., ISBN 92-5-105511-4.
11. Pérez, A.; Espinosa, R. R.; Bustamante, C. y Martín, G. "Efecto del nitrógeno sobre los rendimientos y contenido foliar de *Coffea canephora* en un suelo Pardo ócrico sin carbonatos". *Centro Agrícola*, vol. 38, no. 4, 1 de octubre de 2011, pp. 37-44, ISSN 2072-2001.
12. Pérez, D. A.; Bustamante, G. C. A.; Martín, A. G. M.; Rivera, E. R. A.; Viñals, N. R. y Rodríguez, C. M. I. "Nitrogen fertilization after robusta coffee pruning in Cambisols". *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, vol. 46, no. 8, agosto de 2011, pp. 935-943, ISSN 0100-204X, DOI 10.1590/S0100-204X2011000800021.
13. Stewart, W. M. "Consideraciones en el uso eficiente de nutrientes". *Informaciones Agronómicas*, vol. 67, 2007, pp. 1-7, ISSN 2222-0178.
14. Díaz, V. S.; García, F. y Caviglia, O. "Maíz tardío en Entre Ríos, Argentina: Calibración de umbrales críticos en nitrógeno". *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica versión Cono Sur*, no. 13, 2014, pp. 18-20, ISSN 2222-0178.
15. Tineo, B. A. L. *Superficies de respuesta: el diseño 03 de julio (aplicaciones agronómicas)*. 2.ª ed., edit. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Perú, 2014, 145 p., ISBN 978-612-4231-01-8.
16. Martín, A. G. M.; Rivera, E. R. y Pérez, D. A. "Efecto de canavalia, inoculación micorrizica y dosis de fertilizante nitrogenado en el cultivo del maíz". *Cultivos Tropicales*, vol. 34, no. 4, diciembre de 2013, pp. 60-67, ISSN 0258-5936.

Recibido: 16 de octubre de 2015

Aceptado: 29 de febrero de 2016