

MOMENTOS Y FORMAS DE APLICACIÓN DE FERTILIZANTES Y LA RESPUESTA DE LA CAÑA DE AZÚCAR

Fertilizer placement and forms of application and sugarcane response

Agustín Herrera Solano¹✉, Nelson Milanés Ramos², Juan Pablo Hernández Sarmiento³, Adolfo Castillo Morán¹, Daniel A. Rodríguez Lagunes¹ y Noé Aguilar Rivera¹

ABSTRACT. The Best Agricultural Practices in sugarcane production contemplate fertilizer use, but many producers apply it at the beginning of the rains on soil surface. In order to evaluate the effect of fertilizer placement and fertilization moment, a research was carried with the first ratoon at Rancho Rincón de los Toros, Veracruz, Mexico. Seven treatments in random blocks design and four replications were studied: a) four treatments with application of 600 kg ha⁻¹ of the 20-05-25 (N, P₂O₅, K₂O) complete formula after the harvest of plant cane, at the beginning of the rains and, at both times, incorporated and soil surface; b) two treatments with urea at rate of 200 kg ha⁻¹ additional to the incorporated and soil surface application after the harvest; c) a control without fertilizer. The incorporated fertilizer produced at 8 months a population of 14,5 stems m⁻¹, 1,4 stems m⁻¹ more than the soil surface fertilization and the yield was 68,89 Mg ha⁻¹; while with the applied on the soil surface was 59,44 Mg ha⁻¹, reaching an increase of 9,46 Mg ha⁻¹. Soil surface fertilization had no effect neither on the stems population nor on the cane yield. The stems population at eight months old was directly related to the cane yield obtained at harvest. Additional urea did not increase yields beyond those achieved with a single application of fertilizer, but increased the amount of N to produce 1 Mg of cane, ranging from 3,2 kg to 3,4 kg.

Key words: first ratoon, rain, stalks, yield

RESUMEN. Las Buenas Prácticas Agrícolas en la producción cañera contemplan el uso de fertilizantes, pero muchos productores lo aplican en la superficie del suelo al inicio de las lluvias. Con el objetivo de evaluar el efecto de la colocación del fertilizante y del momento de fertilizar, se desarrolló una investigación sobre el primer retoño de caña de azúcar en el Rancho Rincón de los Toros, Veracruz, México. Se ensayaron siete tratamientos en diseño de bloques al azar con cuatro réplicas: a) cuatro tratamientos con 600 kg ha⁻¹ de la fórmula 20-05-25 (N, P₂O₅, K₂O) después del corte, al inicio de las lluvias y, en ambos momentos, incorporada y superficial; b) dos tratamientos con 200 kg ha⁻¹ de urea adicional a la aplicación enterrada y superficial después del corte; c) un control sin fertilizante. A los ocho meses, el fertilizante incorporado produjo una población de 14,5 tallos m⁻¹, con 1,4 tallos m⁻¹ más con respecto al fertilizante en superficie y el rendimiento fue 68,89 Mg ha⁻¹; mientras que con el aplicado en la superficie fue 59,44 Mg ha⁻¹, alcanzándose un incremento de 9,46 Mg ha⁻¹. La fertilización superficial no tuvo efecto ni sobre la población de tallos ni sobre el rendimiento. La población de tallos a los ocho meses de edad se relacionó directamente con el rendimiento obtenido en la cosecha. La urea adicional no incrementó los rendimientos más allá de los alcanzados con una sola aplicación de fertilizante, pero sí incrementó la cantidad de N para producir 1 Mg de caña, oscilando entre 3,2 kg y 3,4 kg.

Palabras clave: primer retoño, lluvia, tallos, rendimiento

INTRODUCCIÓN

El área cañera vinculada actualmente al Ingenio Central Progreso, S. A. de C. V. es de 11,000 ha y el promedio de rendimiento en caña en los últimos seis años fue de 58,83 Mg ha⁻¹ (1,2).

Los rendimientos de campo son bajos en comparación con otros ingenios de la región Veracruz

¹ Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias de la Universidad Veracruzana, Peñuela, Córdoba, México

² Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA), AZCUBA, Cuba

³ Ingenio Central Progreso, S. A. de C. V., Veracruz, México

✉ aguherrera@uv.mx

Central, lo que obliga a elevar los rendimientos cañeros a través de mejores prácticas agrícolas, dentro de las cuales está el uso y manejo de los fertilizantes, principalmente nitrogenados, los que resultan ventajosos por su disponibilidad en el mercado y su efecto inmediato sobre el cultivo; pero los productores esperan el inicio de las lluvias para aplicar los fertilizantes, generalmente de manera superficial sobre el suelo, sin conocerse si este manejo es el óptimo, o al menos adecuado, para las condiciones del ingenio. En este sentido, se encontró, mediante una encuesta realizada a 250 productores de caña de azúcar en Veracruz, que el 99,2 % de estos aplican fórmulas 20-10-10 o 20-10-20, entre otras y urea (46-0-0) como complemento de la fuente nitrogenada; pero los productores esperan el inicio de las lluvias para aplicarlos, generalmente de manera superficial sobre el suelo (3).

En virtud de lo anterior, el presente trabajo propone evaluar el efecto de la fertilización química, con fórmula completa en forma enterrada y superficial, aplicada después de la cosecha y al momento de iniciar las lluvias, con suministro adicional de urea en algunos tratamientos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El Ingenio Central Progreso S. A. de C. V., se encuentra en la zona cañera del Alto Papaloapan, en la Vertiente del Golfo de la Sierra Madre Oriental, dentro de los municipios Paso del Macho, Camarón de Tejeda, Zentla, Tapatxco y Carrillo Puerto, en el estado de Veracruz, México (1).

El estudio se condujo en el municipio Paso del Macho, en el rancho Rincón de los Toros, perteneciente al señor Pablo Hernández García, desde el 4 de enero de 2013 hasta el 8 de febrero de 2014, en ciclo primer retoño (soca) y bajo condiciones de temporal (secano), donde el ciclo caña planta (plantilla) se mantuvo con buena población de tallos, sin cepas faltantes, libre de arvenses en todo el período de desarrollo del cultivo y se cosechó luego de aplicar la quema.

El suelo sobre el que se desarrolló la investigación se clasificó como Luvisol órtico según la WRB (4), la descripción del perfil del suelo se presenta en la Tabla I.

En las muestras de suelo de cada horizonte genético, el pH se midió potenciométricamente en una relación suelo:agua de 1:2,5; la materia orgánica se evaluó con el método de Walkley y Black; los cationes intercambiables se extrajeron con una solución de acetato de amonio 1 mol L⁻¹ de pH 7, el Ca y el Mg se determinaron por complejometría y el K por fotometría de llama; el P asimilable se extrajo según el método de Bray y Kurtz No. 2 y se determinó por colorimetría, a partir de la formación del color azul del complejo molíbdico-fosfórico, todas las técnicas según se han descrito (5).

Tabla I. Descripción morfológica del perfil del suelo Luvisol órtico del Rancho Rincón de los Toros, municipio Paso del Macho, Veracruz

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0 – 10	Color 10YR 3/3 (h) pardo oscuro, franco a franco arcilloso, estructura nuciforme a granular, compactado, seco, frecuentes raíces finas y medias, algunos puntos brillantes, gravitas de color blanco, frecuentes poros, sin reacción al HCL, transición neta.
Bt1	10 - 22	Color 10YR 3/2 (h) pardo grisáceo muy oscuro, franco arcilloso, estructura de bloques subangulares, compactado, fresco, frecuentes raíces finas y medias, piedras en estado avanzado de descomposición, frecuentes poros, sin reacción al HCL, transición neta.
Bt2	22 – 34	Color 10YR 3/1 (h) gris muy oscuro, arcilloso, ligeramente húmedo, compactado, estructura de bloques subangulares, pocas raíces, pocos poros, presencia de gravitas en estado avanzado de descomposición, sin reacción al HCL, caras brillantes, transición neta.
Bt3 (g)	34 – 46	Color 10YR 3/1 (h) gris muy oscuro, arcilloso, ligeramente húmedo, compactado, estructura de bloques subangulares, sin raíces, pocos poros, aumenta el número de gravitas en estado de descomposición, presencia de manchas de color grisáceo, transición brusca.
CR	46 +	Conglomerado sin carbonatos

Las actividades realizadas durante el desarrollo del experimento y las fechas de ejecución se presentan en la Tabla II.

La aplicación de fertilizante se realizó mecanizadamente, tanto en la superficie del suelo como cuando se incorporó a ambos lados de la cepa a una profundidad que osciló entre 10 cm y 15 cm.

La variedad de caña de azúcar del estudio fue la CP72-2086, una de las que se cultiva en gran escala en la región (6).

Tabla II. Actividades realizadas en el experimento para evaluar el efecto de la fertilización sobre el desarrollo de la caña de azúcar en el primer retoño. Rancho Rincón de los Toros municipio Paso del Macho

No	Actividades	Fechas de ejecución
1	Cosecha del ciclo planta	4 de enero del 2013
2	Aplicación de los fertilizantes después del corte a los tratamientos 2, 3, 6 y 7	14 de enero del 2013
3	Observaciones fenológicas	5 de abril del 2013
4	Aplicación de los fertilizantes al inicio de las lluvias a los tratamientos 4 y 5	6 de junio del 2013
5	Aplicación de urea a los tratamientos 6 y 7	30 de junio del 2013
6	Observaciones fenológicas	6 de sept del 2013
7	Muestreo y cosecha del experimento	8 de febrero del 2014

La fórmula de fertilizante aplicada fue 20-05-25 a razón de 600 kg ha⁻¹

La segunda aplicación se realizó con urea (46 % de N) a razón de 200 kg ha⁻¹

Se empleó un diseño experimental de bloques al azar con siete tratamientos (Tabla III) y cuatro réplicas.

Tabla III. Tratamientos ensayados para evaluar sus efectos sobre el desarrollo del primer retoño de la caña de azúcar, variedad CP72-2086. Rancho Rincón de los Toros, municipio Paso del Macho

Tratamiento-	Descripción
1. T	Control sin fertilizante
2. FDC-S	Fórmula recomendada aplicada después del corte, superficial
3. FDC-I	Fórmula recomendada aplicada después del corte, incorporada
4. FILL-S	Fórmula recomendada aplicada al inicio de las lluvias, superficial
5. FILL-I	Fórmula recomendada aplicada al inicio de las lluvias, incorporada
6. FDCU-S	Fórmula recomendada aplicada después del corte + 2da aplicación con Urea, superficial
7. FDCU-I	Fórmula recomendada aplicada después del corte+2da aplicación con Urea, incorporadas

Fórmula recomendada: 20-05-25 a razón de 600 kg ha⁻¹

Urea: a razón de 200 kg ha⁻¹

Cada parcela contó con seis surcos de 12 m de longitud y una distancia entre ellos de 1,20 m, considerando para la evaluación los cuatro surcos centrales.

En cada parcela se realizó el conteo de todos los brotes y tallos a los tres y ocho meses respectivamente y la medición de la altura de 20 tallos desde la superficie del suelo hasta el último *dewlap* visible, después de la cosecha de la caña planta. La población de tallos existente a los ocho meses de edad se expresó en tallos m⁻¹.

El rendimiento de caña se estimó a partir de la masa de 20 tallos tomados al azar en los cuatro surcos centrales de cada parcela y se expresó en Mg ha⁻¹.

Con la dosis de N que se aplicó en cada tratamiento y los rendimientos, se calculó el Índice de Consumo de N, dividiendo la dosis aplicada entre el rendimiento.

Se realizó ANOVA a los resultados de las evaluaciones realizadas en correspondencia con el diseño experimental, luego de haber comprobado la homogeneidad de varianza con la prueba de Bartlett y de normalidad de los datos con la prueba de Kolmogorov-Smirnov y cuando existieron diferencias entre las medias, estas se compararon según la prueba de Rango Múltiple de Duncan. Se realizó análisis de regresión entre el número de tallos contados a los ocho meses y el rendimiento en caña y se determinaron los estadígrafos error estándar de la estimación (Es_y) y el Índice de Determinación (R²). Para el procesamiento de los datos se utilizó el paquete estadístico STATGRAPHICS Plus versión 5.1 para Windows (7).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

Algunas características del suelo sobre el que desarrolló la investigación se presentan en la Tabla IV.

Como se observa en la Tabla IV, el P y el K se acumulan en el horizonte superficial en concentraciones adecuadas para la caña de azúcar, las que disminuyen de forma abrupta desde el primer hasta el segundo horizonte; mientras que las bases intercambiables Ca²⁺ y Mg²⁺ se incrementan con la profundidad del perfil, hasta duplicar las concentraciones encontradas en el horizonte superior y en correspondencia con el comportamiento del Ca²⁺ y el Mg²⁺, el pH del suelo también se incrementa en profundidad.

Tabla IV. Algunas características del suelo Luvisol órtico del Rancho Rincón de los Toros, municipio Paso del Macho, Veracruz

Variable	Horizonte (profundidad, cm)			
	Ap (0-10)	Bt ₁ (10-22)	Bt ₂ (22-34)	Bt ₃ (g) (34-46)
Drenaje	Moderadamente bien drenado			
Erosión	Poco erosionado			
Pendiente	Plana			
Profundidad efectiva	Poco profundo			
pH	5,58	6,13	6,67	6,86
Materia orgánica, mg g ⁻¹	35,9	27,5	18,7	17,0
Ca, cmol _(c) kg ⁻¹	14,77	23,40	28,23	29,50
Mg, cmol _(c) kg ⁻¹	9,48	15,07	20,65	18,20
K, cmol _(c) kg ⁻¹	0,56	0,24	0,14	0,13
P asimilable, mg kg ⁻¹	26,40	12,01	15,10	46,80

POBLACIÓN DE TALLOS Y ALTURA DE LAS PLANTAS

La evaluación realizada a los tres meses después de la cosecha de la caña planta indicó que los tratamientos no influyeron ni sobre el número de brotes ni sobre la altura alcanzada por estos.

Transcurridos 80 días después de la fertilización (tratamientos FDC-S, FDC-I, FDCU-S y FDCU-I, los dos últimos sin la aplicación adicional de urea), la planta satisfizo sus necesidades nutricionales a partir de las reservas contenidas en la cepa, del suministro de nutrientes del suelo y para el caso específico del N, se pudiera pensar en la fijación biológica del N₂.

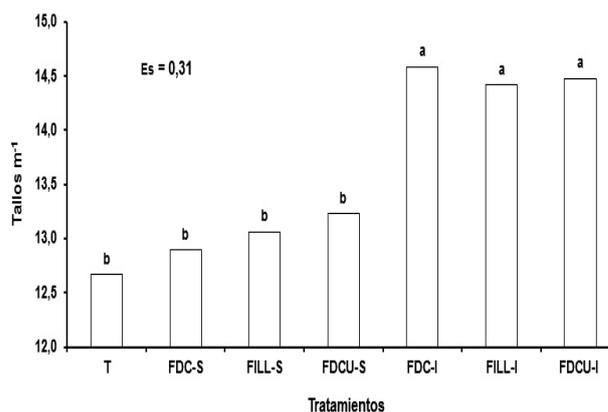
Ya a los ocho meses, se encontró diferencias significativas entre los tratamientos sólo sobre la población de tallos por parcela (Tabla V).

Tabla V. Resultados del análisis de varianza realizado al número de tallos por parcela y a la altura a los ocho meses de edad del primer retoño de caña de azúcar. Rancho Rincón de los Toros municipio Paso del Macho

Fuentes de variación	gl	CM	Cantidad de tallos			Sig.	Altura, cm				
			Fc	Ft			CM	Fc	Ft		Sig.
				5 %	1 %				5 %	1 %	
Tratamientos	6	3253,25	3,6	2,66	4,01	*	130,48	1,27	2,66	4,01	NS
Réplicas	3	805,86	0,9	3,16	5,09	NS	274,57	2,67	3,16	5,09	NS
Error	18	906,62	---	---	---	---	102,81	---	---	---	---
CV, %		5,04					5,78				

*Diferencias significativas al 5 % de probabilidad de error
gl: grados de libertad CM: cuadrado medio
CV: coeficiente de variación

La población promedió 13,6 tallos m⁻¹, considerando al tratamiento Testigo; en aquellos tratamientos en los que se aplicó el fertilizante en la superficie del suelo (FDC-S, FILL-S, FDCU-S), el promedio fue 13,1 tallos m⁻¹; mientras que cuando se incorporó el fertilizante en el suelo (FDC-I, FILL-I, FDCU-I), el promedio resultó 14,5 tallos m⁻¹, lo que significó un incremento con respecto a la fertilización superficial, de 1,4 tallos m⁻¹, equivalente al 11 % (Figura 1).



T: testigo sin fertilizante; FDC-S: fórmula recomendada aplicada después del corte superficial; FILL-S: fórmula recomendada aplicada al inicio de las lluvias superficial; FDCU-S: fórmula recomendada aplicada después del corte + 2da aplicación con urea, superficial; FDC-I: fórmula recomendada aplicada después del corte incorporada; FILL-I: fórmula recomendada aplicada al inicio de las lluvias incorporada; FDCU-I: fórmula recomendada aplicada después del corte + 2da aplicación con urea, incorporadas; Fórmula y dosis recomendadas: 20-05-25 a 600 kg ha⁻¹, urea a razón de 200 kg ha⁻¹

Figura 1. Población de tallos por metro lineal a los ocho meses de edad del primer retoño de caña de azúcar debido al efecto de la fertilización. Rancho Rincón de los Toros municipio Paso del Macho. Año 2013

Además, la aplicación superficial del fertilizante (FDC-S, FILL-S, FDCU-S) no manifestó efecto sobre la población de tallos al compararla con el tratamiento testigo (T), lo que indicó que se realizó un manejo inefectivo que causó solo daños económicos y al ambiente, debido al costo de la actividad, a la acidificación del suelo y a la emisión de N a la atmósfera respectivamente, inefectividad que alcanzó una mayor relevancia al aplicar urea adicional en la superficie del suelo (FDCU-S).

Unido a lo anterior, se encontró que la incorporación adicional en el suelo de urea (FDCU-I), no benefició en modo alguno la población de tallos cuando se comparó con los restantes tratamientos donde se realizó la fertilización incorporada, reiterándose que se incurrió en un gasto innecesario y en daño ambiental.

RENDIMIENTO EN CAÑA

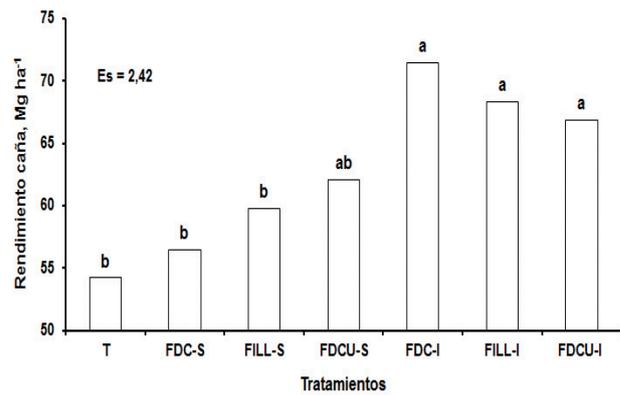
Cuando se analizó el rendimiento en caña, se encontró que los tratamientos ocasionaron efectos diferenciados sobre este indicador (Tabla VI).

Tabla VI. Resultados del análisis de varianza realizado al rendimiento en caña del primer retoño de caña de azúcar. Rancho Rincón de los Toros municipio Paso del Macho

Fuente de variación	gl	Rendimiento en caña (Mg ha ⁻¹)				Sig.
		CM	Fc	Ft		
Tratamientos	6	335,7578	2,90	2,66	4,01	*
Réplicas	3	231,1856	2,00	3,16	5,09	NS
Error	18	115,4273	---	---	---	---
C.V. %		10,2				

*: diferencias significativas al 5 % de probabilidad de error
 NS: sin diferencias significativas gl: grados de libertad
 CM: cuadrado medio Fc: F de Fisher calculada
 Ft: F de Fisher de la tabla CV: coeficiente de variación

Al observar la Figura 2, se distinguió que los tratamientos con el fertilizante incorporado (FDC-I, FILL-I, FDCU-I) proporcionaron rendimientos en caña superiores a los alcanzados con los tratamientos en los que el fertilizante se aplicó en la superficie del suelo (FDC-S, FILL-S), exceptuando al tratamiento que recibió la aplicación adicional de urea en la superficie (FDCU-S).



T: testigo sin fertilizante; FDC-S: fórmula recomendada aplicada después del corte superficial; FILL-S: fórmula recomendada aplicada al inicio de las lluvias superficial; FDCU-S: fórmula recomendada aplicada después del corte + 2da aplicación con urea, superficial; FDC-I: fórmula recomendada aplicada después del corte incorporada; FILL-I: fórmula recomendada aplicada al inicio de las lluvias incorporada; FDCU-I: fórmula recomendada aplicada después del corte + 2da aplicación con urea, incorporadas; Fórmula y dosis recomendadas: 20-05-25 a 600 kg ha⁻¹, urea a razón de 200 kg ha⁻¹

Figura 2. Rendimiento en caña del primer retoño de caña de azúcar debido al efecto de la fertilización. Rancho Rincón de los Toros municipio Paso del Macho. Año 2014

El rendimiento promedio logrado con el fertilizante incorporado en el suelo fue 68,89 Mg ha⁻¹; mientras que con el aplicado en la superficie fue 59,44 Mg ha⁻¹, un incremento del rendimiento a favor de la primera forma de aplicación de 9,46 Mg ha⁻¹, equivalente al 13,73 %.

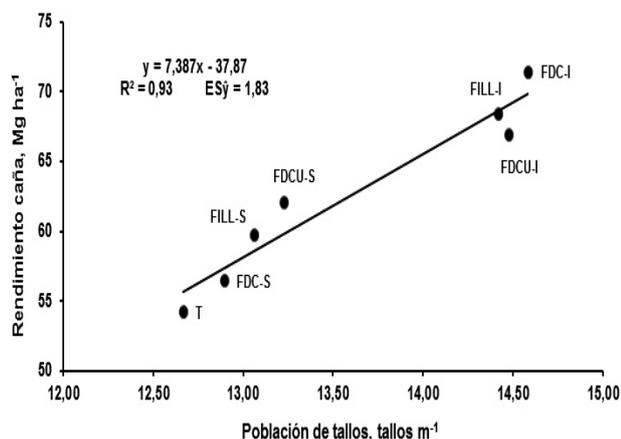
Tal como se manifestó en la población de tallos, la aplicación superficial del fertilizante (tratamientos FDC-S, FILL-S, FDCU-S) no tuvo efecto alguno sobre el rendimiento al compararla con el tratamiento Control o Testigo (T).

Respecto al momento de aplicación del fertilizante, es decir, inmediatamente después de la cosecha o al inicio de las lluvias, manejo este último recurrente entre los productores, destacó el hecho de que con la fertilización incorporada al suelo, al inicio de las lluvias, se alcanzaron rendimientos similares a aquellos logrados cuando la incorporación del fertilizante se realizó inmediatamente después de la cosecha.

La aplicación adicional de urea no incrementó los rendimientos más allá de los alcanzados con los tratamientos con una sola aplicación de fertilizante.

RELACIÓN ENTRE LA POBLACIÓN DE TALLOS A LOS OCHO MESES Y EL RENDIMIENTO

La población de tallos a los ocho meses guardó relación con el rendimiento de caña (Figura 3), ilustrando la correlación de las fertilizaciones superficiales con los rendimientos más bajos y de aquellas incorporadas en el suelo, con los rendimientos mayores.



T: testigo sin fertilizante; FDC-S: fórmula recomendada aplicada después del corte superficial; FILL-S: fórmula recomendada aplicada al inicio de las lluvias superficial; FDCU-S: fórmula recomendada aplicada después del corte + 2da aplicación con urea, superficial; FDC-I: fórmula recomendada aplicada después del corte incorporada; FILL-I: fórmula recomendada aplicada al inicio de las lluvias incorporada; FDCU-I: fórmula recomendada aplicada después del corte + 2da aplicación con urea, incorporadas; Fórmula y dosis recomendadas: 20-05-25 a 600 kg ha⁻¹, urea a razón de 200 kg ha⁻¹

Figura 3. Relación entre el número de tallos a los ocho meses de edad y el rendimiento en caña del primer retoño debido al efecto de la fertilización. Rancho Rincón de los Toros municipio Paso del Macho

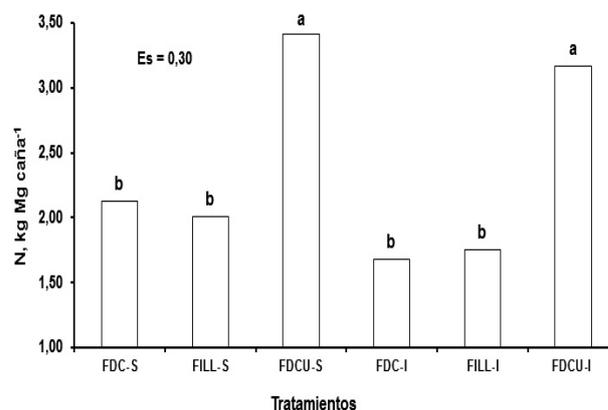
El Tratamiento Testigo, con la menor población de tallos, se asoció al valor absoluto de rendimiento más bajo.

La relación encontrada, dado el buen ajuste según el alto R² y el bajo Error estándar de la estimación (Esŷ), permite pronosticar el rendimiento esperado en caña a partir de la población de tallos encontrada en un metro lineal a los ocho meses, en condiciones similares a las de la investigación.

ÍNDICE DE CONSUMO DE N

Aunque la fertilización realizada incluyó a los tres macronutrientes primarios, se analizó solo el requerimiento de N para producir 1 Mg de caña, dado que es el nutriente considerado como el que más daño ecológico provoca por la contaminación de las aguas subterráneas cuando se lava, por su efecto en la eutrofización cuando es arrastrado hacia los espejos de agua y por la emisión de gases hacia la atmósfera a partir de la volatilización del NH₃ y por los procesos de desnitrificación.

La Figura 4 muestra cómo varió el mencionado Índice de N en función de la fertilización realizada.



T: testigo sin fertilizante; FDC-S: fórmula recomendada aplicada después del corte superficial; FILL-S: fórmula recomendada aplicada al inicio de las lluvias superficial; FDCU-S: fórmula recomendada aplicada después del corte + 2da aplicación con urea, superficial; FDC-I: fórmula recomendada aplicada después del corte incorporada; FILL-I: fórmula recomendada aplicada al inicio de las lluvias incorporada; FDCU-I: fórmula recomendada aplicada después del corte + 2da aplicación con urea, incorporadas; Fórmula y dosis recomendadas: 20-05-25 a 600 kg ha⁻¹, urea a razón de 200 kg ha⁻¹

Figura 4. Índice de consumo de N según el tratamiento evaluado. Rancho Rincón de los Toros municipio Paso del Macho

Se reiteró una vez más, lo inconsistente e innecesario de realizar una aplicación adicional de urea (FDCU-I, FDCU-S), ya que con ese manejo las cantidades de N para producir 1 Mg de caña fueron elevadas y oscilaron entre 3,2 kg y 3,4 kg, cantidades que reflejaron ineficiencias en el uso y manejo del N, además de la baja eficiencia del fertilizante aplicado.

Con los restantes tratamientos la cantidad de N requerida para producir 1 Mg de caña resultó similar; no obstante y considerando el efecto individual de cada Tratamiento sobre la población de tallos y el rendimiento, aquellos donde la fertilización se incorporó al suelo (FDC-I, FILL-I) permitieron considerarlos como los mejores y mostraron mayor eficiencia del uso del fertilizante, con cantidades en el entorno de 1,7 kg de N por cada Mg de caña.

Los comportamientos descritos están asociados al manejo de la fertilización de la caña de azúcar en las condiciones evaluadas. La aplicación superficial de los fertilizantes trae consigo diversos inconvenientes. Tanto el P y el K, nutrientes poco móviles en el suelo, sobre todo el P, se acumulan en el horizonte húmico, tal como ha sucedido en este estudio (Tabla IV) y pueden perderse del agroecosistema mediante la erosión, además del extraído del campo con la materia prima que se lleva a la industria.

Por su parte, el fertilizante nitrogenado al aplicarlo superficialmente, se encuentra sometido a pérdidas por volatilización, por lavado y por erosión. Al respecto, se ha encontrado que la emisión de N_2O fue menor con la aplicación del fertilizante nitrogenado en profundidad cuando se comparó con la colocación cerca de la superficie del suelo (8).

Las pérdidas por volatilización del N se producen en forma amoniacal a partir de los gránulos de urea, tal como han planteado autores que encontraron pérdidas entre 28 y 45 % del N aplicado en la superficie del suelo cultivado con pastos, después de 144 horas de la aplicación del fertilizante (9); también al incubarse un suelo durante 38 días luego de aplicarle cuatro abonos orgánicos y urea, se encontró que la mayor parte del N perdido de la urea fue en forma amoniacal y se evaluaron emisiones entre 62,4 y 69,6 % del N total aplicado (10); otros investigadores midieron hasta 24 % de pérdidas de N en forma amoniacal en un agroecosistema cañero (11).

Otro efecto adverso que ocurre luego de la fertilización nitrogenada es la acidificación del suelo; al respecto se ha informado que seguido a la fertilización con fuentes nitrogenadas, la oxidación microbiana del NH_4^+ a NO_3^- en el suelo libera iones H^+ , lo que resulta en la acidificación del suelo a largo plazo (12), comportamiento este que permite explicar la acidez del suelo en estudio en el horizonte superficial y el incremento del pH con la profundidad (Tabla IV). Unido a esto, los nitratos se pueden lavar de la zona radical ya que ni los coloides ni la materia orgánica del suelo los retienen y ese lavado es acompañado frecuentemente por los cationes básicos como el Ca^{2+} y el Mg^{2+} , lo que trae como consecuencia una acumulación de iones H^+ en la solución del suelo, incrementándose la acidificación (13). Esto último es un elemento a considerar para explicar el incremento de las concentraciones de los cationes dibásicos en la profundidad del perfil, tal como se observa en la Tabla IV.

El manejo de la fertilización también tuvo su efecto, tanto en la población de tallos (Figura 1), como en los rendimientos cañeros (Figura 2). En este sentido se concluyó en Brasil que cuando el fertilizante se enterró se incrementó el rendimiento cañero comparado con la aplicación superficial (14); otros autores encontraron que la incorporación del fertilizante a 0,08 m de profundidad, proporcionó más tallos m^{-1} y produjo 13 % más toneladas de caña que la aplicación superficial (15), resultados estos que son corroborados con los encontrados en el presente trabajo (Figura 1, Figura 2). En Guatemala recomiendan enterrar el fertilizante nitrogenado a ambos lados del surco (16); en la India concluyeron que la colocación adecuada del fertilizante contribuye a reducir las pérdidas por volatilización del N, a disminuir la fijación del P y por consiguiente, a incrementar el

uso eficiente del fertilizante, todo lo cual conduce a incrementar los rendimientos, por lo que los autores recomiendan enterrar el fertilizante a 0,08-0,10 m de profundidad sobre el surco o a los lados de este y luego cubrirlo con suelo (17).

Referido al momento de aplicación del fertilizante, se demostró que con la fertilización incorporada al suelo al inicio de las lluvias se alcanzaron rendimientos similares a los logrados cuando la incorporación del fertilizante se realizó inmediatamente después de la cosecha (Figura 2), por lo que no se justifica demorar la fertilización pues obligaría a realizarla manualmente, debido a la imposibilidad de introducir maquinaria en el campo por el crecimiento de la caña de azúcar.

La aplicación adicional de urea en el período lluvioso, ya haya sido superficial o incorporada al suelo, no constituyó un manejo efectivo mientras que sí fue una práctica que encareció la fertilización, con sus consiguientes implicaciones ambientales adversas, además de incrementar innecesariamente la cantidad de N para obtener 1 t de caña (Figura 4).

CONCLUSIONES

- ♦ El suelo en estudio presenta acidificación en el horizonte superficial, las concentraciones de los cationes intercambiables y el pH aumentan con la profundidad mientras que las de P, K y la materia orgánica disminuyen.
- ♦ La aplicación del fertilizante en los retoños debe realizarse inmediatamente después de la cosecha e incorporárlondolo a ambos lados del surco.
- ♦ La aplicación adicional de urea en el período lluvioso no incrementa ni la población de tallos ni los rendimientos, pero sí el Índice de Consumo de N.
- ♦ La población de tallos en 1 m lineal a los ocho meses de edad de la plantación correlaciona con el rendimiento en caña que se alcanza en la cosecha.

BIBLIOGRAFÍA

1. CNIAA. Manual Azucarero Mexicano. México: Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcohólica (CNIAA); 2014.
2. CONADESUCA-SAGARPA. Información de la industria azucarera, zafra 2015-2016. México: Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar; 2016.
3. Moreno JC, Landeros C, Vázquez AP, Palacios OL, Chávez MDRC, Collado CJL. Manejo y actitud del productor sobre la fertilización nitrogenada en caña de azúcar: un estudio de caso. Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable (RINDERESU). 2016;1(1):26-34.
4. FAO, IUSS. World reference base for soil resources 2014 [Internet]. Rome: FAO; 2015 [cited 2018 Apr 4]. 203 p. (Reports No. 106.). Available from: www.fao.org/3/i3794en/i3794EN.pdf

5. Jackson ML. Análisis químico de suelos. 2nd ed. Barcelona, España: Omega; 1970. 662 p.
6. López M. Estudio de ocho cultivares de caña de azúcar (*Saccharum* spp. Híbrido), ciclo planta, en tres localidades del Ingenio Central Progreso S.A. de C.V [Tesis de Maestría]. [México]: Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad Veracruzana; 2015. 72 p.
7. Statistical Graphics Crop. STATGRAPHICS® Plus [Internet]. Version 5.1. 2000. (Profesional). Available from: <http://www.statgraphics.com/statgraphics/statgraphics.nsf/pd/pdpricing>
8. van Kessel C, Venterea R, Six J, Adviento MA, Linquist B, Groenigen KJ. Climate, duration, and N placement determine N₂O emissions in reduced tillage systems: a meta-analysis. *Global Change Biology*. 2012;19(1):33–44. doi:10.1111/j.1365-2486.2012.02779.x
9. Black AS, Sherlock RR, Cameron KC, Smith NP, Goh KM. Comparison of three field methods for measuring ammonia volatilization from urea granules broadcast on to pasture. *Journal of Soil Science*. 1985;36(2):271–80. doi:10.1111/j.1365-2389.1985.tb00331.x
10. Akiyama H, McTaggart IP, Ball BC, Scott A. N₂O, NO, and NH₃ Emissions from Soil after the Application of Organic Fertilizers, Urea and Water. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2004;156(1):113–29. doi:10.1023/B:WATE.0000036800.20599.46
11. Mariano E, Trivelin PCO, Vieira MX, Leite JM, Otto R, Franco HCJ. Ammonia losses estimated by an open collector from urea applied to sugarcane straw. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2012;36(2):411–9. doi:10.1590/S0100-06832012000200010
12. Schroder JL, Zhang H, Girma K, Raun WR, Penn CJ, Payton ME. Soil Acidification from Long-Term Use of Nitrogen Fertilizers on Winter Wheat. *Soil Science Society of America Journal*. 2011;75(3):957–64. doi:10.2136/sssaj2010.0187
13. Brady NC, Weil RR. The Nature and Properties of Soils [Internet]. 15th. New York: Prentice Hall, Pearson Education Inc.; 2016 [cited 2018 Sep 21]. Available from: <https://www.pearson.com/us/higher-education/product/Brady-Nature-and-Properties-of-Soils-The-14th-Edition/9780132279383.html>
14. Bianchini A, Valadão, Rosa RP, Colhado F, Daros RF. Soil chiseling and fertilizer location in sugarcane ratoon cultivation. *Engenharia Agrícola*. 2014;34(1):57–65. doi:10.1590/S0100-69162014000100007
15. Quassi de Castro SG, Tadeu S, Junqueira HC, Graziano PS, Garside A, Mutton MA. Best Practices of Nitrogen Fertilization Management for Sugarcane Under Green Cane Trash Blanket in Brazil. *Sugar Tech*. 2017;1(19):51–6. doi:10.1007/s12355-016-0443-0
16. Pérez O. Nutrición y Fertilización. In: Melgar M, Meneses A, Orozco H, Pérez O, Espinosa R, editors. *El Cultivo de la Caña de Azúcar en Guatemala*. Guatemala: Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar; 2014. p. 150–76.
17. Patil B, Mahesh R, Nadagouda BT, Potdar MP, Balol G, Dutta SK, et al. 4R Nutrient Stewardship for Sugarcane. *Better Crops South Asia*. 2016;10(1):24–6.

Recibido: 11 de enero de 2018

Aceptado: 14 de septiembre de 2018

