

EFFECTO DEL ESTIÉRCOL Y FERTILIZANTE SOBRE LA RECUPERACIÓN DE ¹⁵N Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Manure and Fertilizer Effects on ¹⁵N-Nitrogen Recovery and Soil Electrical Conductivity

Héctor Mario Quiroga-Garza^{1‡}, José Antonio Cueto-Wong² y Uriel Figueroa-Viramontes¹

RESUMEN

Con el objetivo de cuantificar la recuperación del nitrógeno aplicado como fertilizante (¹⁵N) en combinación con estiércol y sus efectos en la acumulación de sales en el suelo, se estableció un ensayo en el Campo Experimental “La Laguna” del INIFAP. Se estudiaron cuatro dosis de estiércol: 0, 30, 60 y 120 Mg ha⁻¹ y dos de fertilizante: 120 y 240 kg N ha⁻¹. Se utilizó (NH₄)₂SO₄ enriquecido al 10% de átomos ¹⁵N en exceso. Se utilizaron macetas de tubos PVC de 15.24 cm de diámetro y 50 cm de altura. Los tratamientos se establecieron en un arreglo factorial con una distribución de bloques al azar con tres repeticiones. El estudio se condujo bajo riego sin lixiviados durante tres ciclos consecutivos. La producción de materia seca (MS) aumentó conforme se incrementaron las dosis de estiércol y fertilizante; sin embargo, con el incremento en el contenido de sales en el medio, la producción de MS decreció conforme pasaron los ciclos de cultivo. La recuperación de ¹⁵N del fertilizante fue de 29 a 30% durante el primer cultivo, y debido a la acumulación de sales esta recuperación bajó a 1.8 y 2.4% para el segundo cultivo y a 0.4 y 0.5% en el tercer cultivo. El contenido de sales, tanto en el lixiviado final como en el suelo, aumentó con las dosis de estiércol y fertilizante N, llegando a valores de 6.8 y 3.0 dS m⁻¹ en el lixiviado y suelo respectivamente. Es necesario definir un programa estratégico de uso de estiércol en la Comarca Lagunera, ya que los beneficios de este recurso son evidentes. Sin embargo, se debe acompañar con un adecuado manejo del riego, principalmente en sistemas presurizados, para

un adecuado lavado del suelo y evitar la acumulación de sales y con ello aprovechar al máximo el estiércol.

Palabras clave: sulfato de amonio, ryegrass, sudán, contenido de nitrógeno.

SUMMARY

With the aim to quantify the recovery of the nitrogen applied as chemical fertilizer (¹⁵N) in combination with manure and his effects in the accumulation of salt in a soil without drainage, a study was established in the “La Laguna” Research Station of INIFAP. Four manure doses: 0, 30, 60 and 120 Mg ha⁻¹ and two fertilizer doses: 120 and 240 kg N ha⁻¹ were studied, enriched ¹⁵N (NH₄)₂SO₄ (10% atom excess) was used. Pots of PVC pipe 15.24 cm diameter and 50 cm height were used. The treatments were established in a factorial arrangement with a distribution in a randomized complete block design with three replications. The study was conducted under irrigation without leaching for three consecutive crop cycles. Dry matter (DM) yield increased with increasing manure and fertilizer doses, but as salt contents buildup DM decreased with each crop cycle. Nitrogen recovery from fertilizer was 29-30% during the first crop, respectively for the two fertilizer rates; and as salt buildup, recovery dropped to 1.8 to 2.4% in the second crop, and to 0.4 to 0.5% in the third crop. The electrical conductivity (EC) in, the final leachate and soil at the end of the three crops, increased as the manure and fertilizer doses did, reaching an average value of 6.8 and 3.0 dS m⁻¹ in the leachate and soil, respectively. It is necessary to define a program strategically designed for using the manure in the Comarca Lagunera, since the benefits of this resource are evident. However, to prevent salt buildup the application of this program must be accompanied with a proper irrigation management, especially with the pressurized systems to allow a proper salt wash out of the root zone and get the manure benefits.

¹ INIFAP-CIRNOC. Campo Experimental La Laguna. Blvd. José S. Valdez 1200 Pte. 27440 Matamoros, Coahuila, México.

[‡] Autor responsable (quiroga.mario@inifap.gob.mx)

² INIFAP-CENID-RASPA. Km 6.5 margen derecha Canal de Sacramento s/n. 35140 Gómez Palacio, Durango, México.

Index words: ammonium sulfate, ryegrass, sudangrass, nitrogen contents.

INTRODUCCIÓN

Las regiones con una intensiva y tecnificada actividad pecuaria tienden a generar una sobre oferta de desechos orgánicos, como lo es el estiércol en La Comarca Lagunera, enclavada en la región desértica del norte centro de México. En esta cuenca lechera, la sobrepoblación de bovinos de leche origina una producción de estiércol estimada de 1×10^6 Mg año⁻¹, base seca (Figueroa *et al.*, 2009). Este recurso es principalmente aplicado en los terrenos agrícolas de las unidades de producción, pero sin un patrón o esquema de utilización; originando aplicaciones repetitivas en un mismo lote de cultivo, sobredosis, acumulación de estiércol en los mismos corrales, contaminación por sales, por nutrimentos como P y NO₃⁻ (Cueto *et al.*, 2005; Martínez *et al.*, 2006), y de partículas suspendidas en la atmósfera por acarreo del aire.

Los beneficios del estiércol al suelo son conocidos: aumento en los niveles de nutrimentos del suelo, mejoramiento de la estructura y conductividad hidráulica, incremento del contenido de materia orgánica y actividad microbiana. Estos beneficios han favorecido el uso del estiércol que por lo general en México es utilizado en forma empírica sin ninguna referencia o base tecnológica. En contraste con otras regiones del mundo, como en los Estados Unidos de América, su uso está enfocado y regulado por su contenido del N (Muñoz *et al.*, 2004; Dourado-Neto *et al.*, 2010; Endelman *et al.*, 2010). Tradicionalmente, la dosis de aplicación del estiércol es calculada para evitar la contaminación por NO₃⁻, con base en el contenido de N y en la demanda por este nutrimento por los cultivos a sembrar; lo anterior ha generado sobre aplicaciones de P, nutrimento que puede ser un riesgo potencial de contaminación por arrastre a los cuerpos superficiales de agua (Toth *et al.*, 2006). En la Comarca Lagunera se tiene documentada la contaminación del manto acuífero por NO₃⁻ (Cueto *et al.*, 2005; Martínez *et al.*, 2006). En países de la Unión Europea, la regulación para la aplicación de estiércol está basada en el contenido de P, debido a su poca movilidad en el suelo, por su acumulación en la superficie y su potencial de arrastre a cuerpos de agua como ríos y lagos (Kuipers *et al.*, 1999; Nelson, 1999; Newton *et al.*, 2003). Los suelos agrícolas en la Comarca Lagunera son planos con poca pendiente, por lo que el P

no representaría riesgos por arrastre pero si por acumulación en la capa arable del suelo.

Junto a los beneficios nutrimentales a los cultivos, la aplicación de estiércol trae consigo la adición de importantes cantidades de sales al suelo (Amoozegar-Fad *et al.*, 1980; Butler *et al.*, 2008). Algunas estimaciones señalan que por cada tonelada de estiércol que se aplica, base seca, en promedio la conductividad eléctrica (CE) del suelo se incrementa en 0.1108 dS m⁻¹, en la profundidad de 0 a 150 cm (Hao y Chang, 2003), o su equivalente de 71 mg de sales L⁻¹ (Rhoades y Miyamoto, 1990). El efecto negativo de acumulación de NO₃⁻ y el incremento de la CE del suelo, después de aplicaciones constantes de estiércol durante varios años, es un factor de riesgo a considerar si se pretende implementar un programa de estercolamiento de terrenos agrícolas. Indrarante *et al.* (2009), después de la aplicación de estiércol a un terreno durante 25 años consecutivos, estimaron que para que el suelo regresara a su estado inicial en sus niveles de NO₃⁻ y CE; se requerirían de 24 a 52 años en un terreno bajo irrigación y de 182 a 297 años en un terreno de temporal.

En zonas áridas como La Comarca Lagunera, los productores de forrajes y otros cultivos y al ser una cuenca cerrada, la principal limitante para la producción agropecuaria es el agua de riego. La sobrepoblación de bovinos produce una elevada cantidad de desechos orgánicos, y para mejorar la eficiencia del uso y consumo del agua de riego se han adoptado sistemas de riego tecnificados de alta o baja presión. Sin embargo, con estos modernos sistemas de riego si no son manejados correctamente, y si por ahorrar agua solo se humedece el perfil de la capa arable y no se aplican láminas de lavado, la tendencia general será la de acumular sales en la capa arable de suelo y volver improductivas estas tierras en el corto o mediano plazo. El objetivo del presente estudio fue el de cuantificar la recuperación del nitrógeno aplicado como fertilizante químico (¹⁵N) en combinación con estiércol y sus efectos en la acumulación de sales en un suelo sin drenaje.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se condujo en las instalaciones del Campo Experimental La Laguna de INIFAP. Para rastrear el movimiento del N en el sistema suelo-planta se utilizó el isótopo ¹⁵N. Durante los meses marzo-mayo se establecieron dos parcelas de pasto sudán (*Sorghum sudanense* (Piper) Stapf) fertilizado con urea,

la producción de heno se utilizó en la alimentación de un bovino adulto de la raza Holstein (*Bos taurus*), para la producción de estiércol. El estiércol producido durante los primeros cinco días fue desechado y se recolectó durante los siguientes 10 días el cual se apiló al ambiente durante tres meses para su posterior utilización en el ensayo.

El estiércol (C:N 17.31, sales 4.56%, MO 36.09%, C orgánico 20.94%) se aplicó en macetas elaboradas con cilindros de PVC de 15.24 cm de diámetro y 50 cm de altura, con 14 kg de suelo por maceta de la serie "Coyote" (Cuadro 1), mezclándose el suelo con el estiércol. Para estimar la remoción de N, se utilizaron como cultivos extractores dos siembras de ballico o ryegrass anual (*Lolium multiflorum* Lam.) en el otoño-invierno y una siembra de pasto sudán en la primavera-verano, intermedia entre los dos ciclos de ballico o ryegrass anual.

El estiércol se aplicó una sola vez antes de la primera siembra de ballico anual, aplicándose dosis de 0, 55, 110 y 220 g maceta⁻¹; equivalentes a 0, 30, 60 y 120 Mg ha⁻¹. En combinación con las dosis de estiércol, se aplicaron dosis de 0, 220 y 440 mg N maceta⁻¹ utilizando como fuente (NH₄)₂SO₄; estas dosis fueron equivalentes a 0, 120 y 240 kg N ha⁻¹ por ciclo de cultivo. La dosis se fraccionó en cuatro aplicaciones, a la siembra y después de los primeros tres cortes, para ello se prepararon soluciones del fertilizante y se aplicaron con pipeta. El fertilizante utilizado fue enriquecido con 10% de ¹⁵N de átomos en exceso. Cada combinación de estiércol y fertilizante se estableció en tres macetas por repetición. Durante el primer ciclo de ryegrass todas las macetas recibieron el fertilizante marcado ¹⁵N, para el segundo ciclo de sudán solo dos de las tres se fertilizaron con ¹⁵N

Cuadro 1. Condiciones iniciales del suelo utilizado en las macetas.

Característica	Valor
Arena	14.00%
Limo	34.00%
Arcilla	52.00%
pH	8.38
Conductividad eléctrica	1.414 dS m ⁻¹
Materia orgánica	1.05%
CO ₃	15.89%
N-NO ₃	57.5 mg kg ⁻¹
P ₂ O ₅	9.0 mg kg ⁻¹
K ₂ O	593 mg kg ⁻¹

la restante se fertilizó con la misma fuente (NH₄)₂SO₄ pero comercial (sin ¹⁵N), y para el tercer ciclo con ryegrass sólo una maceta se fertilizó con ¹⁵N y las dos restantes con fertilizante comercial.

Para la aplicación del fertilizante en las macetas se prepararon soluciones de (NH₄)₂SO₄ de ambas fuentes, realizando la aplicación con pipetas; para evitar contaminación se utilizó una pipeta para la solución de fertilizante comercial y otra pipeta diferente para la solución de fertilizante enriquecido con ¹⁵N. En total se realizaron cuatro aplicaciones de cada dosis de fertilizante en cada uno de los tres cultivos. El 25% de la dosis se aplicó durante la siembra y el restante 75% en partes iguales después del primer, segundo y tercer corte. En total se realizaron cuatro cortes en cada uno de los tres cultivos.

La combinación de tratamientos fue establecida con un arreglo factorial 4 × 2 y distribuidos en bloques al azar con tres repeticiones. Para la aplicación de los riegos se aplicaron de 100 a 150 mL diarios (verano) o cada tercer día (invierno), con estos volúmenes de riego no se indujeron lixiviados de las macetas. La cuantificación de la relación isotópica de ¹⁵N/¹⁴N en planta y suelo, se realizó con un espectrómetro de masas en un laboratorio comercial en EUA. Para el análisis, las muestras de planta, suelo y estiércol fueron secadas y finamente molidas, tamizadas en una criba con apertura de poros de 150 µm.

Se estimó el porcentaje del nitrógeno derivado del fertilizante (NDFP), la cantidad de N derivado del fertilizante (FDN) y el porcentaje de N recuperado (NR) con las siguientes operaciones (Picchioni y Quiroga, 1999):

$$\% \text{ NDFP} = \frac{\% \text{ }^{15}\text{N en la muestra} - \% \text{ }^{15}\text{N en la muestra de referencia}}{\% \text{ }^{15}\text{N del fertilizante} - \% \text{ }^{15}\text{N de abundancia natural}} \times 100$$

$$\text{FDN} = \frac{\% \text{ NDFP}}{100} \times \frac{\% \text{ N muestra}}{100} \times \text{MS (g)}$$

$$\% \text{ NR} = \frac{\text{FDN (g)}}{\text{N (g) aplicado como fertilizante}} \times 100$$

donde:

$$\% \text{ }^{15}\text{N muestras de referencia} = 0.371$$

$$\% \text{ }^{15}\text{N abundancia natural} = 0.367 \text{ (Janzen et al., 1990)}$$

$$\% \text{ }^{15}\text{N fertilizante} = 10.0$$

Al final de los tres cultivos se indujeron lixiviados (en promedio se aplicaron 4 L y se recolectaron 600 mL de lixiviado por maceta), posterior a este evento se tomaron muestras de suelo de cada maceta para su análisis. Las variables que se estudiaron fueron: producción de materia seca por corte y total de cada uno de los tres cultivos, concentración de N total en la materia seca, remoción de N y porcentaje de recuperación de N en la materia seca producida en la parte aérea de los tres cultivos, cambios en el contenido de materia orgánica, N-NO₃, N total y CE del suelo, después de tres ciclos consecutivos de cultivo, CE de los lixiviados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Conductividad Eléctrica del Suelo y Lixiviado

Al finalizar los tres cultivos se realizó un riego pesado para inducir lixiviación, la CE cuantificada en éste se muestra en la Figura 1. Se encontró diferencia significancia ($P \leq 0.05$) en los efectos principales de los dos factores. La CE de los lixiviados fluctuó de 3.5 a 6.2 dS m⁻¹, para las dosis de 0 y 120 Mg estiércol ha⁻¹ y de 4.6 a 5.6 dS m⁻¹, para las dosis de 120 y 240 kg N ha⁻¹, respectivamente. Esta acumulación de sales en el medio es el reflejo de las dosis de estiércol, las repetidas aplicaciones de fertilizantes y sobre todo a la falta de lavado del suelo durante el estudio; ante esta falta de lavado del suelo es muy factible que se presente en zonas de riego tecnificado, donde la tendencia es ahorrar agua

con la aplicación de menores láminas de riego que impedirán mover las sales mas allá de la zona radicular. Los cultivos utilizados en este estudio, los pastos ryegrass y sudán, son catalogados como medianamente tolerantes a salinidad (Mayland y Wilkinson, 1996). Los efectos negativos de estos niveles de CE redujeron la productividad y absorción de N como resultado del estrés osmótico y el antagonismo de los iones de las sales con el NO₃⁻ (Lea-Cox y Syvertsen, 1993; Steppuhn, *et al.*, 2005).

En el suelo la CE (Figura 2) presentó diferencia significativa para los efectos principales ($P \leq 0.05$) similar a las tendencias observadas en los lixiviados, es decir, mayor CE conforme aumentó la dosis de estiércol y la dosis del fertilizante N. La CE final del suelo presentó en promedio niveles de 2 a 2.5 veces la CE inicial del mismo (Cuadro 1).

Producción de MS y Contenido de N

En la Figura 3, se muestra la producción de materia seca (MS) de los tres cultivos. En los tres casos no se detectó significancia estadística en la interacción entre las dosis de estiércol y de fertilizante químico. Los valores de DMS₀₅ para las dos variables por cultivo se presentan en el Cuadro 2. Durante el primer cultivo (ryegrass anual), las mayores producciones ($P \leq 0.05$) de MS en cada nivel de estiércol se lograron cuando se aplicó la dosis mayor de N (240 kg ha⁻¹ ciclo⁻¹). En general, la dosis mayor de estiércol (120 Mg ha⁻¹) fue superior en comparación con las tres dosis inferiores

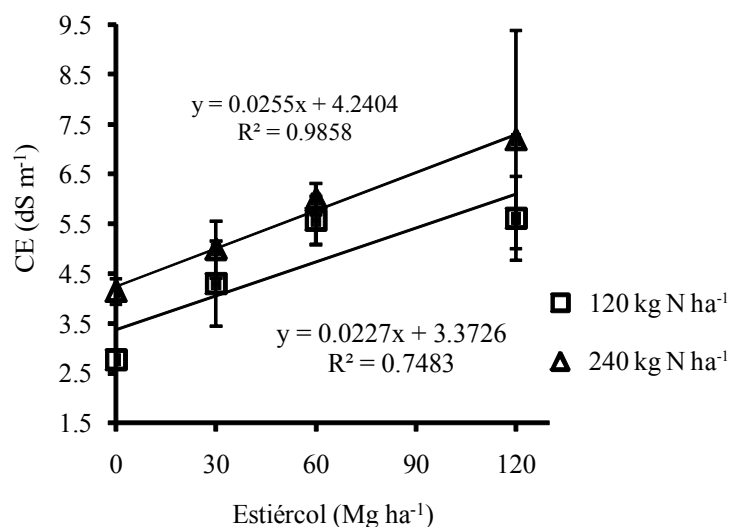


Figura 1. Conductividad eléctrica (CE) del lixiviado por efecto de aplicación de estiércol bovino y fertilizante nitrogenado después de concluir los tres cultivos.

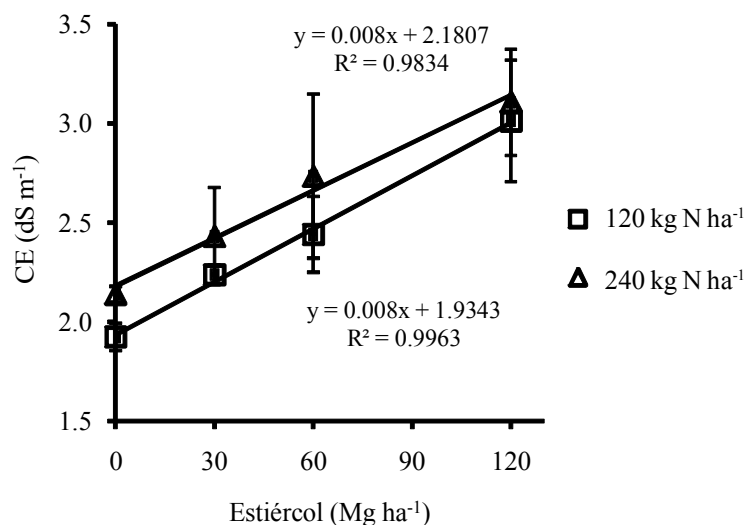


Figura 2. Conductividad eléctrica (CE) del lixiviado por efecto de aplicación de estiércol bovino y fertilizante nitrogenado después de concluir los tres cultivos.

($P \leq 0.05$). Sin embargo, en el segundo cultivo (sudán), únicamente el efecto de la dosis de estiércol fue significativo ($P \leq 0.05$), observándose una tendencia similar, mayor producción a mayor dosis de estiércol, no existiendo diferencia entre las dosis de fertilizante N. Para el tercer cultivo (ryegrass anual), la producción de MS decreció notablemente en comparación a los primeros dos cultivos. Se observó un efecto significativo para MS, tanto por la dosis de estiércol como de fertilizante N ($P \leq 0.05$), obteniéndose la mayores producciones de MS con las dosis más altas de ambas variables.

La reducción en la producción de MS en el tercer cultivo (ryegrass anual) fue el efecto de la acumulación de sales, tanto por la aplicación de estiércol como de fertilizante químico, ya que el estudio se condujo sin inducir lixiviados y este cultivo es reportado como medianamente tolerante al efecto de las sales (Mayland y Wilkinson, 1996). Otro posible mecanismo de las sales es la reducción en la eficiencia de utilización del N-NO₃,

Cuadro 2. Diferencias mínimas significativas (DMS₀₅) para los efectos principales de las dosis de estiércol y fertilizante químico nitrogenado sobre la producción total de materia seca en los tres ciclos de cultivo.

Tratamiento	Ryegrass 1	Sudán	Ryegrass 2
	----- g maceta ⁻¹ -----		
Estiércol	1.68	2.31	1.82
Fertilizante	1.19	NS [†]	1.29

[†] NS = no significancia ($P \leq 0.05$).

posiblemente por antagonismo entre los aniones de las sales como Cl⁻ con NO₃⁻ (Lea-Cox y Syvertsen, 1993). Asimismo, la salinidad está asociada a estrés osmótico, reducción del crecimiento, toxicidad iónica y desórdenes nutrimentales, entre otras (Steppuhn *et al.*, 2005).

El efecto de la acumulación de sales en el suelo sobre la eficiencia de utilización del N se observa en el Cuadro 3. El contenido de N decreció en cada uno de los cultivos, esta disminución puede ser el efecto de la acumulación gradual de sales con cada ciclo de cultivo, y el antagonismo de los iones de las sales con el NO₃⁻ (Lea-Cox y Syvertsen, 1993). Se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) para los efectos principales en el primer y tercer ciclos de cultivo. En el primer cultivo, ryegrass, se observó una mayor concentración de N cuando no recibió aplicaciones de estiércol, pudiendo ser el resultado de una inmovilización microbiana del N inorgánico en los tratamientos con estiércol. Al aplicar la dosis mayor de estiércol se observó un aumento en el contenido total de N en la MS, como resultado de una mayor oferta de N por encima de las necesidades de la actividad microbiana.

Para el segundo cultivo (sudán), no se encontró diferencias significativas ($P \leq 0.05$), sin embargo, la concentración de N fue 53 a 58% de la concentración de N en el primer cultivo. La demanda de N por el pasto sudán es menor a la del ryegrass, más los efectos negativos de la acumulación de sales sobre la eficiencia en la utilización de N limitaron el consumo de este nutrimento por el cultivo. Aunque en el último cultivo

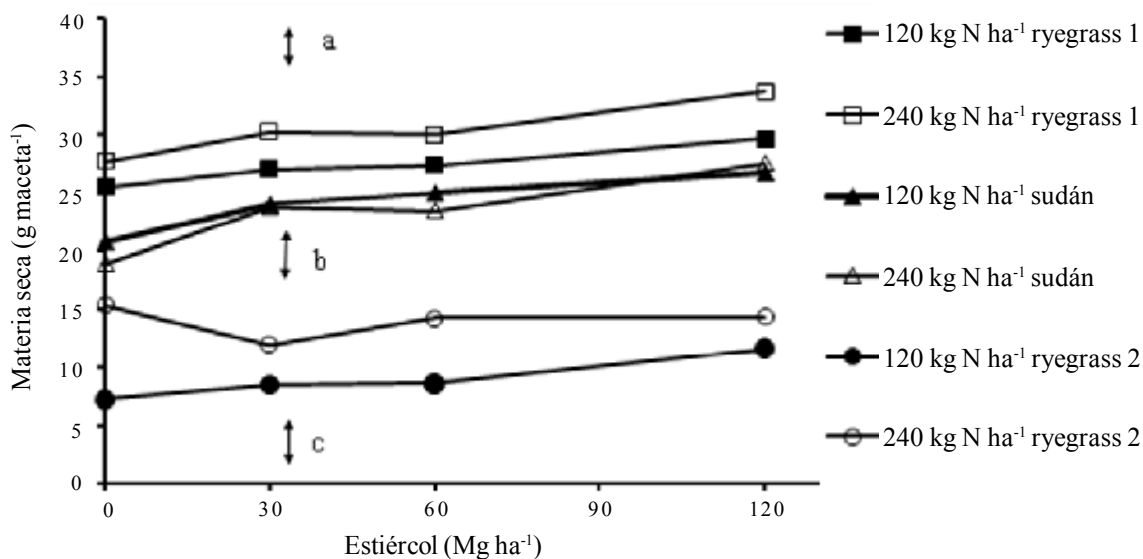


Figura 3. Producción de materia seca, acumulada en cuatro cortes, en los tres cultivos establecidos. Cuatro dosis de estiércol y dos dosis de fertilizante N químico. a) Desviación estándar Ryegrass 1; b) Desviación estándar Sudán y c) Desviación estándar Ryegrass 2 (valores de DMS en Cuadro 2).

(ryegrass) se encontraron diferencias estadísticas ($P \leq 0.05$), tanto para dosis de N como de estiércol, los valores de concentración de N encontrados en la MS fueron del orden del 10% con respecto a la concentración del primer cultivo, no obstante de ser la misma especie, esto puede ser el reflejo del antagonismo entre los aniones de las sales con NO_3^- (Lea-Cox y Syvertsen, 1993) y el estrés osmótico (Steppuhn, *et al.*, 2005).

Recuperación de ^{15}N del Fertilizante

Solo la aplicación de estiércol afectó significativamente ($P \leq 0.05$) la recuperación de ^{15}N

del fertilizante aplicado durante el primer cultivo de ryegrass (Cuadro 4). La dosis de fertilizante N no afectó significativamente ($P \leq 0.05$) la recuperación del ^{15}N , promediando 30.50 y 28.95% del ^{15}N aplicado. Se observó tendencia de disminución en la recuperación del ^{15}N del fertilizante durante el primer cultivo conforme se incrementó la dosis de estiércol, debido al aumento en el contenido de C por la aplicación de MO, y esto es el reflejo de una mayor inmovilización del N por la actividad microbiana (Bechini y Marino, 2009). Los valores de recuperación de ^{15}N del fertilizante están dentro de los rangos obtenidos en otros estudios. Picchioni y Quiroga (1999) encontraron recuperaciones entre

Cuadro 3. Absorción de nitrógeno en la materia seca obtenida en cuatro cortes de los tres ciclos de cultivo, ryegrass-sudán-ryegrass, por efecto de la aplicación de fertilizante ^{15}N y estiércol bovino.

Estiércol	Fertilizante kg N ha ⁻¹					
	1 Ryegrass		2 Sudán		3 Ryegrass	
Mg ha ⁻¹	120	240	120	240	120	240
	Concentración de N (g kg ⁻¹ de materia seca)					
0	20.11	19.53	10.12	10.57	1.38	2.59
30	17.91	17.5	10.17	10.05	1.51	2.28
60	17.62	16.72	10.57	10.39	1.54	2.56
120	18.75	18.66	10.46	10.68	2.04	2.68
	DMS ₀₅					
Estiércol		0.74		NS [†]		0.24
Fertilizante		NS		NS		0.17

[†] NS = no significancia ($P \leq 0.05$).

Cuadro 4. Recuperación de ¹⁵N del fertilizante durante el primer cultivo (ryegrass) de extracción por efecto de las dosis de estiércol y fertilizante ¹⁵N.

Nitrógeno	Estiércol (Mg ha ⁻¹)				Medias fertilizante	DMS ₀₅
	0	30	60	120		
kg ha ⁻¹	----- ¹⁵ N Recuperado (%) -----					
120	31.73	29.47	27.00	27.59	28.95 a [†]	1.69
240	32.05	30.81	29.85	29.27	30.49 a	
Medias estiércol	31.90 a [†]	30.14 ab	28.42 b	28.43 b		
DMS ₀₅	2.40					

[†] Medias, en cada efecto principal, con la misma literal son estadísticamente iguales ($P \leq 0.05$).

26 y 35% utilizando una fuente química soluble; Ladha et al. (2005) mencionan que para un primer cultivo después de la aplicación de un fertilizante químico enriquecido con ¹⁵N, la eficiencia de recuperación fluctúa desde 30 hasta 50%. Dourado-Neto *et al.* (2010) encontraron una recuperación promedio de 21% (7 a 58%) durante el primer año de cultivo después de la aplicación de la fuente marcada en diferentes sistemas tropicales de cultivo.

Para el segundo ciclo con pasto sudán (cuatro cortes), se contó con dos observaciones por combinación de tratamientos; una que recibió el fertilizante ¹⁵N desde el primer ciclo de cultivo y otra más donde para el segundo ciclo de cultivo ya no se aplicó el fertilizante ¹⁵N, sino fertilizante comercial (¹⁴N). Tanto los efectos principales de dosis de estiércol como de dosis de fertilizante fueron significativos ($P \leq 0.05$), no así la interacción (Cuadro 5). En el caso del estiércol se presentaron las mismas tendencias de los efectos principales observadas en el primer ciclo de cultivo. La recuperación de ¹⁵N con las dosis de estiércol fluctuó en el rango de 12.20% para 0 Mg ha⁻¹ a 9.53% para 120 Mg ha⁻¹.

Cuando el fertilizante ¹⁵N se aplicó durante los dos cultivos consecutivos, la recuperación del N del fertilizante fue significativa ($P \leq 0.05$) para la dosis de 240 kg N ha⁻¹ (Cuadro 5). No obstante la aplicación de ¹⁵N durante los dos cultivos consecutivos, la recuperación en el segundo cultivo fue 25% menor a la recuperación obtenida en el primer cultivo (Cuadro 4); sin embargo, esta recuperación fue afectada por la acumulación de sales en el medio, al inducir un posible antagonismo entre aniones de las sales y NO₃⁻ (Lea-Cox y Syvertsen, 1993) y a estrés osmótico (Steppuhn *et al.*, 2005).

La recuperación de ¹⁵N en el segundo cultivo, aplicado desde el primer ciclo, fue de 1.87 al 2.40% para ambas dosis de fertilizante. La recuperación fue baja si la comparamos a las obtenidas durante el primer ciclo de estudio, pero dentro de los rangos reportados en otros estudios. Dourado-Neto *et al.* (2010) realizaron aplicaciones de ¹⁵N solo durante el primer ciclo de cultivo y reportan recuperaciones del 6 al 9.1%, del segundo al sexto ciclo de cultivo.

Para el tercer cultivo (ryegrass) se encontró diferencia significativa ($P \leq 0.05$) en la recuperación

Cuadro 5. Recuperación de ¹⁵N del fertilizante nitrogenado durante el segundo cultivo (Sudán) de extracción. Los efectos corresponden a dosis de estiércol y fertilizante ¹⁵N.

Nitrógeno	Estiércol (Mg ha ⁻¹)				Medias fertilizante	DMS ₀₅
	0	30	60	120		
kg ha ⁻¹	----- ¹⁵ N Recuperado (%) -----					
120 [‡]	17.91	18.86	18.40	14.91	17.52 b [†]	
240 [‡]	27.91	23.86	22.49	18.76	23.10 a	2.05
120 [§]	2.43	2.78	1.68	2.71	2.40 c	
240 [§]	1.17	2.78	1.81	1.72	1.87 c	
Medias estiércol	12.20 a [†]	12.07 a	11.09 ab	9.52 b		
DMS ₀₅	2.05					

[†] Medias, en cada efecto principal, con la misma literal son estadísticamente iguales ($P \leq 0.05$). [‡] Aplicación de fertilizante ¹⁵N (10%) durante los dos ciclos de cultivo. [§] Aplicación de fertilizante ¹⁵N (10%) sólo durante el primer ciclo de cultivo y fertilizante comercial (¹⁴N) para el segundo cultivo.

Cuadro 6. Recuperación de ^{15}N del fertilizante durante el tercer cultivo (ryegrass) de extracción por efecto de las dosis de estiércol y fertilizante ^{15}N .

Nitrógeno	Estiércol (Mg ha^{-1})				Medias fertilizante	DMS ₀₅
	0	30	60	120		
kg ha^{-1}	^{15}N recuperado (%)					
120 ‡	20.10	18.58	19.43	21.11	19.81 b	
240 ‡	23.07	21.40	21.22	21.66	21.84 a [†]	
120 §	0.68	1.03	0.99	1.21	0.98 c	1.61
240 §	0.73	1.02	0.83	0.95	0.88 c	
120 ¶	0.41	0.41	0.62	0.52	0.49 c	
240 ¶	0.20	0.42	0.53	0.34	0.37 c	
Medias estiércol	7.53 a [†]	7.14 a	7.27 a	7.63 a		
DMS ₀₅		1.31				

[†] Medias, en cada efecto principal, con la misma literal son estadísticamente iguales ($P \leq 0.05$). [‡] Aplicación de fertilizante ^{15}N (10%) durante los tres ciclos de cultivo. [§] Aplicación de fertilizante ^{15}N (10%) durante el primer y segundo ciclo de cultivo y fertilizante comercial para el tercer cultivo.

[¶] Aplicación de fertilizante ^{15}N (10%) solo durante el primer ciclo de cultivo y fertilizante comercial para el segundo y tercer cultivo.

de N para los efectos principales de las dosis de fertilizante N (Cuadro 6). Al igual que en el segundo cultivo, la mayor recuperación de ^{15}N correspondió a las dosis de 240 y 120 kg N ha^{-1} cuando recibieron la aplicación del ^{15}N durante los tres cultivos, 21.84 y 19.8%, respectivamente. Estos valores fueron ligeramente superiores, dado el efecto residual del ^{15}N aplicado en los dos cultivos anteriores; sin embargo, la acumulación de sales en el medio limitó la absorción del N y el desarrollo del cultivo debido al antagonismo entre el NO_3^- y los aniones de las sales (Lea-Cox y Syvertsen, 1993). La recuperación de ^{15}N en los tratamientos que recibieron la aplicación del isótopo ^{15}N uno o dos cultivos anteriores, sus niveles de recuperación fueron menores de 1%.

Al final del tercer cultivo, la recuperación total del N aplicado en el fertilizante desde el primer cultivo fue de 32 a 33% para las dosis de 120 y 240 kg N ha^{-1} ; valores similares a los reportados en otros estudios (Dourado-Neto *et al.*, 2010; Ladha *et al.*, 2005; Picchioni y Quiroga, 1999).

CONCLUSIONES

Después de tres ciclos de cultivo consecutivos, la recuperación global de ^{15}N aplicado como fertilizante al primer cultivo fue del orden de un 32 a 33%, obteniéndose la mayor recuperación en el primer ciclo de cultivo 29 a 30%, la recuperación de ^{15}N en los ciclos subsecuentes, fue afectada por la acumulación de sales en el medio. Por lo tanto, es necesario definir

un programa estratégico de uso para la sobre oferta de estiércol de bovino en la Comarca Lagunera, ya que los beneficios de este recurso son evidentes en cuanto su aporte de nutrimentos, materia orgánica y mejora de las propiedades del suelo, entre otros. Sin embargo, este programa de uso debe de estar acompañado con un adecuado manejo del riego, principalmente con los modernos sistemas presurizados; para evitar la acumulación de sales será necesario un adecuado calendario de lavados del suelo para mover las sales más allá de la zona radicular y con ello aprovechar al máximo los beneficios del estiércol.

LITERATURA CITADA

- Amoozegar-Fad, A., W. H. Fuller, and A. W. Warrick. 1980. The movement of salt from soil following heavy application of feedlot wastes. *J. Environ. Qual.* 9: 269-273.
- Bechini, L. and P. Marino. 2009. Short-term nitrogen fertilizing value of liquid dairy manures is mainly due to ammonium. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 2159-2169.
- Butler, T. J., K. J. Han, J. P. Muir, D. C. Weindrof, and L. Lastly. 2008. Dairy manure compost effects on corn silage production and soil properties. *Agron. J.* 100: 1541-1545.
- Cueto-Wong, J. A., D. G. Reta-Sánchez, G. González-Cervantes, I. Orona-Castillo y J. Estrada-Ávalos. 2005. Características químicas de aguas de pozos profundos del acuífero de Villa Juárez, Durango. *AGROFAZ* 5: 869-874.
- Dourado-Neto, D., D. Powlson, R. Abu Bakar, O. O. S. Bacchi, M. V. Basanta, P. Thi Cong, G. Keerthisinghe, M. Ismaili, S.M. Rahman, K. Reichardt, M. S. A. Safwat, R. Sangakkara, L. C. Timm, J. Y. Wang, E. Zagal, and C. van Kessel. 2010. Multiseason recoveries of organic and inorganic nitrogen-15 in tropical cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74: 139-152.

- Endelmann, J. B., J. R. Reeve, and D. T. Drost. 2010. A new decay series for organic crop production. *Agron. J.* 102: 457-463.
- Figueroa-Viramontes, U., G. Núñez-Hernández, J. A. Delgado, J. A. Cueto-Wong y J. P. Flores-Margez. 2009. Estimación de la producción de estiércol y de la excreción de nitrógeno, fósforo y potasio por bovino lechero en la Comarca Lagunera. pp. 128-151. *In: I. Orona C., E. Salazar S., M. Fortis H. (eds.). Agricultura orgánica. FAZ-UJED. SMCS. Gómez Palacio, Durango, México.*
- Hao, X. and C. Chang. 2003. Does long-term heavy cattle manure application increase salinity of a clay loam soil in semi-arid southern Alberta? *Agric. Eco. Environ.* 94: 89-103.
- Indraratne, S. P., X. Hao, C. Chang, and F. Godlinski. 2009. Rate of soil recovery following termination of long-term cattle manure applications. *Geoderma* 150: 415 - 423.
- Janzen, H. H., J. B. Bole, V. O. Biederbeck, and A. E. Slinkard. 1990. Fate of N applied as green manure or ammonium fertilizer to soil subsequently cropped with wheat at three sites in western Canada. *Can. J. Soil Sci.* 70: 313-323.
- Kuipers, A., F. Mandersloot, and R. L. G. Zom. 1999. An approach to nutrient management on dairy farms. *J. Anim. Sci.* 77: 84-89.
- Ladha, J. K., H. Pathak, T. J. Krupnik, J. Six, and C. van Kessel. 2005. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: Retrospects and prospects. *Adv. Agron.* 87: 85-156.
- Lea-Cox, J. D., and J. P. Syvertsen. 1993. Salinity reduces water use and nitrate-N-use efficiency in citrus. *Ann. Bot.* 72: 47-54.
- Martínez-Rodríguez, J. G., J. Z. Castellanos-Ramos, M. Rivera-González, G. Núñez-Hernández y R. Faz-Contreras. 2006. Contaminación por nitratos en acuíferos del Norte de México y del Estado de Guanajuato. *AGROFAZ* 6: 369-387.
- Mayland, H. F. y S. R. Wilkinson. 1996. Mineral nutrition. pp. 165-191. *In: L. E. Moser, D. R. Buxton y M. D. Casler (eds.). Cool-season forage grasses. ASA N° 34 Agronomy. Madison, WI, USA.*
- Muñoz, G. R., K. A. Kelling, J. M. Powell, and P. E. Speth. 2004. Comparison of estimates of first-year dairy manure nitrogen availability or recovery using nitrogen-15 and other techniques. *J. Environ. Qual.* 33: 719-727.
- Nelson, C. J. 1999. Managing nutrients across regions of the United States. *J. Anim. Sci.* 77: 90-100.
- Newton, G. L., J. K. Bernard, R. K. Hubbard, J. R. Allison, R. R. Lowrance, G. J. Gascho, R. N. Gates, and G. Vellidis. 2003. Managing manure nutrients through multi-crop forage production. *J. Dairy Sci.* 86: 2243 - 2252.
- Picchioni, G. A. and H. M. Quiroga G. 1999. Growth and nitrogen partitioning, recovery, and losses in bermudagrass receiving soluble sources of labeled ¹⁵Nitrogen. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 124: 719-725.
- Rhoades, J. D. and S. Miyamoto. 1990. Testing soils for salinity and sodicity. pp 229-336. *In: R. L. Westerman (ed.). Soil testing and plant analysis. ASA, SSSAJ Book Series N° 3. Madison, WI, USA.*
- Steppuhn, H., M. Th. van Genuchten, and C. M. Grieve. 2005. Root-zone salinity: I. Selecting a product-yield index and response function for crop tolerance. *Crop Sci.* 45: 209-220.
- Toth, J. D., Z. Dou, J. D. Ferguson, D. T. Galligan, and C. F. Ramberg Jr. 2006. Nitrogen- vs. phosphorus-based dairy manure applications to field crops: nitrate and phosphorus leaching and soil phosphorus accumulation. *J. Environ. Qual.* 35: 2302-2312.