

DISPONIBILIDAD DE NITRÓGENO Y DESARROLLO DE AVENA FORRAJERA (*Avena sativa* L.) CON APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS

Nitrogen Availability and Growth of Forage Oats (*Avena sativa* L.) with Application Biosolids

Edgar Flores Félix¹, Héctor Moreno Casillas²,
Uriel Figueroa Viramontes^{3*} y María del Carmen Potisek Talavera⁴

RESUMEN

Se estableció un experimento para evaluar dosis crecientes de fertilizante sintético y biosólidos líquidos digeridos aeróbicamente en un cultivo de avena forrajera, para 1) evaluar la respuesta agronómica de la avena forrajera a la aplicación de nitrógeno (N) como sulfato de amonio y biosólidos, y 2) estimar la disponibilidad de N en los biosólidos en el ciclo de cultivo, mediante el método de equivalencia de fertilizante (EF). Los tratamientos fueron diseñados para aportar 0, 67, 100 y 133% del requerimiento de N del cultivo (RNC) de avena forrajera con ambas fuentes de N. El 100% del RNC fue de 144 kg ha⁻¹, al cual se restó el N residual del suelo y el N del agua de riego, por lo que la dosis de fertilizante para cubrir el 100% del RNC fue de 95 kg ha⁻¹. La altura de planta se incrementó hasta en un 53% con ambas fuentes de N, con respecto al testigo sin fertilizar. El rendimiento de materia seca (MS) obtenido en las parcelas con biosólidos fue significativamente mayor que con fertilizante sintético. Con ambas fuentes de N, el rendimiento de MS se ajustó a una ecuación de regresión lineal, en función de la dosis de N. De acuerdo con el método de EF, las dosis de 160.9 kg ha⁻¹ de N total con biosólidos (DN_{bios}) y 37.5 kg ha⁻¹ de N inorgánico con fertilizante (DN_{fert}), tuvieron 103.2 kg ha⁻¹ de N extraído por el cultivo (N_{ext}). La disponibilidad de N del biosólido (ND_{bios}) se calculó

como la proporción de la DN_{fert} con respecto a la DN_{bios} para un mismo valor de N_{ext}, expresado en porcentaje; en el presente estudio, el ND_{bios} fue de 23.3%. La estimación del N disponible es importante para estimar dosis de aplicación de biosólidos con base en el requerimiento de N de los cultivos, evitando así aplicaciones excesivas y riesgos de contaminación.

Palabras clave: rendimiento de forraje, nitrógeno en planta, extracción de nitrógeno.

SUMMARY

An experiment was established with increasing rates of fertilizer and aerobically digested liquid biosolids in forage oats to 1) evaluate the agronomic response of forage oats to nitrogen (N) applied as ammonium sulfate or biosolids and 2) to estimate the available nitrogen in biosolids during the growing season, using the fertilizer equivalence (FE) method. The treatments were designed to provide 0, 67, 100 and 133% of the crop N requirement (CNR). The N rate at 100% of the CNR was 144 kg N ha⁻¹, to which the soil N and irrigation water N were subtracted, so the fertilizer rate to provide 100% of the CNR was 95 kg ha⁻¹. Plant height increased up to 53% with both sources of N, relative to the control without N. Dry matter (DM) yield obtained in the plots with biosolids was significantly higher than with fertilizer. With both sources of N, DM yield was adjusted to a linear regression equation, as a function of N rate. According to the FE, with the rate of 160.9 kg ha⁻¹ of total N in biosolids (NR_{bios}) and 37.5 kg ha⁻¹ of inorganic fertilizer (NR_{fert}), 103.2 kg ha⁻¹ N was extracted by the crop (N_{ext}). The available N in biosolids (AN_{bios}) was calculated as the ratio between NR_{fert} and NR_{bios}, expressed in percentage; in this study, the AN_{bios} was 23.3%. Estimation of available N is important in estimating biosolids rates, based on the N requirement of crops, thus avoiding excessive applications and risks of contamination.

¹ Ecosistema de Ciudad Lerdo S. A. de C. V. Domicilio conocido PTAR. Col. San Isidro. 35191 Cd. Lerdo, Durango, México.

² Instituto Tecnológico de La Laguna, Departamento de Ingeniería Química. Blvd. Revolución y Cza. Cuauhtémoc s/n. 27000 Torreón, Coahuila, México.

³ Campo Experimental La Laguna, INIFAP. Blvd. José Santos Valdés 1200 Pte. Col. Centro. 27440 Matamoros, Coahuila, México.

* Autor responsable (figueroa.uriel@inifap.gob.mx)

⁴ CENID-RASPA-INIFAP. Margen derecha canal Sacramento. 35140 Gómez Palacio, Durango, México.

Index words: *forage yield, plant nitrogen, nitrogen extraction.*

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (2011), en 2009 se trataron en México $88 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ($2.78 \text{ km}^3 \text{ año}^{-1}$) de agua residual doméstica, en 2029 plantas de tratamiento de agua residual (PTAR), caudal que representó solo el 42% del total colectado en sistemas de alcantarillado. Como resultado del tratamiento, se estimó una remoción de 610 mil Mg año^{-1} de demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5 , con base en peso seco), de la cual alrededor del 50% es transformada en nueva biomasa en forma de lodos residuales. En la ciudad de Lerdo, Durango, se tiene instalada una PTAR que trata el 100% del agua residual urbana; el gasto que ingresa a la planta es de 200 L s^{-1} , con una producción de 4.1 Mg día^{-1} de lodos residuales, los cuales son estabilizados por digestión aerobia. El método convencional para disponer de estos lodos residuales son los rellenos sanitarios o tiraderos a cielo abierto. Sin embargo, este método además de acortar la vida útil del relleno, tiene altos costos para las PTAR y representan un riesgo ambiental, ya que pueden contaminar el agua subterránea por lixiviación de N, provocar eutrofización de aguas superficiales por acumulación de nutrientes, acumular metales pesados en el suelo y causar riesgos a la salud humana por organismos patógenos (Figueroa *et al.*, 2008).

Cuando los lodos residuales de PTAR cumplen con la NOM-004-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT 2002), la cual establece las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para el aprovechamiento y disposición final de lodos, se les otorga el término de “biosólidos” y pueden ser aprovechados en suelos agrícolas, pastizales y bosques. Los biosólidos son materiales orgánicos ricos en nutrimentos, están compuestos principalmente por nitrógeno (N), fósforo (P) y materia orgánica (MO). El N y P son macro nutrientes esenciales para los cultivos, mientras que la MO además de aportar nutrientes, mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Cogger *et al.*, 2001; Figueroa-Viramontes y Cueto-Wong, 2003).

Como el N es el elemento más abundante en los biosólidos (después del carbono, oxígeno e hidrógeno que componen la materia orgánica), la Norma de los EUA (US-EPA 2001) señala que la dosis debe calcularse

con base en: 1) la cantidad de N en los biosólidos que es disponible para el cultivo; 2) el N residual del suelo; y 3) el N que el cultivo requiere para obtener un rendimiento potencial, minimizando a la vez la lixiviación de nitratos. Los resultados de investigaciones muestran que en general se obtienen rendimientos similares o superiores con el uso de biosólidos con respecto a fertilizantes inorgánicos, cuando se aplican dosis que cubren el requerimiento del cultivo; lo anterior se ha reportado en algodón (Figueroa *et al.*, 2008), pasto alta fescue (Cogger *et al.*, 2001), sorgo sudán (Gilmour y Skinner, 1999), sorgo forrajero (Hernández *et al.*, 2005) y maíz forrajero (Uribe *et al.*, 2003), entre otros. En avena forrajera, Flores *et al.* (2008) no observaron diferencias estadísticamente significativas en rendimiento de MS entre la aplicación de diferentes dosis de biosólidos ($10, 20$ y 30 Mg ha^{-1}), con respecto a un testigo sin aplicar; la falta de efecto de las dosis de biosólido fue atribuido a que el suelo tenía una concentración de N inorgánico de 28 mg kg^{-1} antes de la siembra. Por otro lado, Uribe *et al.* (2003) registraron un incremento de 42% en el rendimiento de avena forrajera, con la aplicación de 40 Mg ha^{-1} de biosólidos, con respecto al fertilizante en dosis de $160-60-00 \text{ kg ha}^{-1}$ de $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$.

Para estimar adecuadamente una dosis de biosólidos se debe considerar el porcentaje de N total y la tasa de mineralización de N, que es un indicador de la cantidad de N orgánico que pasa a formas inorgánicas disponibles para el cultivo. Flores *et al.* (2007) estimaron una tasa de mineralización de 20% al utilizar biosólidos en un ciclo de otoño-invierno de avena, cosechada a los 140 días. Como el proceso de mineralización depende de la temperatura ambiente, la tasa es mayor en cultivos de primavera-verano; por ejemplo, Binder *et al.* (2002) encontraron que un 40% del N total en biosólidos fue disponible en un ciclo de maíz. Un método indirecto para estimar la disponibilidad de N es mediante la técnica de equivalencia de fertilizante (EF), en la que se obtienen modelos de regresión entre las dosis de N con biosólidos (DN_{bios}) o con fertilizante (DN_{fert}) y el N extraído (N_{ext}) por el cultivo; el valor de EF es la dosis de fertilizante con el mismo valor de N_{ext} que una dosis dada de N total en biosólido; el N disponible al cultivo proveniente del biosólido (ND_{bios}) es entonces la proporción de DN_{fert} con respecto a la DN_{bios} que produce el mismo valor de N_{ext} (Motavalli *et al.*, 1999; Muñoz *et al.*, 2004; Muñoz *et al.*, 2008). Sin embargo, no se tiene información regional sobre el porcentaje de disponibilidad de N en

los biosólidos líquidos cuando se aplican en suelos agrícolas. Por lo tanto, los objetivos de la presente investigación fueron: 1) evaluar la respuesta agronómica de la avena forrajera a la aplicación de biosólidos líquidos; y 2) estimar el porcentaje de nitrógeno del biosólido que es disponible para un cultivo de avena forrajera.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en las instalaciones de la PTAR Ecosistemas de Ciudad Lerdo S.A. de C.V., ubicada en Ciudad Lerdo, Durango, con coordenadas de 25° 34' 04" N y 103° 34' 31" O. El suelo donde se realizó el experimento es de textura limo arcilloso, con un contenido de N inorgánico ($N-NH_4^+ + N-NO_3^-$) de 10.7 mg kg⁻¹ y 0.56% de materia orgánica. El agua de riego utilizada fue agua residual tratada (Cuadro 1).

Los biosólidos utilizados fueron digeridos en un tiempo promedio de 12 días y contenían 1.3% de sólidos. De acuerdo a la NOM-004-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT, 2002), son catalogados como tipo "Excelente", clase "C", lo que permite que sean aprovechados con fines de mejoramiento de suelos y usos agrícolas (Cuadro 2). El fósforo en biosólidos se analizó de acuerdo al método de la APHA (1998). El N total se analizó por el método Kjeldahl (Jhones, 2001); la determinación de nitrato y amonio se realizó por arrastre de vapor en un equipo con titulación automática (Foss modelo 2300), en presencia de óxido de magnesio y aleación de Devarda (Mulvaney, 2006). Los metales pesados se analizaron en un espectrofotómetro de absorción atómica.

Previo a la siembra, el suelo se preparó mediante un barbecho a 30 cm de profundidad, paso de rastra cruzado y nivelación con escrepa. La fecha de siembra de avena fue el 10 de diciembre de 2010 con la variedad Cuauhtémoc; el método de siembra fue al voleo, con una densidad de siembra de 120 kg ha⁻¹. Los tratamientos

Cuadro 1. Caracterización química del agua de riego empleada.

Parámetro	Valor
pH	7.56
Conductividad eléctrica (CE) ($\mu S\ cm^{-1}$)	978.00
Nitrato (mg L ⁻¹)	4.40
Fósforo total (mg L ⁻¹)	2.80
Sólidos disueltos totales (SDT) (mg L ⁻¹)	645.00

Cuadro 2. Características químicas y físicas del biosólido utilizado en las pruebas.

Parámetro	Valor
pH	7.23
CE ($\mu S\ cm^{-1}$)	1170
Nitrato (mg L ⁻¹)	71.6
Amonio (mg L ⁻¹)	4.4
Nitrógeno total (mg L ⁻¹)	369
Nitrógeno orgánico (mg L ⁻¹)	293
Fósforo total (mg L ⁻¹)	444
SDT (mg L ⁻¹)	811
Arsénico (mg kg ⁻¹)	12.1
Cadmio (mg kg ⁻¹)	< 0.50
Cromo (mg kg ⁻¹)	14.6
Cobre (mg kg ⁻¹)	266
Plomo (mg kg ⁻¹)	65
Mercurio (mg kg ⁻¹)	1.23
Níquel (mg kg ⁻¹)	11.7
Zinc (mg kg ⁻¹)	899

evaluados fueron tres dosis de N con sulfato de amonio y tres dosis de N con biosólidos, en ambos casos equivalentes al 67, 100 y 133% del requerimiento de N del cultivo (RNC) de avena forrajera, además de un testigo sin aplicación de N. El diseño experimental utilizado fue bloques al azar con tres repeticiones; la unidad experimental fue de 64 m² (8.9 × 7.2 m).

El RNC al 100% se estimó en 144 kg ha⁻¹ para un rendimiento esperado de 9 Mg ha⁻¹ (Núñez *et al.*, 2010). Al requerimiento anterior se restó el aporte del suelo y del agua de riego: el N inorgánico del suelo aportó 40 kg ha⁻¹, además de 9 kg ha⁻¹ provenientes de la mineralización de la materia orgánica del suelo (Castellanos, 2005), y 21.3 kg ha⁻¹ que aporta el agua de riego (48 cm de lámina de riego con 4.43 mg L⁻¹ de nitratos). Del total anterior (70.3 kg ha⁻¹) se asumió un 70% de eficiencia, por lo que al RNC de 100% (144 kg ha⁻¹) se le restaron 49 kg ha⁻¹, quedando la dosis de fertilizante para cubrir el 100% del RNC en 95 kg ha⁻¹. Con base en el tratamiento anterior se calcularon las dosis al 67 y 133% del RNC (Cuadro 3). La dosis de biosólidos para aportar 95 kg ha⁻¹ (100% del RNC) se estimó asumiendo una tasa de mineralización de 35% del N orgánico en el biosólido (Gilmour *et al.*, 2003) y una eficiencia de uso del N de 70 %. Es decir, el N

Cuadro 3. Tratamientos de nitrógeno en función del requerimiento del cultivo.

Requerimiento de nitrógeno	Dosis de nitrógeno	Biosólidos	Nitrógeno total en biosólidos
%	kg ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹	kg ha ⁻¹
0	0	0	0
67	63	507	187
100	95	760	280
133	126	1010	372

orgánico del biosólido aportó $293 \times 0.35 = 103 \text{ mg L}^{-1}$ (Cuadro 3), más 76 mg L^{-1} de nitrato + amonio, para un total de 179 mg L^{-1} ; del aporte anterior se consideró un 70% de eficiencia de uso de N, o sea $179 \text{ mg L}^{-1} \times 0.7 = 125 \text{ mg L}^{-1}$ de N aprovechable. La concentración anterior equivale a 0.125 kg m^{-3} , por lo que la dosis al 100% del RNC fue de $(95 \text{ kg ha}^{-1} / 0.125 \text{ kg m}^{-3}) = 760 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$; con base en la dosis anterior se calcularon los tratamientos al 67 y 133% del RNC (Cuadro 3).

Las dosis de N, tanto con fertilizante sintético como con biosólidos, se aplicaron de manera fraccionada en 20, 40, 30 y 10% de la dosis en el riego de siembra y en los siguientes tres riegos, respectivamente. Se dieron tres riegos de auxilio cada 30 días después de la fecha de siembra, con una lámina de 12 cm cada uno.

En la cosecha (120 días después de la siembra) se midió la altura de 10 plantas por parcela. Para estimar el rendimiento de forraje en verde se cosecharon dos áreas de 1 m^2 ; de la muestra anterior se tomó una submuestra de 200 g para secarse en una estufa de aire forzado a $65 \text{ }^\circ\text{C}$, hasta llegar a peso constante, para estimar el porcentaje de MS. Con el dato anterior se determinó el rendimiento de forraje en base seca. Para evaluar la concentración de N en planta, se molieron muestras y se tamizaron en una una malla de 1 mm de abertura (molino Thomas Wiley, modelo Mini-Mill, con tamiz integrado); la determinación de N fue mediante el método Kjeldahl (Jones, 2001). La extracción de N (kg ha^{-1}) se calculó para cada parcela, multiplicando el rendimiento de MS (kg ha^{-1}) por la concentración de N total en planta (kg kg^{-1}).

Para estimar la disponibilidad de N en el biosólido se utilizó el método de EF descrito en la introducción (Motavalli *et al.*, 1999; Muñoz *et al.*, 2004; Muñoz *et al.*, 2008), el cual implica análisis de regresión. Los datos experimentales se analizaron mediante ANOVA y la comparación de medias se realizó por el método de

Tukey; además, el conjunto de tratamientos con fertilizante se comparó con el de estiércol mediante análisis de contrastes ortogonales. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el programa SAS, versión 9.2 (SAS Institute, 2009).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La altura final de la planta de avena no fue estadísticamente diferente entre los tratamientos de biosólidos y fertilizante sintético sin importar la dosis (Cuadro 4), con una variación de 73 a 88 cm, comparado con 57 cm de las plantas sin fertilización nitrogenada. El rendimiento de forraje en MS, en promedio de los tratamientos con biosólido fue de 8.4 Mg ha^{-1} mientras que con fertilizante sintético fue de 6.7 Mg ha^{-1} , diferencia que tuvo una $Pr > F = 0.057$, de acuerdo al análisis de contrastes ortogonales (Cuadro 4). Los rendimientos anteriores son menores a los reportados por Flores *et al.* (2008), quienes registraron valores entre 16.6 y 17.6 Mg ha^{-1} de MS de avena forrajera, cosechada a los 140 días después de la siembra, con la aplicación de 200 a 600 kg ha^{-1} de N total con biosólidos. El menor rendimiento obtenido en el presente experimento pudo deberse a un menor ciclo de cultivo (120 dds) y al genotipo. El porcentaje de MS no fue afectado significativamente por los tratamientos, registrándose valores entre 32 y 36% (Cuadro 4), los cuales son mayores a los obtenidos en otros estudios (Sánchez *et al.*, 2011).

El tratamiento de 67% del RNC con fertilizante sintético (63 kg ha^{-1} de N) registró el valor más alto de concentración de N en planta, con 2.32%; en conjunto, la concentración de N total en los tratamientos con fertilizante sintético (2.05%) fue mayor que con biosólidos (1.46%), de acuerdo con el análisis de contrastes ortogonales (Cuadro 4). La extracción de N por el cultivo fue estadísticamente igual en todos los tratamientos; lo anterior ocurrió aun cuando el N en planta fue mayor en los tratamientos con fertilizante, y se debió a que el rendimiento de forraje en MS tendió a ser más alto en los tratamientos con biosólidos (Cuadro 4). A pesar de que la concentración de N en planta fue menor con biosólidos, el valor de 1.46% del N total equivale a 9.1% de proteína cruda (PC) en el forraje, cuyo valor es adecuado para la etapa de corte en que se evaluó el rendimiento (Colin *et al.*, 2009). El valor de PC en cereales forrajeros como la avena,

Cuadro 4. Altura de planta, rendimiento, materia seca y nitrógeno en planta, en respuesta a dosis de biosólidos y fertilizantes.

	Dosis de N RNC	Altura final	Rendimiento MS	Materia seca	Nitrógeno en planta	Nitrógeno extraído
	%	cm	Mg ha ⁻¹	%	% (MS)	kg ha ⁻¹
Biosólidos						
	67	77.66 a	7.5 ab	35.7 ns	1.44 b	107.6 ns
	100	73.00 ab	7.1 ab	35.3	1.53 b	103.2
	133	88.33 a	10.5 a	33.7	1.42 b	149.6
Fertilizante						
	67	75.00 ab	5.3 b	32.0	2.32 a	122.7
	100	77.66 a	6.1 ab	32.0	1.90 ab	120.2
	133	83.00 a	8.6 ab	31.7	1.94 ab	167.9
Testigo	0	57.66 b	4.4 b	32.0	1.86 ab	82.6
Contraste ortogonal						
Biosólido contra fertilizante (Pr > F)		0.737	0.057	0.19	0.001	0.319

RNC = requerimiento de nitrógeno del cultivo; MS = materia seca. Letras distintas en la misma hilera indican diferencias significativas, de acuerdo con Tukey ($P < 0.05$).

disminuye conforme el ciclo de cultivo se alarga; así, Flores *et al.* (2008) obtuvieron 5.7% de PC (0.91% de N total) en avena cosechada a los 140 dds.

La extracción de N mostró un incremento lineal en función del N aplicado (Figura 1), tanto cuando se aplicó fertilizante sintético ($r^2 = 0.87$) como cuando se aplicó

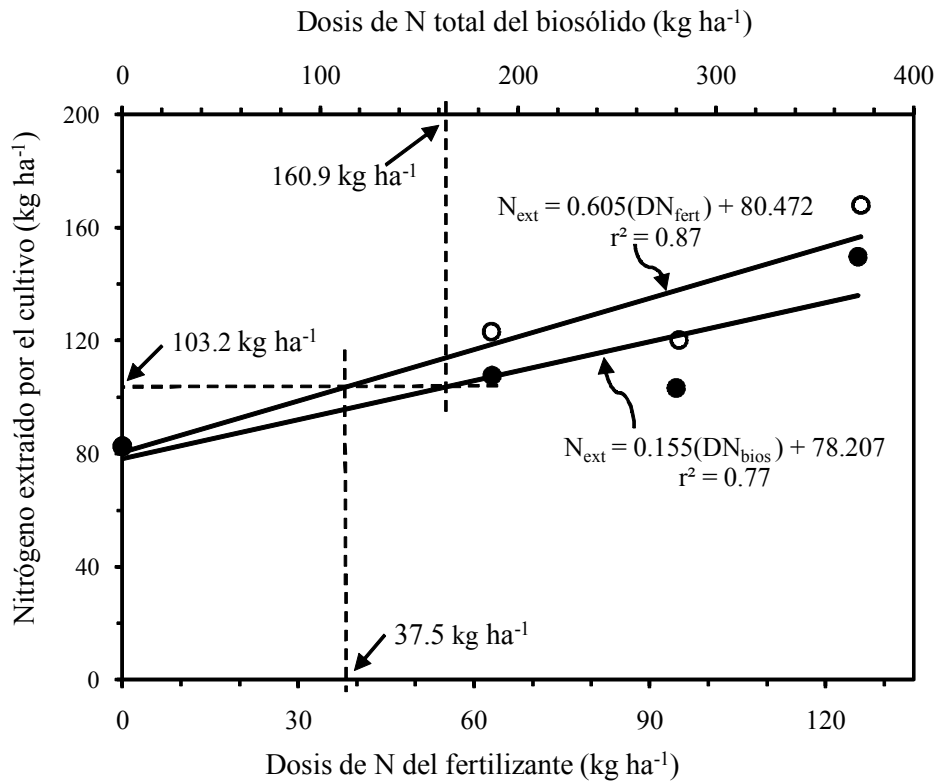


Figura 1. Nitrógeno extraído por avena forrajera fertilizada con diferentes dosis de nitrógeno de dos fuentes: fertilizante sintético y biosólido.

biosólido ($r^2 = 0.77$), considerando todo el rango de dosis evaluadas. Al considerar el N_{ext} en el tratamiento de 100% del RNC con biosólidos (103.2 kg ha^{-1} , Cuadro 4), se observó que dicho valor de N_{ext} corresponde a una dosis de N con biosólidos (DN_{bios}) de 160.9 kg ha^{-1} (Figura 1), estimada con la ecuación de regresión. El mismo valor de N_{ext} se obtuvo con una dosis equivalente de fertilizante (EF) de 37.5 kg ha^{-1} . En el caso del fertilizante, el valor de N_{ext} fue menor que la dosis aplicada porque parte del N_{ext} proviene del suelo y del agua de riego; resultados similares han sido observados en otros estudios (Figuroa *et al.*, 2010). Con los valores de equivalencia de fertilizante se calculó el valor de N del biosólido disponible para el cultivo (ND_{bios}):

$$NDC_{\text{bios}} = 37.5 / 160.9 * 100 = 23.3\%$$

El valor de ND_{bios} está relacionado con la tasa de mineralización; en general, la tasa de mineralización de abonos orgánicos, como biosólidos, estiércoles o compostas, está en función de la temperatura, con valores más altos durante primavera y verano, mientras que en otoño e invierno la magnitud es más baja (Binder *et al.* 2002; Barbarick e Ippolito 2007). El valor encontrado en el presente estudio coincide con Barbarick e Ippolito (2007), quienes en un estudio de 12 años encontraron una tasa de mineralización de N en biosólidos entre 21 y 33% en trigo sembrado en septiembre. También en avena, Flores *et al.* (2007) registraron 20% de mineralización de N en biosólidos. En cultivos de primavera-verano como el maíz, Binder *et al.* (2002) estimaron una disponibilidad de N para el cultivo de 40%. La estimación del N disponible de abonos orgánicos como de biosólidos, es importante para el cálculo de dosis de aplicación mediante el método de balance utilizado en el presente estudio, evitando así aplicaciones excesivas y riesgos de contaminación.

CONCLUSIONES

- Con base en los resultados obtenidos, es posible sustituir fertilizantes convencionales por el uso de biosólidos. La concentración de N en el forraje cosechado fue menor en los tratamientos con biosólidos, aunque el contenido de proteína fue adecuado para la etapa de corte en la que se evaluó el rendimiento. La aplicación de N por medio de dos fuentes (fertilizante y biosólidos), generó un aumento lineal del rendimiento de MS en función de la dosis de N aplicada. Con base en el método de

equivalencia de fertilizante, la disponibilidad del N total aplicado en el biosólido para el cultivo fue de 23.3%.

- Los nutrientes contenidos en los biosólidos pueden representar un riesgo de contaminación potencial a los cuerpos de agua superficial o subterránea cuando se aplican en exceso. Sin embargo, la Norma Mexicana (NOM-004-2001-SEMARNAT) no señala ningún criterio para estimar dosis de aplicación con base en el requerimiento del cultivo, que minimicen el riesgo anterior. Por lo tanto, es recomendable seguir “buenas prácticas de manejo” en el uso de biosólidos y estimar las dosis de aplicación mediante un balance de N como el descrito en el presente estudio. De esta manera se puede sustituir el uso de fertilizante y se disminuye el impacto al ambiente.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Planta de Tratamiento de Agua Residual Ecosistema de Ciudad Lerdo S.A. de C.V. y a la compañía Tecnología Intercontinental S.A. de C.V., por facilitar los medios para la realización de esta investigación, a su personal por toda la ayuda brindada durante la realización del proyecto y a la Ing. Magali López Calderón por su colaboración en los trabajos de laboratorio.

LITERATURA CITADA

- APHA (American Public Health Association). 1998. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association. Washington, DC, USA.
- Barbarick, K. A. and J. A. Ippolito. 2007. Nutrient assessment of a dryland wheat agroecosystem after 12 years of biosolids applications. *Agron. J.* 99: 715-722.
- Binder, D. L., A. Dobermann, D. H. Sander, and K. G. Cassman. 2002. Biosolids as nitrogen source for irrigated maize and rainfed sorghum. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 531-543.
- Castellanos-Ramos, J. Z., J. A. Cueto-Wong, J. Macías-Cervantes, J. R. Salinas-García y L. M. Tapia-Vargas. 2005. La fertilización en los cultivos de maíz, sorgo y trigo en México. Folleto técnico núm. 1. Campo Experimental Bajío. INIFAP. Celaya, Guanajuato, México.
- Cogger, C. G., A. I. Bary, S. C. Fransen, and D. M. Sullivan. 2001. Seven years of biosolids versus inorganic nitrogen applications to tall fescue. *J. Environ. Qual.* 30: 2188-2194.
- Colín-Rico, M., V. M. Zamora-Villa, M. A. Torres-Tapia y M. A. Jaramillo-Sánchez. 2009. Producción y valor nutritivo de genotipos imberbes de cebada forrajera en la Región Lagunera de México. *Téc. Pecu. Méx.* 47: 27-40.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2011. Estadísticas del agua en México, estadística 2011. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D. F.

- Figuerola-Viramontes, U. y J. A. Cueto-Wong. 2003. Uso sustentable del suelo y abonos orgánicos. pp. 1-21. In: E. Salazar S., M. Fortis H. y A. Vázquez A. (eds.). Abonos orgánicos y plasticultura. FAZ-UJED, SMCS. Gómez Palacio, Dgo. México.
- Figuerola-Viramontes, U., M. A. Flores-Ortiz, M. Palomo-Rodríguez, B. Corral-Díaz y J. P. Flores-Margez. 2008. Uso de biosólidos estabilizados por digestión anaeróbica como fertilizante orgánico en algodón. *Agrofaz* 8: 1-10.
- Figuerola-Viramontes, U., J. A. Cueto-Wong, J. A. Delgado, G. Núñez-Hernández, D. G. Reta-Sánchez, H. M. Quiroga-Garza, R. Faz-Contreras y J. L. Márquez-Rojas. 2010. Estiércol de bovino lechero sobre el rendimiento y recuperación aparente de nitrógeno en maíz forrajero. *Terra Latinoamericana* 28: 361-369.
- Flores-Margez, J. P., B. Corral-Díaz y G. Sapien-Mediano. 2007. Mineralización de nitrógeno de biosólidos estabilizados con cal en suelos agrícolas. *Terra Latinoamericana* 25: 409-417.
- Flores-Margez, J. P., G. Sapien-Mediano, B. Corral-Díaz y U. Figuerola-Viramontes. 2008. Calidad nutricional de avena forrajera en suelos tratados con biosólidos y agua residual en el Valle de Juárez, Chihuahua. *Cienc. Frontera* 6: 105-116.
- Gilmour, J. T. and V. Skinner. 1999. Predicting plant available N in land-applied biosolids. *J. Environ. Qual.* 28: 1122-1126.
- Gilmour, J. T., C. G. Cogger, L. W. Jacobs, G. K. Evanylo, and D. M. Sullivan. 2003. Decomposition and plant-available nitrogen in biosolids: Laboratory studies, field studies, and computer simulation. *J. Environ. Qual.* 32: 1498-1507.
- Hernández-Herrera, J. M., E. Olivares-Sáenz, I. Villanueva-Fierro, H. Rodríguez-Fuentes. R. Vázquez-Alvarado y J. F. Pissani-Zúñiga. 2005. Aplicación de lodos residuales, estiércol bovino y fertilizante químico en el cultivo de sorgo forrajero (*Sorghum vulgare* Pers.). *Rev. Int. Contam. Ambient.* 21: 31-36.
- Jones, J. B. 2001. Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis. CRC Press. New York, NY, USA.
- Mendoza, C., N. W. Assadian, and W. Lindemann. 2006. The fate of nitrogen in a moderately alkaline and calcareous soil amended with biosolids and urea. *Chemosphere* 63: 1933-1941.
- Motavalli, P. P., K. A. Kelling, and J. C. Converse. 1989. First-year nutrient availability from injected dairy manure. *J. Environ. Qual.* 18: 180-185.
- Mulvaney, R. L. 1996. Nitrogen - inorganic forms. pp. 1123-1184. In: D. L. Sparks (ed.). *Methods of soil analysis, Part 3. Chemical methods.* Soil Science Society of America Book Series Num. 5. Madison, WI, USA.
- Muñoz, G. R., K. A. Kelling, K. E. Rylant, and J. Zhu. 2008. Field evaluation of nitrogen availability from fresh and composted manure. *J. Environ. Qual.* 37: 944-955.
- 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.
- Núñez-Hernández, G., J. A. Payan-García, A. Pena-Ramos, F. González-Castañeda, O. Ruiz-Barrera y C. Arzola-Álvarez. 2010. Caracterización agronómica y nutricional del forraje de variedades de especies anuales en la región norte de México. *Rev. Mex. Cienc. Pecu.* 1: 85-98.
- Sánchez-Duarte, J. I., G. Núñez-Hernández, E. Ochoa-Martínez, K. Rodríguez-Hernández, U. Figuerola-Viramontes, M. Gómez-Reinoso y Z. Morales-Fabián. 2011. Rendimiento, proteína cruda y eficiencias en el uso de agua y nitrógeno en cereales con diferente tipo de fertilización y sistema de riego. *Agrofaz* 11: 59-65.
- SAS Institute. 2009. SAS-STAT user's guide. SAS Institute. Cary, NC, USA.
- NOM-004-SEMARNAT-2002 (Norma Oficial Mexicana). 2002. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Diario Oficial de la Federación del 24 de Septiembre de 2002. México, D. F.
- Uribe-Montes, H. R., N. Chávez-Sánchez, G. Orozco-Hernández y M. S. Espino-Valdez. 2003. Biosólidos digeridos anaeróbicamente en la producción de maíz forrajero. *Agric. Téc. Méx.* 29: 25-34.
- Uribe-Montes, H. R., N. Chávez-Sánchez y G. Orozco-Hernández. 2009. Uso de biosólidos como fertilizante en cultivos forrajeros y algodón. pp. 99-131. In: E. Salazar S., M. Fortis H., A. Vázquez A. y C. Vázquez V. (eds.). *Agricultura orgánica.* Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C., Facultad de Agricultura y Zootecnia UJED. Gómez Palacio, Durango, México.
- US-EPA (United States Environmental Protection Agency). 2001. Standards for the use or disposal of Sewage Sludge. 40 CFR Ch. 1 Part 503. Washington, D.C. <http://www.epa.gov/region8/water/biosolids/pdf/40CFR503-July-2001.pdf>. (Consulta: junio 7, 2012).