

Inhibidor de la nitrificación DMPP en la fertilización del maíz forrajero en la Comarca Lagunera

Jorge Luis García Sepúlveda¹
José Antonio Cueto Wong^{2§}
Uriel Figueroa Viramontes²
David Guadalupe Reta Sánchez²

¹Facultad de Agricultura y Zootecnia-Universidad Juárez de Durango. Gómez Palacio, Durango. México. CP. 35000. Tel. 871 7118918. (dep.faz.ujed@hotmail.com). ²Campo Experimental La Laguna-INIFAP. Boulevard José Santos Valdés núm. 1200, Centro, Matamoros, Coahuila. CP. 27440. Tel. 871 1823177, 1823178. Fax. 871 1823176.

§Autor para correspondencia: cueto.jose@inifap.gob.mx.

Resumen

La Comarca Lagunera produce más de 2 433 millones de litros de leche anuales provenientes de un hato de más de 465 mil cabezas de ganado bovino lechero. La contaminación de aguas subterráneas por nitratos y la emisión de gases de efecto invernadero (NO₂) son los principales problemas medio ambientales más graves en la agricultura intensiva. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de fertilizantes con inhibidor de la nitrificación sobre el rendimiento, calidad forrajera y concentración nutrimental foliar. La investigación se realizó en 2017 en el Campo Experimental La Laguna (INIFAP). Se evaluaron cinco programas de fertilización con y sin inhibidor de nitrificación DMPP más un testigo regional con fertilización convencional. El tratamiento que recibió 240 kg N ha⁻¹ (testigo regional) produjo el más alto rendimiento en forraje verde y materia seca (41.5 t ha⁻¹ y 13.88 t MS ha⁻¹ respectivamente). Sin embargo, estos valores fueron estadísticamente iguales a la dosis de 120 kg N ha⁻¹ + IN DMPP. El mayor rendimiento de grano (6.05 t ha⁻¹) se logró con el tratamiento de 240 kg de N ha⁻¹ + IN DMPP. La mayor concentración de N en el follaje (2.43 y 2.32%) se logró con las dosis más altas de N (360 kg ha⁻¹) sin IN DMPP y con el IN MPP respectivamente. En cuanto a la concentración nutrimental foliar de Mg, S, Fe y Zn no hubo diferencia significativa entre tratamientos. Los análisis de calidad forrajera indican que el mayor contenido de proteína cruda (8.95%) se registró con el tratamiento de 360 kg de N ha⁻¹ + IN DMPP. Se concluye que los fertilizantes con inhibidor de la nitrificación pueden reducir las dosis de N en el maíz forrajero.

Palabras clave: concentración nutrimental foliar, DMPP, inhibidor de la nitrificación.

Recibido: junio de 2019

Aceptado: octubre de 2019

Introducción

La tasa de crecimiento de la población mundial (8.5 mil millones en 2030) genera una gran demanda de proteína animal de alta calidad, la producción de leche de vaca es la fuente principal para satisfacer esta necesidad. Sin embargo, el enfoque en el aumento de la productividad del GBL ha resultado en un inadecuado uso de insumos agrícolas, especialmente fertilizantes nitrogenados y pesticidas que al ser manejados inadecuadamente e ineficazmente se ‘filtraran’ al medio ambiente afectando la calidad del agua, el suelo y la atmósfera (Groot y Van’t Hooft, 2016).

En México La Comarca Lagunera es la principal cuenca lechera del país. Produce más de 2 433 millones de litros de leche anuales provenientes de un hato de más de 465 mil cabezas de ganado bovino lechero (GBL) (SIAP, 2017a, 2017b). El hato lechero de la región demanda altas cantidades de forraje de calidad durante todo el año, por lo cual, en 2017 se establecieron 55 000 ha de maíz forrajero (35 000 ha de riego por gravedad y 20 000 ha de bombeo) en dos ciclos agrícolas, primavera-verano y otoño-invierno. El maíz forrajero es el principal cultivo en este tipo de sistemas de producción. El silo de este forraje presenta una alta concentración de carbohidratos solubles, es una importante fuente de energía y tiene una alta degradación en el rumen del animal (NRC, 2001).

Altos rendimientos y aceptable calidad forrajera están relacionados con factores bióticos, abióticos y con el suministro de elementos nutritivos a la planta. El nitrógeno (N) es el elemento químico que más se relaciona con el rendimiento, desarrollo y calidad. Además, ejerce una fuerte influencia en la composición química del grano especialmente en el contenido de aminoácidos lo cual se traduce en una mejor calidad forrajera (Szymanek y Piasecki, 2013). Los compuestos inorgánicos del N (N-NO_3^- y N-NH_4^+) constituyen menos de 5% del nitrógeno total en el suelo y son las principales formas químicas en que el N es absorbido por las plantas.

Una de las principales características de los suelos en zonas áridas como es La Comarca Lagunera es su bajo contenido de materia orgánica (MO %) y N disponible (N-NO_3^- y N-NH_4^+), por lo que todos los cultivos requieren de la aplicación de fertilizantes orgánicos e inorgánicos para poder mantener una condición nutricional óptima que logre proyectar el máximo potencial de rendimiento y calidad de los híbridos utilizados (Cueto *et al.*, 2006).

Cuando los fertilizantes nitrogenados son aplicados al suelo son absorbidos directamente por las plantas o transformados en diversas formas químicas en el proceso de oxidación. Al hacer aplicaciones sin criterios técnicos basados en la demanda del cultivo, rendimiento esperado y suministro (oferta) del suelo se tiende a sobrefertilizar los cultivos (Figuroa *et al.*, 2010). El N (N-NO_3^-) que no es absorbido por las plantas se pierde en forma iónica o gaseosa (NO_x) en procesos químicos y bacteriológicos como la lixiviación, volatilización y desnitrificación (Wei *et al.*, 2014).

La contaminación de aguas subterráneas por (N-NO_3^-) de origen agrícola es uno de los problemas medio ambientales y de salud humana más graves en la agricultura intensiva moderna. Puede ocasionar graves consecuencias para la salud pública especialmente en ciertos grupos poblacionales como, lactantes y mujeres embarazadas. Este problema ambiental es derivado de un exceso en la aplicación de fertilizantes nitrogenados y la inadecuada disposición de estiércol en las explotaciones lecheras y ganaderas (Fernández y Soria, 2012).

De acuerdo a estimaciones actuales en México, las actividades agropecuarias son la tercera causa de generación de gases de efecto invernadero (GEI) con una contribución de 12% de las emisiones en el País. La mayor parte de estas emisiones se generan por el uso de fertilizantes nitrogenados, fermentación entérica (metano generado en la digestión de rumiantes y monogástricos) y el manejo del estiércol (Saynes *et al.*, 2016).

Al agregar IN como el DMPP a los fertilizantes nitrogenados es posible reducir la tasa de nitrificación en la que el amonio ($N-NH_4^+$) es transformado a nitrato ($N-NO_3^-$) manteniendo una mayor proporción del fertilizante aplicado en el suelo, disminuyendo de esta manera pérdidas de N por lixiviación y desnitrificación (Hu *et al.*, 2013). Los IN son altamente selectivos, ya que sólo actúan sobre los microorganismos nitrificantes (*Nitrosomas* spp. y *Nitrobacter* spp.) y no sobre otros tipos de microorganismos del suelo. Los IN resultan muy efectivos en suelos arenosos, para evitar la lixiviación de $N-NO_3^-$ y en suelos saturados, para evitar la desnitrificación (NO_x).

La tasa de nitrificación puede ser controlada manteniendo al N en forma de ($N-NH_4^+$), el cual es retenido por el complejo arcilloso del suelo debido a su carga positiva, evitando así la lixiviación. Los inhibidores de la nitrificación (IN) son compuestos con efecto bacteriostático que retrasan la formación de $N-NO_3^-$ al suprimir la actividad de las bacterias del género *Nitrosomas* spp. El objetivo de la presente investigación fue evaluar un fertilizante con el IN DMPP (3,4 dimetil pirazol fosfato) en el rendimiento de forraje verde, seco y grano, calidad forrajera y concentración nutrimental.

Materiales y métodos

Descripción del sitio experimental

El experimento se llevó a cabo en el ciclo de verano de 2017 en el lote 13 del Campo Experimental de La Laguna (CELALA) perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) localizado en Matamoros Coahuila, México. El municipio de Matamoros Coahuila está localizado en el suroeste del estado, en las coordenadas $103^\circ 13' 4''$ longitud oeste y $25^\circ 31' 41''$ latitud norte, su altura es de 1 110 msnm tiene una precipitación anual promedio de 258 mm.

Previo a la siembra se llevó a cabo un muestreo para caracterizar física y químicamente el suelo. Se tomaron 6 muestras al azar a una profundidad de 0.30 m, se mezclaron estas submuestras para formar una muestra compuesta la cual se envió al laboratorio de suelos del Campo Experimental (CELALA) para su posterior análisis. Las características físicas y químicas del suelo del sitio experimental se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Principales características del suelo del sitio experimental.

Propiedad	Unidades	Valor
Arena	(%)	46.9
Limo	(%)	21.8
Arcilla	(%)	31.3
Clase textural	--	Franco arcilloso

Propiedad	Unidades	Valor
pH		8.4
Conductividad eléctrica	dS m ⁻¹	0.52
Materia orgánica	(%)	1.1
Nitrógeno nítrico	mg kg ⁻¹ de suelo de N-NO ₃	9.4
Nitrógeno amoniacal	mg kg ⁻¹ de suelo de N-NH ₄	12.7
Fósforo disponible	mg kg ⁻¹ de suelo de P	12.9
Zinc (Zn ²⁺)	mg kg ⁻¹	0.72

Se trata de un suelo franco con tendencia a suelo arenoso (47%), pH alcalino, no salino, bajo en materia orgánica, bajo en fósforo y nitrógeno disponible.

Tratamientos y diseño experimental

Se utilizó un diseño de bloques completamente al azar, se evaluaron seis tratamientos con cuatro repeticiones por tratamiento. Las parcelas experimentales tuvieron un área de 60.8 m² (10 m de largo por 6.08 m de ancho). Dentro de cada parcela se formaron ocho surcos a una distancia de 0.76 m entre cada uno, refiere el Cuadro 2.

Cuadro 2. Tratamientos evaluados.

Tratamiento	Producto comercial	kg N ha ⁻¹	kg fertilizante ha ⁻¹
1	Urea convencional (46% N)	120	261
2 ²	Urea convencional (46% N)	240	522
3	Urea convencional (46% N)	360	782
4 ¹	Novatec solub [®] (45% N)	120	267
5 ¹	Novatec solub [®] (45% N)	240	534
6 ¹	Novatec solub [®] (45% N)	360	800

¹= tratamientos con el IN DMPP (3,4 dimetil, pirazol fosfato); ²= testigo regional.

Variables evaluadas

Se evaluaron cinco variables: rendimiento de forraje verde (FV), forraje seco (FS) y grano. Concentración nutrimental foliar (CNF) y calidad forrajera (bromatológicos).

Análisis estadístico de los datos

El análisis estadístico de los datos se realizó por medio del software InfoStat[®] versión estudiantil (vIS 11-09-017). Cuando hubo diferencia significativa entre tratamientos se realizó una prueba de comparación de medias por diferencia mínima significativa (DMS).

Preparación del terreno

Previo al experimento en el total del área experimental fue establecido un cultivo de avena forrajera sin fertilizar con el objetivo de ‘blanquear’ el suelo. Se niveló el terreno con equipo Laser Plane® para eficientar los riegos. Se realizó el trazado de parcelas, bordos y caminos. El terreno se barbecho con arado vertical, se hicieron dos pasos de rastra cruzada para posteriormente formar los bordos de las parcelas y los bordos de soporte para el sistema de riego por multicompuertas.

Siembra y fertilización

La siembra se realizó en seco el día 28 de junio de 2017 con una sembradora neumática de precisión Gaspardo®. El híbrido sembrado fue Pioneer® P3966W el cual es un maíz de grano blanco, doble propósito y resistente al acame. Un día antes de la siembra se trató la semilla con 500 ml de Tiametoxam (350 g L⁻¹ de ia) por cada 100 kg de semilla para evitar daños a la semilla por el ataque de plagas del suelo. La densidad de siembra fue de 105 000 plantas ha⁻¹ (8 semillas por metro y 0.76 cm de distancia entre surcos).

La fertilización nitrogenada de todos los tratamientos se fraccionó en dos, 50% al momento de la siembra y 50% previo al primer riego de auxilio. La fertilización con fósforo (P) fue igual en todos los tratamientos, consistió en 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ utilizando ácido fosfórico (H₃PO₄, 52% de P₂O₅) como fuente de P. A los 28 días después de siembra (dds) se realizó un cultivo o aporque con vertederas con el fin de romper la ‘costra’ del suelo previo a la segunda fertilización (50% restante) y el primer riego de auxilio.

Riegos

La lámina de riego (LR) total fue de 89 cm. Inmediatamente después de la siembra y fertilización se aplicó el riego de siembra mediante el sistema de riego por multicompuertas, se realizó un sobre riego a los 7 dds para ayudar a la semilla a emerger y cinco riegos de auxilio como se muestran en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Frecuencia de riegos, periodicidad y lámina de riego.

Tipo de riego	Fecha	Días después de siembra (dds)	Lámina de riego aplicada (cm)	Lámina de riego acumulada (cm)
Riego de siembra	28 de junio	0	18	18
Sobre riego	05 de julio	7	09	27
1 ^{er} Auxilio	26 de julio	28	12	39
2 ^{do} Auxilio	09 de agosto	42	14	53
3 ^{er} Auxilio	25 de agosto	58	12	65
4 ^{to} Auxilio	08 de septiembre	72	13	78
5 ^{to} Auxilio	26 de septiembre	90	11	89

Control de plagas y maleza

Se realizaron periódicamente, en especial en los periodos críticos (emergencia, floración y llenado de grano) inspecciones y monitoreo de plagas en las parcelas. La plaga que se presentó con mayor incidencia fue el gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) observándose presencia y daños desde la emergencia de las plantas. Se realizó una aplicación ‘salereada’ de Permetrina (0.4% GR) granulada aplicada directamente al cogollo cuando el cultivo tenía 13 dds, posteriormente se realizaron tres aplicaciones de Clorpirifós Etil 44.5% CE. para el control de la misma plaga a los 21, 31 y 59 dds., las aplicaciones se realizaron con aspersora de mochila y la dosis aplicada fue de 500 mL ha⁻¹.

Con menor incidencia se presentó: gusano elotero (*Helicoverpa Zea*), araña roja (*Tetranychus urticae*) y diabrotica (*Diabrotica* spp.). Se realizó una aplicación de Betacyflutrim (8.4%) + Imidacloprid (19.6%) a una dosis de 500 mL ha⁻¹ para el control de gusano elotero y diabrotica a los 50 dds. Para el control de araña roja se llevó a cabo una aplicación de Abamectina (18 g ia L⁻¹) a una dosis de 1 000 mL ha⁻¹ con cañón de fumigación de mochila.

El manejo y control de maleza fue principalmente manual con azadón. Sin embargo, se realizaron dos aplicaciones de herbicidas. La primera aplicación se realizó a los 34 dds, el producto utilizado fue Dimetil amina (2,4 D 49.4% S) para el control de hojas anchas a una dosis de 1 L del producto en solución en 100 L de agua. La segunda aplicación se realizó a los 51 dds, el producto utilizado fue nicosulfurón (4.21%) para el control de hojas angostas en especial zacate Johnson (*Sorghum halepense*) y hojas anchas, principalmente quelite (*Amaranthus hybridus*).

Muestreo de suelo

Se realizó un muestreo de suelo previo a la siembra. El muestreo se llevó a cabo por medio de una barrena de caja. Se realizaron cinco muestras al azar dentro del sitio experimental a 30 cm de profundidad para obtener una muestra compuesta, la muestra se extendió sobre la bolsa de cartón y se dejó secar al ambiente. Posteriormente, la muestra se molió hasta pasar por un tamiz de 2 mm de apertura. En laboratorio de suelos del Campo Experimental de La Laguna se determinó: textura, conductividad eléctrica, pH y la concentración de nitrógeno nítrico, amoniacal y nitrógeno total inorgánico en extracto obtenido de KCl 1M y destilado por arrastre de vapor con MgO y aleación de Devarda (Cueto *et al.*, 2018).

Muestreo foliar

A los 65 dds (1 de septiembre) cuando el cultivo estaba en etapa de floración se llevó a cabo el muestreo foliar. Se tomaron 20 plantas al azar dentro de cada parcela útil, se tomaron dos hojas opuestas a la mazorca de cada planta la cual por convención es utilizada para la evaluación del estado nutricional del maíz. Las muestras se secaron en estufa de aire forzado a una temperatura de 65 °C hasta alcanzar peso constante. El N se analizó por el método de Kjeldahl. P por el método molibdato-vanadato en espectrofotómetro de rango visible. K, Mg, Fe, Cu, Mn y Zn se analizaron por absorción atómica. El total de las muestras fueron analizadas en 2018 en el Laboratorio Nacional de Fertilidad de Suelos y Nutrición Vegetal del Campo Experimental Bajío.

Cosecha

Cuando el cultivo tenía 104 dds (11 de octubre de 2017), un contenido de materia seca aproximado al 33% y el grano se encontraba en estado fenológico conocido como un tercio de la línea de leche, se llevó a cabo la cosecha del experimento. En cada una de las parcelas se cosecharon los cuatro surcos centrales, se dejó un metro lineal en cada cabecera para eliminar el efecto orilla de tal manera que la parcela útil tuvo una superficie de 24.32 m².

Después de sacar la cosecha a la báscula y pesar las plantas cosechadas en la parcela útil, se contabilizaron las plantas totales, plantas normales y plantas horas. Se tomaron cinco plantas de cada parcela las cuales se etiquetaron y pesaron en el momento. Posteriormente, las plantas fueron enviadas al laboratorio del campo experimental de La Laguna donde se secaron en estufa a 65 °C hasta lograr un peso constante, con esta información se calculó el porcentaje de materia seca. $\text{materia seca (\%)} = \text{peso seco/peso fresco} \times 100$.

Resultados y discusión

Rendimiento de forraje verde y materia seca

Los resultados de los análisis estadísticos en los tratamientos evaluados mostraron diferencias solo con respecto al tratamiento de 120 kg N ha⁻¹ con urea convencional sin IN DMPP. El tratamiento que recibió 240 kg N ha⁻¹ en forma de urea convencional sin IN DMPP (testigo regional), fue el que produjo el más alto rendimiento de forraje verde (41.5 t ha⁻¹) y materia seca (13.88 t ha⁻¹). Sin embargo, fue estadísticamente igual al tratamiento que solo recibió 120 kg N ha⁻¹ + IN DMPP. El efecto del 3,4-dimetilpirazol fosfato (DMPP) en la eficiencia de la fertilización amoniacal en naranjo dulce y encontraron que el tratamiento suplementado con IN DMPP mejoró la eficiencia de la fertilización nitrogenada para las variables rendimiento y concentración foliar de nitrógeno.

Nelson y Huber (2001) indican que el beneficio potencial de la aplicación de IN depende de factores sitio específicos como el tipo de suelo, clima, prácticas culturales y programas de manejo de N y que la mayor probabilidad de respuesta en rendimiento ocurre en suelos excesivamente o pobremente drenados debido a las pérdidas de N por lixiviación y desnitrificación respectivamente. Los resultados y la comparación de medias por diferencia mínima significativa se muestran en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Rendimiento de forraje verde.

Tratamiento	Forraje verde (t ha ⁻¹)	Materia seca (%)
240 kg N ha ⁻¹ urea convencional	41.5 A	33.39 A
360 kg N ha ⁻¹ urea convencional	39.8 A	33.22 A
¹ 360 kg N ha ⁻¹ Novatec Solub (45%N)	39.71 A	31.15 A
¹ 240 kg N ha ⁻¹ Novatec Solub (45%N)	39.49 A	32.53 A
¹ 120 kg N ha ⁻¹ Novatec Solub (45%N)	35.85 A	33.51 A
120 kg N ha ⁻¹ urea convencional	29.2 B	33.36 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$); ¹= fertilizante con el IN DMPP.

Rendimiento de forraje seco (FS)

Debido a que el cálculo del rendimiento de FS se obtiene multiplicando el rendimiento de forraje verde por la materia seca entre 100, los resultados son similares a los de FV. El rendimiento de FS fue estadísticamente igual entre el testigo regional (240 kg N ha⁻¹ UC) y los tratamientos con la dosis de (240 kg N ha⁻¹ + IN DMPP) y alta (360 kg de N ha⁻¹ UC y + DMPP). Estos resultados concuerdan con los datos de Cueto *et al.* (2006) quienes en 1998 en una investigación en maíz forrajero sobre el efecto de la densidad de población y fertilización nitrogenada encontraron que los mejores rendimientos de FS se alcanzaron con la dosis de 250 y 375 kg de N ha⁻¹.

Cabe destacar, que solo existe una diferencia de 1.89 t ha⁻¹ de MS entre el testigo regional (240 kg N ha⁻¹) y el tratamiento con IN DMPP de 120 kg ha⁻¹. Barrientos (2016) realizó una investigación sobre el efecto del Inhibidor de la nitrificación DMPP en la dinámica del N, rendimiento y calidad de maíz forrajero encontrando que el mejor rendimiento se obtuvo con la dosis de 244 kg de N ha⁻¹ con el IN DMPP y aplicaciones foliares de micronutrientes y compuestos biológicos.

Cabe destacar, que hubo una diferencia de 2.2 t ha⁻¹ entre el tratamiento con la dosis más baja de N (120 kg ha⁻¹) con el IN DMPP en comparación con el tratamiento con la misma dosis de N, pero sin el IN DMPP. Los resultados del análisis estadístico y la prueba de comparación de medias se muestran en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Rendimiento de forraje seco.

Tratamiento	Forraje seco (t ha ⁻¹)	Materia seca (%)
240 kg N ha ⁻¹ urea convencional	13.88 A	33.39 A
360 kg N ha ⁻¹ urea convencional	13.22 A	33.22 A
¹ 240 kg N ha ⁻¹ Novatec solub (45%N)	12.82 A	31.15 A
¹ 360 kg N ha ⁻¹ Novatec solub (45%N)	12.4 A	32.53 A
¹ 120 kg N ha ⁻¹ Novatec solub (45%N)	11.99 A B	33.51 A
120 kg N ha ⁻¹ urea convencional	9.78 B	33.36 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$); ¹= fertilizante con el IN DMPP.

Rendimiento de grano

El tratamiento basado en 240 kg N ha⁻¹ + IN DMPP fue el que obtuvo el mayor rendimiento (6.05 t ha⁻¹) superando al testigo regional (240 kg N ha⁻¹ sin IN DMPP) en 550 kg ha⁻¹. El aumento en el rendimiento de grano al utilizar fertilizantes con el IN DMPP concuerda con los resultados obtenidos por Pasda *et al.* (2001) quienes evaluaron el efecto del IN DMPP en la calidad y el rendimiento de trigo, maíz, papa y remolacha azucarera. Estos autores señalan que al utilizar el IN DMPP y fraccionarlo en dos aplicaciones en el cultivo de trigo de invierno lograron aumentar hasta 250 kg ha⁻¹ el rendimiento del grano.

Resultados similares fueron obtenidos por Linares *et al.* (2012) quienes evaluaron el efecto de la fertilización con urea convencional tratada con IN el estado de Carabobo, Venezuela. Encontraron que en los tratamientos donde se agregó IN DMPP obtuvieron diferencias de hasta 1.2 t ha⁻¹ con respecto a los demás, observados en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Rendimiento de grano.

Tratamiento	Rendimiento de grano (t ha ⁻¹)
¹ 240 kg N ha ⁻¹ Novatec solub (45%N)	6.05 A
240 kg N ha ⁻¹ urea convencional	5.5 A B
¹ 120 kg N ha ⁻¹ Novatec solub (45%N)	5 A B
¹ 360 kg N ha ⁻¹ Novatec solub (45%N)	4.88 A B
360 kg N ha ⁻¹ urea convencional	3.95 B C
120 kg N ha ⁻¹ urea convencional	2.83 C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$); ¹= Fertilizante con el IN DMPP.

Concentración nutrimental foliar**Nitrógeno total**

Las mayores concentraciones de nitrógeno total (%NT) en la planta (2.43 y 2.32%) se obtuvieron con las dosis altas de N (360 kg N ha⁻¹ UC y 360 kg N ha⁻¹ IN DMPP). Se observa una relación estrecha entre el N aplicado por hectárea y la concentración de NT foliar independientemente de la inclusión del IN DMPP. Resultados similares fueron obtenidos por Shintate *et al.* (2016) en una investigación llevada a cabo en Selvíra, Brasil en donde evaluaron en maíz el rendimiento y diagnóstico foliar en relación con fertilización nitrogenada e inoculación de bacterias encontraron que el incremento en la tasa de fertilización con N influenciaba la concentración de N, P y S, sin importar la fuente de fertilización utilizada.

Fosforo, potasio y calcio

En el caso del fosforo la mayor concentración se logró con la dosis de N alta (360 kg N ha⁻¹) sin el inhibidor de la nitrificación, los tratamientos 1, 4, 5 y 6 fueron estadísticamente iguales. Cabe señalar, que todos los tratamientos resultaron bajos en el contenido de este elemento ya que el rango de suficiencia es de 0.31 a 0.5%. En el caso del potasio (K) todos los tratamientos tuvieron una concentración suficiente (2.1 a 3.1%) con excepción a los tratamientos con la dosis baja de N (120 kg ha⁻¹) con y sin IN DMPP.

En la concentración de calcio no hubo diferencia significativa entre tratamientos. La concentración de este elemento resulto alta en todos los tratamientos debido al origen de los suelos ya que el rango de suficiencia se encuentra entre 0.26 a 0.8%, en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Concentración nutrimental foliar de N, P, K y Ca a los 65 dds.

Tratamiento	N total (%)	Tratamiento	P (%)	Tratamiento	K (%)	Tratamiento	Ca (%)
360 kg N (UC)	2.43 A	360 kg N (UC)	0.21 A	360kg N (S45)	2.22 A	240 kg N (UC)	0.99 A
360 kg N (S45)	2.32 A	240 kg N (S45)	0.19 AB	240 kg N (UC)	2.19 A	120 kg N (UC)	0.97 A
240 kg N (S45)	2.27 AB	360 kg N (S45)	0.18 AB	120 kg N (UC)	2.17 A	120 kg N (UC)	0.394 A

Tratamiento	N total (%)	Tratamiento	P (%)	Tratamiento	K (%)	Tratamiento	Ca (%)
240 kg N (UC)	2.25 AB	120 kg N (UC)	0.15 AB	240 kg N S45)	2.11 A	360 kg N (UC)	0.94 A
120 kg N (UC)	2.02 B	120 kg N (S45)	0.15 AB	120 kg N S45)	2.08 A	120 kg N (S45)	0.91 A
120 kg N (S45)	1.67 C	240 kg N (UC)	0.15 B	360 kg N UC)	1.93 A	360 kg N (S45)	0.89 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$); UC= urea convencional; S45= Novatec solub 45®.

Concentración nutrimental foliar

Magnesio, azufre, fierro y zinc

No hubo diferencia significativa entre tratamientos en la concentración de Mg, S y Fe. La concentración de Mg y S en todos los tratamientos fue baja. El rango de suficiencia para magnesio es 0.61 a 0.9% y de 0.16 a 0.61% para el azufre. La concentración de hierro en todos los tratamientos fue alta, el rango de suficiencia de este elemento es de 31 a 121 ppm. La mayor concentración de Zn (54.8 ppm) se presentó en el testigo regional. La concentración de zinc en todos los tratamientos fue suficiente (Cuadro 8).

Cuadro 8. Concentración nutrimental de Mg, S, Fe y Zn a los 65 dds.

Tratamiento	Mg (%)	Tratamiento	S (%)	Tratamiento	Fe (ppm)	Tratamiento	Zn (ppm)
240 kg N (UC)	0.27 A	240 kg N (UC)	0.27 A	360 kg N (UC)	240.75 A	360 kg N (S45)	54.8 A
120 kg N (UC)	0.27 A	240 kg N (S45)	0.24 A	240 kg N S45)	237.50 A	120 kg N (UC)	51.13 AB
240 kg N (S45)	0.27 A	360 kg N (UC)	0.23 A	120 kg N (UC)	221.25 A	360 kg N (UC)	49.18 AB
120 kg N (S45)	0.26 A	120 kg N (S45)	0.21 A	240 kg N (UC)	203.25 A	240 kg N (UC)	47.48 AB
360 kg N (UC)	0.26 A	360 kg N (S45)	0.19 A	120 kg N S45)	199.75 A	240 kg N (S45)	47 AB
360 kg N (S45)	0.25 A	120 kg N (UC)	0.14 A	360 kg NS45)	187.75 A	120 kg N (S45)	40.9 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$); U)= urea convencional; S45= Novatec Solub 45®.

Calidad forrajera

Proteína cruda (PC%)

Se denomina ‘cruda’ ya que no es una medición directa de la proteína sino una estimación de la proteína total basada en el contenido de nitrógeno foliar. Se calcula multiplicando el N x 6.25= proteína cruda. La proteína cruda incluye la proteína verdadera y el nitrógeno no proteico (NNP). Los resultados solo mostraron diferencia de todos los tratamientos con la dosis de 120 kg N ha⁻¹ sin el IN DMPP. El tratamiento basado en 360 kg N ha⁻¹ con IN DMPP fue el que alcanzo el más alto porcentaje de PC debido probablemente a una mayor disponibilidad de N inorgánico en el suelo. El contenido de proteína cruda del tratamiento con solo 120 kg N ha⁻¹ fue estadísticamente igual al tratamiento con 360 kg N ha⁻¹.

Fibra detergente ácida (FDA)

Es una medida de cuantificación de lignina y celulosa. A mayor contenido de lignina la digestibilidad de la celulosa disminuye por lo que se correlaciona negativamente con la digestibilidad total del forraje evaluado (Meléndez, 2015). El tratamiento con mayor porcentaje de FDA fue con la dosis máxima de nitrógeno (360 kg ha con el IN DMPP) el cual fue estadísticamente igual al tratamiento con 120 kg N con el IN DMPP. Los tratamientos con menor contenido de lignina fueron con las dosis de 240 y 120 kg N ha⁻¹ sin el IN DMPP y estadísticamente iguales.

Fibra detergente neutra (FDN)

El porcentaje de FDN es la medida de celulosa, hemicelulosa y lignina representada en la parte fibrosa de los forrajes. El contenido de FDN en las dietas del GBL se correlaciona negativamente con el consumo de alimento. A mayor contenido de FDN, menor consumo de alimento por parte del ganado. El porcentaje de FDN en los tratamientos fluctuó entre 39.23% (120 kg de N ha⁻¹ sin el IN DMPP) y 46.23% (360 kg N ha⁻¹ con el IN DMPP). No hubo diferencia significativa entre tratamientos. Los resultados del análisis estadístico y la prueba de comparación de medias se muestran en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Proteína cruda (PC), fibra detergente ácida (FDA) y fibra detergente neutra.

Tratamiento	PC (%)	Tratamiento	FDA (%)	Tratamiento	FDN (%)
360 kg N (S45)	8.95 A	120 kg N (UC)	29.93 A	120 kg N (UC)	46.23 A
120 kg N (S45)	8.75 A	360 kg N (S45)	28.73 A	120 kg N (S45)	43.33 A
360 kg N (UC)	8.6 A	120 kg N (S45)	27.58 AB	240 kg N (UC)	41.95 A
240 kg N (S45)	8.45 A	240 kg N (UC)	26.95 AB	360 kg N (S45)	41.5 A
240 kg N (UC)	8.40 A	240 kg N (S45)	25.13 B	240 kg N (S45)	39.93 A
120 kg N (UC)	7.30 B	360 kg N (UC)	24.2 B	360 kg N (UC)	39.23 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$): PC= proteína cruda; FDA= fibra detergente ácida y FDN= fibra detergente neutra.

Conclusiones

El uso de IN DMPP, presentó un alto potencial para reducir las dosis de fertilizantes nitrogenados minimizando de esta manera la contaminación de cuerpos de agua con nitratos y de la atmósfera con gases derivados del proceso de desnitrificación. No se encontraron diferencias importantes en la concentración foliar de nutrimentos ni en la calidad forrajera del silo de maíz derivado de la aplicación de IN DMPP.

Literatura citada

Barrientos, R. 2016. Dinámica del nitrógeno en el suelo, rendimiento y calidad de maíz forrajero aplicando fertilizantes con inhibidor de nitrificación DMPP. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. 84 p.

- Cueto, J. A.; Reta, D. G.; Barrientos, J. L.; González, G. y Salazar, E. 2006. Rendimiento de maíz forrajero en respuesta a fertilización nitrogenada y densidad de población. *Rev. Fitotec. Mex.* 29(2):97-101.
- Cueto, J. A.; Figueroa, U.; García, J. L y Ochoa, E. 2018. Evaluación de fertilizantes con inhibidor de la nitrificación DMPP en el cultivo del maíz forrajero en la Comarca Lagunera. *Campo Experimental de la Laguna-INIFAP. Informe técnico interno, Compo Uno*, 1.
- Fernández, M. A. y Soria, A. 2012. La contaminación de las aguas por nitratos procedentes de fuentes de origen agrario. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia Consejería de Agricultura y Agua. <http://www.asajamurcia.com/sites/default/files/proyecto/4021-texto-completo-1-la-contaminacion-de-las-aguas-por-nitratos-procedentes-de-fuentes-de-origen-agrario.pdf>.
- Figueroa, U.; Cueto, J. A.; Delgado, J. A.; Núñez, G.; Reta, D. G.; Quiroga, H. M.; Faz, R. y Márquez, J. L. 2010. Estiércol de bovino lechero sobre el rendimiento y recuperación aparente de nitrógeno en maíz forrajero. *Rev. Terra Latinoam.* 28(4):361-369.
- Groot, M. and Van't Hooft, K. 2016. The hidden effects of dairy farming on public and environmental health in the Netherlands, India, Ethiopia, and Uganda, considering the use of antibiotics and other agro-chemicals. *Frontiers in Public Health.* 4. 4-12 pp.
- Hu, I.; Schraml, M.; Tucher, S.; Li, F and Schmidhalter, U. 2013. Influence of nitrification inhibitors on yields of arable crops: A meta-analysis of recent studies in Germany. *Inter. J. Plant Prod.* 8(1):33-50.
- IPNI. 2015. International Plant Nutrition Institute. Nutrient source specifics. Nitrification inhibitors. www.ipni.net.
- Linares, M.; Barrios, M. and Solórzano, P. 2012. Efecto de la fertilización con urea tratada con inhibidor de la nitrificación sobre el rendimiento y la nutrición del maíz (*Zea mays* L.). *Revista de la Facultad de Agronomía UCV.* 38(2):41-48.
- Meléndez, P. 2015. Las bases para entender un análisis nutricional de alimentos y su nomenclatura. *El mercurio, Campo.* <http://www.elmercurio.com/Campo/Noticias/Analisis/2015/10/21/Las-bases-para-entender-un-analisis-nutricional-de-alimentos-y-su-nomenclatura.aspx>.
- Nelson, D. W. and Huber, D. 2001. Nitrification inhibitors for corn production. Iowa State University. University Extension. www.extension.iastate.edu.
- NRC. 2001. National Research Council. Nutrient Requirements of Dairy Cattle. Washington, DC. National Academy Press.
- Pasda, G.; Hähndel, R. and Zerulla, W. 2001. Effect of fertilizers with the new nitrification inhibitor DMPP (3, 4-dimethylpyrazole phosphate) on yield and quality of agricultural and horticultural crops. *Biol. Fertility Soils.* 34:85-97.
- Rodríguez, V.; Alayón, P.; Píccoli, A.; Mazza, S. and Martínez, G. 2011. Efectividad del 3,4-Dimetilpirazol fosfato (DMPP) en naranjo dulce en el noreste Argentino. *Rev. Bras. Frutic.. Jaboticabal.* 33(4):1344-1349.
- Saynes, V.; Etchevers, J.; Paz, F. y Alvarado, L. 2016. Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México. *Rev. Terra Latinoam.* 34(1):83-96.
- Shintate, F.; Carvalho, M.; Salatiér, B.; Kondo, J.; Cleiton, J.; Meneghini, L.; Ziolkowski, M.; Andreotti, M. and Miranda, J. 2016. Corn yield and foliar diagnosis affected by nitrogen fertilization and inoculation with azospirillum brasilense. *Rev. Bras.e Ciencia do Solo.* 40:14-23.
- SIAP. 2017a. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. http://infosiap.siap.gob.mx/repoAvance.siap_gb/pecAvanceProd.jsp.

- SIAP. 2017b. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Avance de siembras y cosechas.
- Szymanek, M. and Piasecki, J. 2013. Effect of different rates of nitrogen fertilizer on growth and yield of sweet corn cobs. TEKA. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. 13(1):197-200.
- Wei, C.; Sung, Y.; Ching, B. and Yu, H. 2014. Effects of nitrogen fertilizers on the growth and nitrate content of Lettuce (*Lactuca sativa* L.). Inter. J. Environ. Res. Public Health. 11(4):4427-4440.