



USO EFICIENTE DE NITRÓGENO EN APLICACIONES FRACCIONADAS DE FERTILIZANTE MARCADO CON ^{15}N EN TRIGO

EFFICIENT USE OF NITROGEN IN SPLIT APPLICATIONS OF ^{15}N -LABELED FERTILIZER IN WHEAT

Sarahyt Santamaría González-Figueroa¹, José Antonio Vera-Núñez², Juan José Peña-Cabriales², Aurelio Báez-Pérez¹ y Oscar Arath Grageda-Cabrera^{1*}

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato, México. ²Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Irapuato, Irapuato, Guanajuato, México.

*Autor para correspondencia (grageda.oscar@inifap.gob.mx)

RESUMEN

La eficiencia del uso del nitrógeno (EUN) por los cultivos agrícolas es muy baja por pérdidas asociadas con su alta solubilidad y, en algunas condiciones de suelo, por alta volatilidad, lo que trae como consecuencia impactos negativos en la rentabilidad económica y la contaminación del medio ambiente. Se realizó un experimento de campo bajo riego en suelo del Bajío en Guanajuato, México para estudiar la eficiencia de asimilación del fertilizante nitrogenado por el cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L.) mediante el fraccionamiento de su aplicación utilizando como trazador sulfato de amonio enriquecido con 3.0237 % de átomos en exceso de ^{15}N . Las variedades de trigo de invierno evaluadas fueron Gema C2004, Nana F2007 y Urbina S2007; el 100 % de la dosis de fertilización fue 240 kg N ha⁻¹ y se usaron 10 fraccionamientos en porcentaje a la siembra, encañe y espigamiento (00-00-00, 100-00-00, 00-100-00, 50-50-00, 00-50-50, 70-30-00, 30-70-00, 00-30-70, 00-70-30 y 33-33-33). El rendimiento y el porcentaje de Eficiencia del Uso del Nitrógeno (EUN) fueron mayores cuando el fertilizante N se fraccionó en 30-70-00, la EUN osciló entre el 19.68 %, cuando se fraccionó 100-00-00, y el 41.14 % cuando se fraccionó 30-70-00. Cuando no se aplicó fertilización de N en la siembra la EUN fue inferior al 25.72 %. En las prácticas locales se recomienda la fertilización 50-50-00, pero el rendimiento aumentó hasta 8.4 % y la EUN en grano hasta 8.32 % cuando el fraccionamiento fue 30-70-00. El fraccionamiento adecuado de la fertilización N es necesario para mejorar las tasas de asimilación del nitrógeno y la calidad del grano.

Palabras clave: *Triticum aestivum* L., manejo de N, recuperación de ^{15}N , rendimiento de grano.

SUMMARY

The nitrogen use efficiency (NUE) by agricultural crops is very low due to losses associated with its high solubility and, in some soil conditions, due to high volatility, which results in negative impacts on economic profitability and environmental pollution. A field experiment was carried out under irrigation in soil of El Bajío, Guanajuato, Mexico to study the assimilation efficiency of nitrogen fertilizer by wheat (*Triticum aestivum* L.) by fractionating its application using ammonium sulfate enriched with 3.0237 % of atoms in excess of ^{15}N as a tracer. The Winter wheat varieties evaluated were Gema C2004, Nana F2007 and Urbina S2007; 100% of the fertilization rate was 240 kg N ha⁻¹ and 10 partitions in percentage were used at planting, stem elongation and heading (00-00-00, 100-00-00, 00-100-00, 50-50-00, 00-50-50, 70-30-00, 30-70-00, 00-30-70, 00-70-30 and 33-33-33). Yield and

percentage of Nitrogen Use Efficiency (NUE) were higher when the N fertilizer was partitioned into 30-70-00, NUE ranged from 19.68 %, when partitioned at 100-00-00 and 41.14% when partitioned at 30-70-00. When N-fertilization was not applied at planting, the NUE was less than 25.72 %. In local practices, fertilization 50-50-00 is recommended, but yield increased up to 8.4 % and the NUE in grain up to 8.32 % when partition was 30-70-00. Proper fractionation of N-fertilization is necessary to improve nitrogen assimilation rates and grain quality.

Index words: *Triticum aestivum* L., ^{15}N recovery, grain yield, N management.

INTRODUCCIÓN

Los fertilizantes nitrogenados suministran aproximadamente el 45 % del insumo total para la producción global de alimentos, y la demanda mundial para la fertilización de cultivos agrícolas es del orden de 110 millones de toneladas; sin embargo, dado que se aplica una cantidad sustancial de N, también se pierde en el ambiente, lo que aumenta en gran medida la contribución del N reactivo en una amplia variedad de problemas ambientales (Ladha, 2014; Zhang *et al.* 2015).

La gran mayoría de cultivos agrícolas asimilan ineficientemente el fertilizante nitrogenado, y el exceso de fertilización se practica a menudo como un seguro contra la deficiencia; por lo tanto, la recuperación del fertilizante N es baja y rara vez supera el 50-60 % de la cantidad aplicada (De Oliveira Silva *et al.*, 2020; Salim y Raza, 2019). En la región central de México conocida como El Bajío, se siembran anualmente más de 200 mil ha con trigo. Estudios realizados en la zona muestran que el cultivo de trigo absorbe entre 25 y 30 % del N aplicado como fertilizante, el resto se pierde del sistema agrícola por diversos mecanismos, causando cuantiosas pérdidas económicas y contaminación ambiental; además, el constante incremento en el precio de los fertilizantes

encarece el cultivo y lo hace poco rentable (Grageda-Cabrera *et al.*, 2011).

El promedio mundial de aplicación de fertilizante nitrogenado para el trigo es de 83.5 kg ha⁻¹; sin embargo, en esta región de México las dosis son altas, del orden de 200 a 350 kg N ha⁻¹. La fertilización 240-60-00 (N-P₂O₅-K₂O) ha sido recomendada para trigo en suelos bajo riego del Bajío en los últimos 30 años con un fraccionamiento de N 50-50; éste es: 50 % en la siembra (Z0) y 50 % en la etapa de crecimiento (Z3), según escala decimal propuesta para cereales por Zadoks *et al.* (1974), mientras que la recomendación de los fertilizantes con fósforo es a la siembra del trigo. Recientemente, han surgido recomendaciones de no aplicar fertilizante-N en la siembra, ya que el cultivo en esta etapa aparentemente no lo requiere; sin embargo, no existen estudios locales que avalen este tipo de recomendaciones, por lo que el objetivo del presente estudio fue determinar la eficiencia de asimilación del fertilizante nitrogenado por el cultivo de trigo al fraccionar su aplicación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental y material genético

Se estableció un experimento en condiciones de campo en Celaya, Guanajuato, México (20° 35' 06.59" N, 100° 49' 46.84" O; 1769 msnm). Los promedios históricos de la precipitación anual y temperatura para el sitio de estudio son de 645.5 mm y 18.1° C, respectivamente. El suelo vertisol pélico arrojó valores de pH (1:2 agua) de 7.19 unidades, contenido de materia orgánica de 2.17 % y textura franco arcillo limosa (FAO, 2007). Se utilizaron las variedades de trigo de invierno Gema C2004, Nana F2007 y Urbina S2007, generadas por el INIFAP y adaptadas para su producción en la región de El Bajío.

Tratamientos

Para generar los tratamientos se fertilizó el suelo con la dosis de 240-60-00 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O. La fuente de N fue sulfato de amonio y se aplicó con diferentes fracciones porcentuales: en la siembra (Z0), encañe (Z3) y espigamiento (Z5). Todo el P se aplicó en la siembra como superfosfato de calcio triple. Se instaló una micro-parcela isotópica de 2.3 m² en cada tratamiento y se aplicó sulfato de amonio enriquecido con 3.0237 % de átomos en exceso de ¹⁵N (*). Cuando se fraccionó el fertilizante-N, se repitió el mismo tratamiento para marcar con ¹⁵N cada aplicación de forma independiente; es decir, 100*-00-00, 00-100*-00, 50-50-00 (50*-50-00 y 50-50*-00), 00-50-50 (00-50*-50 y 00-50-50*), 70-30-00 (70*-30-00 y 70-30*-00), 30-70-00

(30*-70-00 y 30-70*-00), 00-30-70 (00-30*-70 y 00-30-70*), 00-70-30 (00-70*-30 y 00-70-30*) y 33-33-33 (33*-33-33, 33-33*-33 y 33-33-33*). También se incluyó un tratamiento control que no se fertilizó con N.

Diseño y unidad experimental

El diseño experimental fue de bloques completos al azar con cuatro repeticiones, con arreglo parcelas divididas. Los tratamientos de la parcela mayor fueron para las variedades y las sub-parcelas fueron para los tratamientos de fraccionamiento del fertilizante nitrogenado. La unidad experimental fue de cinco surcos a doble hilera (0.76 m de ancho y 5.0 m de largo).

Manejo agronómico

Las prácticas agronómicas se realizaron según las recomendaciones propuestas por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP-Campo Experimental Bajío) para la siembra de trigo en surcos, entre las cuales se destaca la aplicación de tres riegos, el primero previo a la siembra y dos más a los 45 y 75 días posteriores.

Variables evaluadas

Se evaluaron las variables peso seco de grano (PSG), peso seco de paja (PSP) y peso seco total (PST) en kg ha⁻¹, índice de cosecha (IC), N en grano, paja y total (kg ha⁻¹), N derivado del fertilizante (Nddf) (kg ha⁻¹) y eficiencia en el uso del fertilizante-N (EUN). La cosecha se realizó en madurez fisiológica, se trillaron las espigas separando el grano de la paja y se registró el rendimiento en kg ha⁻¹. Los resultados sobre la calidad de semilla de este experimento ya han sido reportados por González-Figueroa *et al.* (2018).

En las muestras que contenían ¹⁵N, el N total y la relación isotópica ¹⁵N/¹⁴N se determinaron por espectrometría de masas en un espectrómetro de masas de relaciones isotópicas (IRMS SERCON 20-20, Crewe, Reino Unido), como lo describen Barrie y Prosser (1996). Los cálculos isotópicos de ¹⁵N se determinaron por el método de dilución isotópica (Zapata, 1990).

Análisis estadístico

Los datos se analizaron siguiendo el procedimiento estándar de análisis de varianza; cuando la prueba de F fue significativa se realizó la prueba de comparación de medias por la diferencia mínima significativa (DMS, P ≤ 0.05) utilizando el software SAS 9.3 (SAS Institute, 2011).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento y contenido de nitrógeno

Los resultados de rendimiento y contenido de N obtenidos por las diferentes variedades se presentan en el Cuadro 1. Con respecto al PSG, Gema C2004 obtuvo el mayor rendimiento, con 5659 kg ha⁻¹. Nana F2007 presentó el mayor PST, con 18,039 kg ha⁻¹; sin embargo, el 70.3 % fue de paja, como se refleja en su IC de 0.31, en contraste con Gema C2004, cuyo IC fue de 0.41.

En cuanto al contenido de N, hubo diferencias entre variedades ($P \leq 0.05$) y todas las variedades presentaron mayor acumulación de N en grano que en paja. Gema C2004 obtuvo el mayor valor de N en grano con 116.7 kg N ha⁻¹ y la menor producción en paja con 62.9 kg ha⁻¹, acumulando un total de 179.6 kg N ha⁻¹; por el contrario, la variedad Nana F2007 obtuvo el menor valor de N en grano, con 104.6 kg N ha⁻¹ y el mayor en paja, con 98.2 kg N ha⁻¹, acumulando un total de 202.8 kg N ha⁻¹ y, por lo tanto, un menor IC de N.

Se presentaron diferencias ($P \leq 0.05$) entre los fraccionamientos de la fertilización-N en la producción de materia seca y el contenido de N (Cuadro 2). El testigo absoluto obtuvo el menor rendimiento de grano, con 3116 kg ha⁻¹, mientras que los mayores rendimientos se obtuvieron al fraccionar la fertilización-N en 30-70-00 y 33-33-33, con 6822 y 6469 kg ha⁻¹, respectivamente. Cuando se realizó una única aplicación de fertilizante-N los rendimientos de grano fueron los más bajos, y no superaron los 4850 kg ha⁻¹. La disponibilidad temprana de N normalmente se traduce en mejores rendimientos, y su aplicación en etapas tardías puede mejorar la cantidad y calidad de las proteínas en grano (De Oliveira Silva *et al.*, 2020); sin embargo, el peso de la cosecha de grano tiende a disminuir si todo el N se aplica en

la siembra, y la calidad del grano aumenta cuando se aplica en la etapa fenológica de amacollamiento.

La estrategia de fraccionar la dosis de fertilizante nitrogenado al suelo tiene su fundamento en las hipótesis de: primera, de reducir pérdidas de N y con ello la polución y segunda, con la translocación temprana de asimilados aumentar el peso y calidad del grano. Los resultados no concuerdan con los reportados por Chen *et al.* (2006), quienes encontraron que cuando hay suficiente N residual en el suelo no es necesario aplicar N antes de la siembra del trigo y no observaron diferencias ($P \geq 0.05$) en el estado nutricional de N o en el rendimiento en comparación a cuando se aplica antes de la siembra; asimismo, Wallace *et al.* (2019) encontraron que posponer la aplicación de fertilizantes hasta el final del amacollamiento disminuyó las pérdidas de fertilizante-N manteniendo el rendimiento. Los resultados obtenidos para el contenido de N entre los fraccionamientos de la fertilización-N mostraron las mismas diferencias ($P \geq 0.05$) entre tratamientos que las reportadas para rendimiento.

En la interacción variedad \times fraccionamiento de la fertilización-N todas las variedades mostraron la misma tendencia que la de los fraccionamientos, los mejores rendimientos se produjeron cuando el fertilizante-N se fraccionó en 30-70-00, seguido de 33-33-33; probablemente debido a la reducción de las pérdidas y la disponibilidad del N en las etapas críticas de formación y llenado de grano.

Se obtuvieron las mismas diferencias ($P \leq 0.05$) en el contenido de N entre tratamientos que las reportadas para rendimiento. El fraccionamiento donde se produjo la mayor asimilación de N, independientemente de la variedad, fue 30-70-00 con un promedio de 253.14 kg N ha⁻¹. Hay dos fuentes de N para el grano, el N almacenado en las partes vegetativas hasta la antesis y la absorción de N después

Cuadro 1. Peso seco (PS) y contenido de Nitrógeno (N) en las variedades de trigo Gema C2004, Nana F2007 y Urbina S2007.

Variedad	Grano		Paja		Total	
	PS	N	PS	N	PS	N
	kg ha ⁻¹					
Gema C2004	5659 a*	117 a	8172 c	63 c	13,831 c	180 c
Nana F2007	5365 b	105 c	12,674 a	98 a	18,039 a	203 a
Urbina S2007	5286 c	114 b	1001 b	78 b	15,288 b	192 b
DMS (0.05)	49.2	1.08	772.6	1.47	770.6	1.76

Medias con letras iguales en cada columna no son significativamente diferentes (DMS, $P \leq 0.05$).

de la antesis. Si la absorción de N no es un factor limitante, la principal fuente de N para el llenado de grano (60-92 %) se almacena en los órganos vegetativos (Simpson *et al.*, 1983); entonces, para aumentar el contenido de N de grano es necesario aumentar ambas fuentes. Xue *et al.* (2016) concluyeron que el N absorbido de manera tardía en trigo se utilizó directamente para la síntesis de proteínas en el grano, afectando no sólo la cantidad de proteínas sino también la distribución final en esta estructura.

Se han reportado grandes diferencias en las concentraciones de proteínas del grano debido al manejo de la fertilización-N (Beres *et al.*, 2018; Walsh *et al.*, 2018) y aunque el rendimiento no se ve afectado cuando la disponibilidad de N es adecuada durante el desarrollo temprano del grano, las aplicaciones fraccionadas de N aumentan el contenido de proteína del grano en comparación con la aplicación de N sólo en la siembra (Abedi *et al.*, 2011; Hirzel *et al.*, 2010; López-Bellido *et al.*, 2012).

Los resultados de la interacción variedad × fraccionamiento mostraron que, para todas las variedades de trigo, la mayor asimilación de N se produjo con el fraccionamiento 30-70-00 (30*-70-00 y 30-70*-00). En grano, el mayor valor se obtuvo en la variedad Gema C2004, con 168.24 y 167.00 kg N ha⁻¹; en paja, la variedad Nana F2007 asimiló 165.99 y 161.27 kg N ha⁻¹. Entre las variedades estudiadas, hubo diferencias genotípicas en la asimilación y movilización de N. La eficiencia de la

movilización de N al grano puede diferir entre genotipos (Pan *et al.*, 2020). Fuertes-Mendizábal *et al.* (2010) indicaron que el contenido de N en el grano de trigo depende del cultivar, las condiciones ambientales y del manejo de la fertilización, el dividir la tasa de N tiene un efecto beneficioso sobre la calidad del grano. La respuesta a las aplicaciones únicas o fraccionadas de N han sido inconsistentes, Schulz *et al.* (2014) determinaron que una aplicación de N en el período entre el amacollamiento y alargamiento del tallo es suficiente para lograr un alto rendimiento y calidad del grano del trigo, esto simplificaría la fertilización con N, en contraste con hacer tres o cuatro aplicaciones; sin embargo, una sola aplicación de N puede resultar en un menor contenido de proteína cruda en grano.

Eficiencia del Uso del fertilizante-N (EUN)

La EUN es una medida cuantitativa de la absorción real de N por parte de la planta con relación a la cantidad de fertilizante-N añadido al suelo, y la forma más común de expresarlo es en porcentaje (Zapata, 1990). El Cuadro 3 muestra los resultados de la EUN en porcentaje por las variedades estudiadas. Urbina S2007 obtuvo la mayor eficiencia con 32.34 %, seguida de Nana F2007 con 26.60 % y Gema C 2004 con 26.03 %. Las diferencias ($P \leq 0,05$) se deben a la eficiencia fisiológica con la que las plantas utilizan el N y dependen principalmente de las características del genotipo y la disponibilidad del nutriente. Ron y Loewy (2000) determinaron que las variedades de ciclo largo e intermedio satisfacen los requerimientos iniciales del N

Cuadro 2. Efecto del fraccionamiento de la fertilización-N aplicada en la siembra (Z0), encañe (Z3) y espigamiento (Z5) sobre el peso seco (PS) y contenido de N (N) en trigo.

Fraccionamiento del fertilizante-N	Grano		Paja		Total	
	PS	N	PS	N	PS	N
	kg ha ⁻¹					
00-00-00	3116 i	48 g	4819 e	21 f	7935 e	70 g
100-00-00	4786 h	96 f	10,721 cd	85 c	15,507 d	181 e
00-100-00	4850 h	94 f	10,005 cd	82 c	17,855 d	176 f
50-50-00	6296 c	128 b	12,435 ab	96 b	18,731 b	225 b
00-50-50	5197 g	107 e	9866 cd	73 d	15,063 d	180 ef
70-30-00	5924 d	117 c	11,219 bc	85 c	17,143 c	202 c
30-70-00	6822 a	147 a	13,454 a	106 a	20,276 a	253 a
00-30-70	5339 f	107 e	9871 cd	70 de	15,211 d	176 f
00-70-30	5568 e	112 d	9491 d	68 e	15,059 d	180 ef
33-33-33	6469 b	112 d	10,944 c	84 c	17,413 bc	196 d
DMS (0.05)	90	2.66	1411	3.61	1407	4.32

Medias con letras iguales en cada columna no son significativamente diferentes (DMS, $P \leq 0.05$).

nativo más fácilmente que las de ciclo corto; los cultivares de ciclo corto, en cambio, son más dependientes de la fertilización; esta afirmación no concuerda con los resultados obtenidos en este experimento, ya que las variedades Gema C2004 y Nana F2007 son de ciclo largo y Urbina S2007 de ciclo intermedio, y todas mostraron valores bajos de EUN. Cuando no se aplica N al momento de la siembra, aun cuando los requerimientos de N antes del amacollamiento son realmente bajos, en general, no superan el 10 % del total asimilado a lo largo del ciclo de cultivo.

Los resultados de las fracciones marcadas con ^{15}N se presentan en el Cuadro 4. Entre las fracciones aplicadas al momento de la siembra, el tratamiento 30*-70-00 presentó el mayor EUN, con 38.81 %; en Z3, el tratamiento 30-70*-00 obtuvo la mayor eficiencia con 42.24 %; en Z5, los valores de EUN fueron bajos en relación con los otros tiempos de aplicación, teniendo el tratamiento 33-33-33* el mayor EUN con 31.39 %. En general, la EUN fue baja, lo que en parte puede estar relacionado con la baja cantidad de materia orgánica del suelo; Rehim *et al.* (2020) reportaron que existe una estrecha relación entre la materia orgánica del suelo y la EUN. Los resultados aquí obtenidos contrastan con los reportados por Liang *et al.* (2020) quienes, al estudiar con técnicas isotópicas los tiempos y tasas de aplicación de fertilizante-N, encontraron que el Ndff asimilado por el trigo no fue afectado por el manejo del N. Por otro lado, la asimilación de N se maximiza cuando el fertilizante-N se aplica poco antes del período de más rápida absorción, en trigo este período ocurre entre el alargamiento temprano del tallo y la antesis, pudiendo acumular hasta el 75 % del N total en la biomasa aérea alcanzada en la madurez (Velasco *et al.*, 2012). López-Bellido *et al.* (2012) encontraron que la EUN no se vio afectada por el fraccionamiento de la fertilización-N en el cultivo de trigo; sin embargo, la menor tasa de recuperación de N se produjo cuando todo el fertilizante-N se aplicó en la siembra.

Al igual que Liu *et al.* (2020), en el presente estudio se encontró que cuando la EUN es mayor, el rendimiento de grano aumenta; sin embargo, debe haber un equilibrio entre el rendimiento y la EUN, ya que casi siempre se observa una alta EUN y un bajo rendimiento cuando la cantidad de fertilizante-N aplicada es reducida; por lo tanto, las aplicaciones de fertilizantes-N deben ser manejadas para aumentar la EUN; es decir, el N debe ser aplicado en las dosis apropiadas y en el lugar y momento adecuado (Salim y Raza, 2019).

El % Nddf asimilado de cada fracción aplicada después de la siembra se vio afectado por la cantidad de fertilizante-N aplicado en las etapas anteriores. Si hay

Cuadro 3. Eficiencia del uso del fertilizante-N (EUN) por las variedades de trigo evaluadas.

Variedad	EUN (%)		
	Grano	Paja	Total
Gema C2004	17.47 b	8.55 c	26.03 c
Nana F2007	16.23 c	10.36 b	26.60 b
Urbina S2007	20.73 a	11.61 a	32.34 a
DMS (0.05)	0.165	0.223	0.271

Medias con letras iguales en cada columna no son significativamente diferentes (DMS, $P \leq 0.05$).

Cuadro 4. Eficiencia del uso del fertilizante-N (EUN) en las fracciones marcadas con ^{15}N aplicadas a siembra (Z0), encañe (Z3) y espigamiento (Z5) en trigo.

Fracción marcada ^{15}N	EUN (%)		
	Grano	Paja	Total
00-00-00	0.00 o	0.00 n	0.00 n
100*-00-00	10.08 n	9.59 g	19.68 l
00-100*-00	11.50 m	10.55 f	22.05 k
50*-50-00	21.68 f	15.93 a	37.61 d
50-50*-00	19.83 g	12.36 d	32.20 f
00-50*-50	19.64 g	14.20 c	33.85 e
00-50-50*	13.04 l	4.49 m	17.53 m
70*-30-00	18.75 i	9.45 gh	28.21 h
70-30*-00	15.72 k	9.01 hi	24.74 j
30*-70-00	27.56 b	11.24 e	38.81 c
30-70*-00	29.68 a	12.55 d	42.24 a
00-30*-70	26.30 c	14.91 b	41.21 b
00-30-70*	12.78 l	6.30 l	19.09 l
00-70*-30	17.30 j	8.09 j	25.39 ij
00-70-30*	18.51 i	7.25 k	25.76 i
33*-33-33	22.23 e	15.80 a	38.03 d
33-33*-33	19.17 h	12.87 d	32.04 fg
33-33-33*	22.82 d	8.56 ij	31.39 g
DMS (0.05)	0.405	0.546	0.664

*Fertilizante enriquecido con 3.0237 % de átomos en exceso de ^{15}N . Medias con letras iguales en cada columna no son significativamente diferentes (DMS, $P \leq 0.05$).

una deficiencia de N en etapas tempranas, la planta no se desarrolla adecuadamente y su capacidad de asimilar el fertilizante-N puede disminuir.

Considerando la eficiencia acumulada de las fracciones marcadas con ^{15}N (Cuadro 5), se encontró que las mayores EUN en grano y total se obtuvieron cuando el fertilizante fue fraccionado en 30-70-00, con un 29.08 y 41.14 %, respectivamente. Cuando no se aplicó fertilizante-N en la siembra las EUN fueron bajas, menores de 26 %, por lo que en las condiciones regionales del estudio es necesario aplicar fertilizante-N en la siembra. Dhillon *et al.* (2020) encontraron que el momento de la aplicación de N tiene un impacto significativamente mayor en el rendimiento que el método de aplicación; además, la EUN es mayor con aplicaciones divididas que con la aplicación total antes de la siembra.

Los resultados de la EUN en las interacciones variedad \times fraccionamiento con ^{15}N marcado muestran que en las tres variedades las aplicaciones en un sólo fraccionamiento o en Z5 los valores de EUN en grano, paja y total son más bajos que en las aplicaciones divididas en la siembra y en Z3. Considerando la acumulación de todas las fracciones marcadas, las variedades Gema C 2004 y Nana F 2007 presentaron el mayor EUN en el fraccionamiento

Cuadro 5. Eficiencia acumulada del uso del fertilizante-N (EUN) de las diferentes fracciones marcadas con ^{15}N aplicadas a la siembra (Z0), encañe (Z3) y espigamiento (Z5) en trigo.

Fraccionamiento fertilizante-N	EUN (%)		
	Grano	Paja	Total
00-00-00	0.00 i	0.00 g	0.00 h
100-00-00	10.08 h	9.59 d	19.68 g
00-100-00	11.50 g	10.55 c	22.05 f
50-50-00	20.76 c	14.11 a	34.88 b
00-50-50	16.33 f	9.23 de	25.57 e
70-30-00	17.84 d	9.23 de	27.08 d
30-70-00	29.08 a	12.06 b	41.14 a
00-30-70	16.82 e	8.89 e	25.72 e
00-70-30	17.72 d	7.81 f	25.53 e
33-33-33	21.20 b	12.29 b	33.82 c
DMS (0.05)	0.269	0.395	0.443

Medias con letras iguales en cada columna no son significativamente diferentes (DMS, $P \leq 0.05$).

30-70-00, mientras que Urbina S2007 lo mostró cuando el fertilizante-N se fraccionó en 33-33-33.

Penning de Vries *et al.* (1974) calcularon que 1 g de glucosa producida por fotosíntesis puede ser utilizado por el cultivo para producir 0.83 g de carbohidratos o 0.40 g de proteína, lo que implica que al aumentar el contenido de proteína se utilizan más fotosintatos y, por tanto, se ocasiona una disminución de la producción de materia seca; además, los análisis económicos indican que el aumento de la proteína del grano mediante la fertilización-N no siempre es rentable y depende de factores externos como el precio al contado del trigo, la disponibilidad de trigo con alto contenido proteico y el costo de la fertilización-N (Pan *et al.*, 2020).

CONCLUSIONES

La proporción del fraccionamiento de la fertilización-N afectó ($P \leq 0.05$) la asimilación del Nddf, el rendimiento y el contenido de N en grano. Los mejores resultados en términos de rendimiento y contenido de N en el grano se obtuvieron al dividir la tasa de fertilización-N en 30-70-00 y 33-33-33 al momento de la siembra, encañe y espigamiento. Cuando no se aplicó fertilización-N al momento de la siembra, la EUN fue inferior al 25.72 %. En la región del Bajío, México se utiliza el fraccionamiento 50-50-00, pero se podría incrementar la acumulación de Nddf en grano hasta 8 % si el fraccionamiento fuera 30-70-00. La máxima EUN fue del 41.14 % y se produjo con el fraccionamiento 30-70-00, mientras que la menor fue de 19.68 % con el fraccionamiento 100-00-00. Los resultados contribuyen a reconsiderar el fraccionamiento óptimo de la fertilización-N en la producción de trigo en la región del Bajío y tiene importantes implicaciones económicas y ambientales.

BIBLIOGRAFÍA

- Abedi T., A. Alemzadeh and S. A. Kazemini, S. (2011) Wheat yield and grain protein response to nitrogen amount and timing. *Australian Journal of Crop Science* 5:330-336.
- Barrie A. and S. J. Prosser (1996) Automated analysis of light-element stable isotopes by isotope ratio mass spectrometry. In: *Mass Spectrometry of Soils*. T. W. Boutton and S. I. Yamasaki (eds). Marcel Dekker. New York, USA. pp:1-46.
- Beres B. L., R. J. Graf, R. B. Irvine, J. T. O'Donovan, K. N. Harker, E. N. Johnson, ... and F. C. Stevenson (2018) Enhanced nitrogen management strategies for winter wheat production in the Canadian prairies. *Canadian Journal of Plant Science* 98:683-702, <https://doi.org/10.1139/cjps-2017-0319>
- Chen X., F. Zhang, V. Römheld, D. Horlacher, R. Schulz, M. Böning-Zilkens, ... and W. Claupein (2006) Synchronizing N supply from soil and Fertilizer and N demand of winter wheat by an improved Nmin method. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 74:91-98, <https://doi.org/10.1007/s10705-005-1701-9>
- De Oliveira Silva A., I. A. Ciampitti, G. A. Slafer and R. P. Lollato (2020) Nitrogen utilization efficiency in wheat: a global perspective. *European Journal of Agronomy* 114:126008, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126008>

- eja.2020.126008
- Dhillon J. E. Eickhoff, L. Aula, P. Omara, G. Weymeyer, E. Nambi, ... and W. Raun (2020) Nitrogen management impact on winter wheat (*Triticum aestivum* L.) grain yield and estimated plant nitrogen loss. *Agronomy Journal* 112:564-577, <https://doi.org/10.1002/ajj2.20107>
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y a Agricultura (2007) Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Un Marco Conceptual para Clasificación, Correlación y Comunicación Internacional. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma. 117 p.
- Fuertes-Mendizábal T., A. Aizpuru, M. B. González-Moro and J. M. Estavillo (2010) Improving wheat breadmaking quality by splitting the N fertilizer rate. *European Journal of Agronomy* 33:52-61, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.03.001>
- González-Figueroa S. S., C. L. Aguirre-Mancilla, J. Covarrubias-Prieto, F. Cervantes O. y O. A. Grageda-Cabrera (2018) Efecto del fraccionamiento de la fertilización nitrogenada aplicada al trigo sobre la calidad de su semilla. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 9:291-301, <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i2.1072>
- Grageda-Cabrera O. A., J. A. Vera-Núñez, J. L. Aguilar-Acuña, L. Macías-Rodríguez, G. A. Aguado-Santacruz and J. J. Peña-Cabriales (2011) N-fertilizer dynamics in different tillage and crop rotation systems in a vertisol in Central Mexico. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 89:125-134, <https://doi:10.1007/s10705-010-9382-4>
- Hirzel J., I. Matus and R. Madariaga (2010) Effect of split nitrogen applications on durum wheat cultivars in volcanic soil. *Chilean Journal of Agricultural Research* 70:590-595, <https://doi.org/10.4067/S0718-58392010000400009>
- Ladha J. K. (2014) Contributions of fertilizer nitrogen in global cereal production, soil organic matter status and nitrogen balance *In: Managing Soils for Food Security and Climate Change Adaptation and Mitigation*. L. K. Heng, K. Sakadevan, G. Dercon and M. L. Nguyen (eds). Joint FAO IAEA Programme, Food and Agriculture Organization. Rome. pp:21-24.
- Liang H., P. Shen, X. Kong, Y. Liao and Y. Liu (2020) Optimal nitrogen practice in Winter wheat-Summer maize rotation affecting the fates of ¹⁵N-labeled fertilizer. *Agronomy* 10:521, <https://doi.org/10.3390/agronomy10040521>
- Liu M., X. Wu, C. Li, M. Li, T. Xiong and Y. Tang (2020) Dry matter and nitrogen accumulation, partitioning, and translocation in synthetic-derived wheat cultivars under nitrogen deficiency at the post-jointing stage. *Field Crops Research* 248:107720, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107720>
- López-Bellido L., V. Muñoz-Romero, J. Benítez-Vega, P. Fernández-García, R. Redondo and R. J. López-Bellido (2012) Wheat response to nitrogen splitting applied to a Vertisols in different tillage systems and cropping rotations under typical Mediterranean climatic conditions. *European Journal of Agronomy* 43:24-32, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.05.002>
- Pan W. L., K. K. Kidwell, V. A. McCracken, R. P. Bolton and M. Allen (2020) Economically optimal wheat yield, protein and nitrogen use component responses to varying N supply and genotype. *Frontiers in Plant Science* 10:1790, <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01790>
- Penning de Vries F. W. T., A. H. M. Brunsting, and H. H. van Laar (1974) Products, requirements, and efficiency of biosynthesis: a quantitative approach. *Journal of Theoretical Biology* 45:339-377, [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(74\)90119-2](https://doi.org/10.1016/0022-5193(74)90119-2)
- Rehim A., M. Khan, M. Imran, M. A. Bashir, S. Ul-Allah, M. N. Khan and M. Hussain (2020) Integrated use of farm manure and synthetic nitrogen fertilizer improves nitrogen use efficiency, yield and grain quality in wheat. *Italian Journal of Agronomy* 15:1360, <https://doi.org/10.4081/ija.2020.1360>
- Ron M. M y T. Loewy (2000) modelo de fertilización nitrogenada y fosforada para trigo en el sudoeste bonaerense, Argentina. *Ciencia del Suelo* 18:44-49.
- Salim N. and A. Raza (2019) Nutrient use efficiency (NUE) for sustainable wheat production: a review. *Journal of Plant Nutrition* 43:297-315, <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1676907>
- SAS Institute (2011) SAS/STAT® 9.3 User's Guide. SAS Institute Inc. Cary, North Carolina, USA. 8621 p.
- Schulz R., T. Makary, S. Hubert, K. Hartung, S. Gruber, S. Donath, ... and T. Müller (2014) Is it necessary to split nitrogen fertilization for winter wheat? On-farm research on Luvisols in South-West Germany. *The Journal of Agricultural Science* 153:575-587, <https://doi.org/10.1017/s0021859614000288>
- Simpson R. J., H. Lambers and M. J. Dalling (1983) Nitrogen redistribution during grain growth in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Physiology* 71:7-14, <https://doi:10.1104/pp.71.1.7>
- Velasco J. L., H. S. Rozas, H. E. Echeverría and P. A. Barbieri (2012) Optimizing fertilizer nitrogen use efficiency by intensively managed spring wheat in humid regions: effect of split application. *Canadian Journal of Plant Science* 92:847-856, <https://doi.org/10.4141/cjps2011-146>
- Wallace A. J., R. D. Armstrong, P. R. Grace, C. Scheer, C. and D. L. Partington (2019) Nitrogen use efficiency of ¹⁵N urea applied to wheat based on fertiliser timing and use of inhibitors. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 116:41-56, <https://doi.org/10.1007/s10705-019-10028-x>
- Walsh O. S., S. Shafian and R. J. Christiaens (2018) Nitrogen fertilizer management in dryland wheat cropping systems. *Plants* 7:9, <https://doi.org/10.3390/plants7010009>
- Xue C., G. Schulte auf'm Erley, A. Rossmann, R. Schuster, P. Koehler and K. H. Mühling (2016) Split nitrogen application improves wheat baking quality by influencing protein composition rather than concentration. *Frontiers in Plant Science* 7:738, <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00738>
- Zadoks J. C., T. T. Chang and C. F. Konzak (1974) A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research* 14:415-421, <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x>
- Zapata F. (1990) Técnicas isotópicas en estudios sobre la fertilidad del suelo y la nutrición de plantas. *In: Empleo de Técnicas Nucleares en los Estudios de la Relación Suelo-Planta*. G. Hardarson (ed). FAO-OIEA. Viena, Austria. pp:61-127.
- Zhang X., E. A. Davidson, D. L. Mauzerall, T. D. Searchinger, P. Dumas and Y. Shen (2015) Managing nitrogen for sustainable development. *Nature* 528:51-59, <https://doi.org/10.1038/nature15743>

