

## ALGORITMO SIMPLIFICADO PARA APLICACIÓN RACIONAL DE NITRÓGENO EN TRIGOS HARINEROS EN EL BAJÍO MEXICANO

### SIMPLIFIED ALGORITHM FOR THE RATIONAL APPLICATION OF NITROGEN IN BREAD WHEATS IN THE MEXICAN BAJIO

Andrés Mandujano-Bueno<sup>1</sup>, Roberto Paredes-Melesio<sup>2</sup>, Juan Francisco Buenrostro-Rodríguez<sup>3</sup>, Micaela de la O-Olán<sup>4</sup>, Iván Ortiz-Monasterio<sup>3</sup>, Alfredo Josué Gámez-Vázquez<sup>1</sup>, Hector Daniel Inurreta-Aguirre<sup>5</sup> y Victor Montero-Tavera<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato, México. <sup>2</sup>INIFAP, Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato, México, hasta 2016. <sup>3</sup>Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, Celaya, Guanajuato, México. <sup>4</sup>INIFAP, Campo Experimental Valle de México, Texcoco de Mora, Estado de México, México. <sup>5</sup>INIFAP, Campo Experimental Cotaxtla, Medellín de Bravo, Veracruz, México.

\*Autor de correspondencia (montero.victor@inifap.gob.mx)

#### RESUMEN

Aplicaciones excesivas de fertilizante nitrogenado (N) son comunes en el Bajío, segunda región productiva de México. El sensor Greenseeker™ determina requerimientos de N, mejora su eficiencia de uso, reduce contaminación e incrementa rentabilidad, pero el algoritmo utilizado para recomendar dosis de N en la etapa de encañe utiliza valores del índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) de un área rica en nitrógeno (ARN), cuyo establecimiento intensifica el trabajo y dificulta la transferencia tecnológica debido al tamaño reducido de las unidades productivas; por ello, se generó un algoritmo simplificado que no utiliza ARN, empleando el índice de estimación de biomasa por día (INSEY), estimado con el NDVI de 23 lotes fertilizados con dosis de N a la siembra (DFNI) de 0 a 180 kg ha<sup>-1</sup> y una ARN de 300 kg ha<sup>-1</sup>. La validación del algoritmo fue en un ensayo de seis variedades de trigo fertilizadas a la siembra con 0, 46, 69, 92, 115 y 138 kg ha<sup>-1</sup> de N y complementadas con las cantidades requeridas en la etapa de encañe (FNR) calculadas con el algoritmo. La ganancia en rendimiento y la precisión de las recomendaciones se determinó con un ensayo similar, pero sin N complementario. El diseño experimental fue bloques completos al azar en parcelas divididas, en la parcela grande se colocaron las DFNI y en la chica las variedades. Se generó la ecuación  $DN = 274 - (11458 \times NDVI/DDS)$  que estimó cantidades de N para el reabono entre 118 y 69 kg ha<sup>-1</sup> para complementar las dosis de 46 a 138 kg ha<sup>-1</sup> aplicados en la siembra. El rendimiento promedio fue de 7.5 t ha<sup>-1</sup>, mayor que el promedio regional (5.5 t ha<sup>-1</sup>) obtenido con hasta 350 kg ha<sup>-1</sup> de N.

**Palabras clave:** *Triticum aestivum*, algoritmo de predicción, nitrógeno, sensor óptico, rendimiento.

#### SUMMARY

Excessive applications of nitrogenous fertilizer (N) are common in the Bajío, the second productive region of Mexico. The Greenseeker™ sensor determines N requirements, improves its use efficiency, reduces pollution and increases profitability, but the algorithm used to recommend N doses at the stem elongation stage uses values of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) of an area rich in nitrogen (ARN), whose establishment intensifies work and hinders technology transfer due to the small size of the production units; for this reason, a simplified algorithm that does not use ARN was generated using the biomass estimation index per day (INSEY) estimated with the NDVI of 23 plots fertilized at sowing with doses of N (DFNI) from 0 to 180 kg ha<sup>-1</sup>

plus an ARN of 300 kg ha<sup>-1</sup>. The validation of the algorithm was in a trial of six varieties of wheat fertilized at sowing with 0, 46, 69, 92, 115 and 138 kg ha<sup>-1</sup> of N and supplemented with the amounts required at the stem elongation stage (FNR) calculated with the algorithm. The gain in yield and the accuracy of recommendations were determined with a similar trial, but without complementary N. The experimental design was randomized complete blocks in split plots, DFNI were placed in the whole plot and varieties in the split plot. The equation  $DN = 274 - (11458 \times NDVI/DDS)$  was generated, which estimated amounts of N for re-fertilization between 118 and 69 kg ha<sup>-1</sup> to complement the doses of 46 to 138 kg ha<sup>-1</sup> applied at sowing. The average yield was 7.5 t ha<sup>-1</sup>, higher than the regional average (5.5 t ha<sup>-1</sup>) obtained with up to 350 kg ha<sup>-1</sup> of N.

**Index words:** *Triticum aestivum*, nitrogen, optical sensor, prediction algorithm, yield.

#### INTRODUCCIÓN

El Bajío, con 1,100,000 ha distribuidas en los estados de Querétaro, Guanajuato, Jalisco y Michoacán (Solís *et al.* 2018), es la segunda región productora de trigo (*Triticum aestivum*) de México (Solís *et al.*, 2017). Uno de los principales problemas es la baja rentabilidad (Ledesma *et al.*, 2010) derivada de los altos costos de producción, particularmente los del fertilizante. Durante el ciclo otoño invierno se aplican hasta 350 kg ha<sup>-1</sup> de N al trigo de riego (Grageda-Cabrera *et al.*, 2018), lo que de acuerdo con el sistema de costos agrícolas del FIRA (2022) representa 52 % de los costos directos de producción. Con esta cantidad de N se obtienen sólo 5.0 t ha<sup>-1</sup> de grano (Grageda-Cabrera *et al.*, 2018) y se excede la recomendación de aplicar 240 kg ha<sup>-1</sup> (fraccionados 50 % a la siembra y 50 % en el primer riego de auxilio, 45 días después de la siembra) para obtener hasta 7.0 t ha<sup>-1</sup> de grano (Solís *et al.*, 2007). Grageda-Cabrera *et al.* (2018) demostraron que el trigo absorbe entre 20 y 35 % del fertilizante nitrogenado y el resto se pierde por lixiviación, volatilización, desnitrificación

o escurrimiento, ocasionando pérdidas económicas y contaminación ambiental (McLellan *et al.*, 2018; Santillano-Cázares *et al.*, 2013). Una alternativa para determinar la cantidad óptima de fertilizante nitrogenado en una etapa específica del cultivo consiste en usar sensores ópticos que calculan índices de vegetación a partir de mediciones no destructivas de la radiación reflejada y absorbida por las hojas, los cuales se relacionan con el contenido de clorofila (Ali, 2020; Aula *et al.*, 2020). Cuando un cultivo se aleja de su color verde natural, puede deberse a una deficiencia de N (Xiong *et al.*, 2018).

El GreenSeeker™ es un sensor óptico que calcula el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) mediante la ecuación  $NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$ , donde NIR es la reflectancia de la banda en el infrarrojo cercano y Red es la reflectancia de la banda en el rojo. Entre 1992 y 2005 Raun *et al.* (2002), Moges *et al.* (2004) y Raun *et al.* (2005) desarrollaron un algoritmo funcional, el Algoritmo de Optimización de Fertilizante Nitrogenado (NFOA, por sus siglas en inglés) "WheatN.1.0", que utiliza el NDVI del Greenseeker™ para estimar la fertilización nitrogenada requerida (FNR) por el trigo de invierno entre las etapas de macollaje final (Feekes 4, Zadoks 2.8) y encañe inicial (Feekes 6, Zadoks 3.1). Este algoritmo consta de tres componentes, el primero es una ecuación que, en conjunto con otros parámetros como la extracción de N y la eficiencia en el uso del N, predice el rendimiento de grano a partir del índice de biomasa por día (INSEY) de un área de diagnóstico, calculado como el cociente del NDVI entre el número de días desde la siembra del cultivo hasta el día de estimación (Ali, 2020; Mahana *et al.*, 2022). El empleo de NFOA en diversas regiones agroclimáticas requiere el desarrollo de la ecuación de predicción del rendimiento específica para cada región (Santillano-Cázares *et al.*, 2013); en el Bajío, la ecuación  $Y = 1497.1^{(INSEY \times 121.75)}$  fue desarrollada por Paredes *et al.* (2014) con dosis de N de 0 a 300 kg ha<sup>-1</sup>, donde Y representa el rendimiento predicho e INSEY es el índice de biomasa por día aplicable a parcelas establecidas en la región del Bajío.

El segundo componente del NFOA consiste en establecer áreas ricas en nitrógeno (ARN) para comparar con la práctica del agricultor o área de diagnóstico (AD) (Ali, 2020; Ortiz-Monasterio y Raun, 2007; Raun *et al.*, 2002; 2005; Singh y Ali, 2022), para lo cual se obtienen los valores NDVI del ARN y el AD; como tercer componente del algoritmo, el promedio de cada área se introduce en el NFOA para calcular la fertilización nitrogenada requerida (FNR) a partir del cociente de la diferencia del N removido (extracción de N en el grano) en el rendimiento predicho con la ecuación de Paredes *et al.* (2014), con los valores NDVI de la ARN (NRARN) y del AD (NRAD), dividido por la eficiencia esperada en el uso del N, que según Grageda-Cabrera *et al.*

(2018) varía de 0.20 a 0.35; esto es  $FNR = (NRFRN - NRAD) / 0.35$ .

La metodología descrita, que incluye establecer un ARN, es efectiva en superficies de cultivo grandes, donde el costo relativo de establecerla es menor que en unidades pequeñas de producción como las del Bajío, donde la tenencia de superficie agrícola es de siete hectáreas en promedio y donde, además, esa cantidad de tierra se encuentra desagregada en varias parcelas (SAGARPA, 2010); por ello, el objetivo de este estudio fue generar y validar un algoritmo simplificado que utilice valores NDVI absolutos basado en el NFOA, sin emplear el ARN, para calcular la cantidad óptima de fertilizante nitrogenado complementario a la dosis aplicada en la siembra de trigos harineros en el Bajío.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Generación del algoritmo simplificado de predicción del requerimiento de nitrógeno

En los años de 2009 a 2013 y de 2017 a 2018 en los ciclos agrícolas otoño-invierno se establecieron 23 lotes experimentales de trigo con las variedades Cortazar S-94, Bárcenas S-2002, Urbina S-2007 y Maya S-2007 con agricultores participantes, en suelos vertisoles representativos del Bajío en los municipios de Acámbaro, Celaya, Manuel Doblado, Pénjamo, Salamanca, Salvatierra y Valle de Santiago, en el estado de Guanajuato, y José Sixto Verduzco en Michoacán. Se establecieron seis tratamientos de fertilización: 0, 60, 90, 120, 150 y 180 kg ha<sup>-1</sup> de N (AD<sub>1</sub>, AD<sub>2</sub>, AD<sub>3</sub>, AD<sub>4</sub>, AD<sub>5</sub> y AD<sub>6</sub>, respectivamente), aplicados al momento de la siembra, bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones; estas dosis de N incluyeron las cantidades típicas aplicadas por el productor. Cada unidad experimental fue de ocho surcos sembrados a doble hilera con longitud de 5 m. Como parcela útil para la toma de datos NDVI se consideraron los cuatro surcos centrales; además, en cada lote se estableció un ARN de 12 surcos de 50 m de largo en condiciones similares, con 300 kg ha<sup>-1</sup> de N. Para descartar deficiencia de otros nutrientes que pudiera influir en el verdor y biomasa del trigo y confundirse con efecto de N, los tratamientos de fertilización y ARN fueron complementados con P (60 kg ha<sup>-1</sup>), K (30 kg ha<sup>-1</sup>), Zn (1.50 kg ha<sup>-1</sup>), Fe (0.50 kg ha<sup>-1</sup>), Mn (0.10 kg ha<sup>-1</sup>), Cu (0.10 kg ha<sup>-1</sup>), B (0.15 kg ha<sup>-1</sup>) y Mo (0.02 kg ha<sup>-1</sup>). La densidad de siembra fue de 120 kg ha<sup>-1</sup> de semilla. Las siembras se realizaron en la segunda quincena de diciembre. Durante el ciclo del cultivo se aplicaron cuatro riegos, uno al momento de la siembra y tres adicionales, a los 45, 75 y 100 días después de la siembra (dds).

En cada lote experimental, se registraron los valores NDVI de cada tratamiento ( $NDVI_{AD1}$ ,  $NDVI_{AD2}$ , ...,  $NDVI_{ADn}$ ) y del ARN ( $NDVI_{ARN}$ ) con un sensor óptico (GreenSeeker™ Handheld Crop Sensor modelo HCS-100 Trimble Navigation Limited, Sunnyvale, California, USA) en la etapa de encañe (45 dds), entre 60 y 90 cm sobre el dosel vegetal del trigo. Con estos valores se calculó el INSEY para cada tratamiento ( $INSEY_{AD1}$ ,  $INSEY_{AD2}$ , ...,  $INSEY_{ADn}$ ) y para el área rica en N ( $INSEY_{ARN}$ ); empleando  $INSEY_{ARN}$  como variable dependiente e  $INSEY_{AD1}$ ,  $INSEY_{AD2}$ , ...,  $INSEY_{ADn}$  como variable independiente se construyó la ecuación de regresión lineal simple (EC1)  $INSEY_{FRN} = (0.8198 \times InseyAD) + 0.0044$  y se calculó el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) (Figura 1A) para estimar el  $INSEY_{ARN}$  a partir del  $INSEY_{AD}$ , dada la alta correlación entre ambas variables. Posteriormente, se calculó la FNR para cada tratamiento ( $FNR_{AD1}$ ,  $FNR_{AD2}$ , ...,  $FNR_{ADn}$ ), introduciendo los mismos valores NDVI al algoritmo NFOA (Raun *et al.*, 2002) modificado con la ecuación de predicción del rendimiento de trigo para el Bajío de Paredes *et al.* (2014); además, se calculó la diferencia entre el INSEY del área rica y el INSEY de cada tratamiento: ( $INSEY_{Dif} = INSEY_{FR} - INSEY_{ADn}$ ). Con estos datos se construyó otra ecuación de regresión lineal simple:  $FNR = (63583 \times InseyDif) - 5.9453$  (EC2); para esto, se usó  $INSEY_{Dif}$  como variable independiente y  $FNR_{ADn}$  como variable dependiente. De igual manera, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ). La EC2 se obtuvo para calcular la FNR con base en la diferencia de valores INSEY de la ARN y del AD.

Finalmente, el modelo de predicción (EC1) que calcula el INSEY de la ARN utilizando el INSEY del AD, se sustituyó en el modelo de predicción EC2, que calcula la FNR a partir de la diferencia entre los valores INSEY de la ARN y del AD, y algebraicamente se redujeron términos semejantes para generar el algoritmo de predicción simplificado  $FNR = (274) - (11458)(INSEY_{ADn})$  (EC3), que estima la FNR para el cultivo de trigo en la etapa de encañe, como complemento de la fertilización realizada en la siembra, utilizando únicamente el promedio de los valores NDVI provistos por el sensor GreenSeeker™ del área de diagnóstico.

### Validación del algoritmo de predicción de requerimiento de nitrógeno

El lote experimental donde se establecieron los dos ensayos complementarios para la evaluación de las recomendaciones generadas con el algoritmo simplificado se localizó en el Campo Experimental Bajío del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en Roque, municipio de Celaya, Guanajuato, México. Se estableció en el ciclo otoño-invierno 2018-2019, en un suelo vertisol representativo de los suelos del Bajío, con 1.8 % de materia orgánica

determinada por el método Walkley y Black, pH de 8.15 determinado con potenciómetro en relación 1:2 agua, 29.66 ppm de N inorgánico extraído con solución de cloruro de potasio 2N y analizado por destilación con óxido de magnesio y aleación Devarda, 19.2 ppm de fósforo P-Bray, y 302 ppm de potasio extraído con acetato de amonio 1N y pH 7 cuantificado por absorción atómica. Se estableció un lote con dos ensayos complementarios en los que se evaluaron seis dosis de fertilización nitrogenada inicial (DFNI): 0, 46, 69, 92, 115 y 138 kg ha<sup>-1</sup> de N aplicadas en seis variedades de trigo harinero. En el primer ensayo al momento de la siembra se aplicaron las DFNI y en la etapa fenológica de encañe Z3.3 de Zadoks *et al.* (1974) se complementaron con las cantidades de fertilizante nitrogenado requerido (FNR) calculadas con el algoritmo simplificado (EC3), utilizando los valores NDVI del dosel vegetal de cada unidad experimental; la fuente de N fue urea. En el segundo ensayo únicamente se aplicaron las DFNI al momento de la siembra. Para ambos ensayos el diseño experimental fue de bloques completos al azar con tres repeticiones con arreglo en parcelas divididas; en la parcela grande se ubicaron las DFNI, mientras que en la parcela chica se evaluaron las variedades de trigo harinero Salamanca S-75, Cortazar S-94, Bárcenas S-2002, Urbina S-2007, Maya S-2007 y Faisán S-2016. Cabe señalar que Cortazar S-94 es la variedad de trigo harinero más utilizada en el Bajío (Solís *et al.*, 2017) y Faisán S2016 la liberada más recientemente para esta región (Solís *et al.*, 2019). Cada parcela constó de cuatro surcos de 3 m de largo sembrados a doble hilera. La parcela útil fue de 2 m de longitud de los dos surcos centrales. Los tratamientos de fertilización fueron complementados con 60 kg de fósforo en forma de fosfato diamónico (DAP) y 30 kg de potasio en forma de cloruro aplicados al momento de la siembra, práctica común entre los productores del Bajío. La siembra y los riegos fueron similares a los descritos líneas arriba.

En la etapa de madurez fisiológica se cosechó cada unidad experimental, el grano se pesó y se determinó el porcentaje de humedad para ajustarla al 13 %, con estos datos se calculó el rendimiento de grano en kg ha<sup>-1</sup> (RG); además, en el primer ensayo se calculó el índice de cosecha (IC) mediante el cociente entre el peso del grano (PG) y biomasa total (BT) (Miranda *et al.*, 2016) y se determinaron las variables número de tallos m<sup>-2</sup> (NT), longitud de espiga (LE, cm) medida desde la base hasta los granos apicales, BT en g por unidad de superficie de la parte aérea del cultivo, cortada a ras del suelo, y peso de 200 granos (P200G, g), estos componentes de rendimiento de grano de trigo son similares a los utilizados por Martínez *et al.* (2020). Se determinó la ganancia de rendimiento (AR) restando el RG de cada unidad experimental del segundo ensayo al RG del primer ensayo de la unidad experimental correspondiente y, finalmente, se calculó el índice de eficiencia del uso del

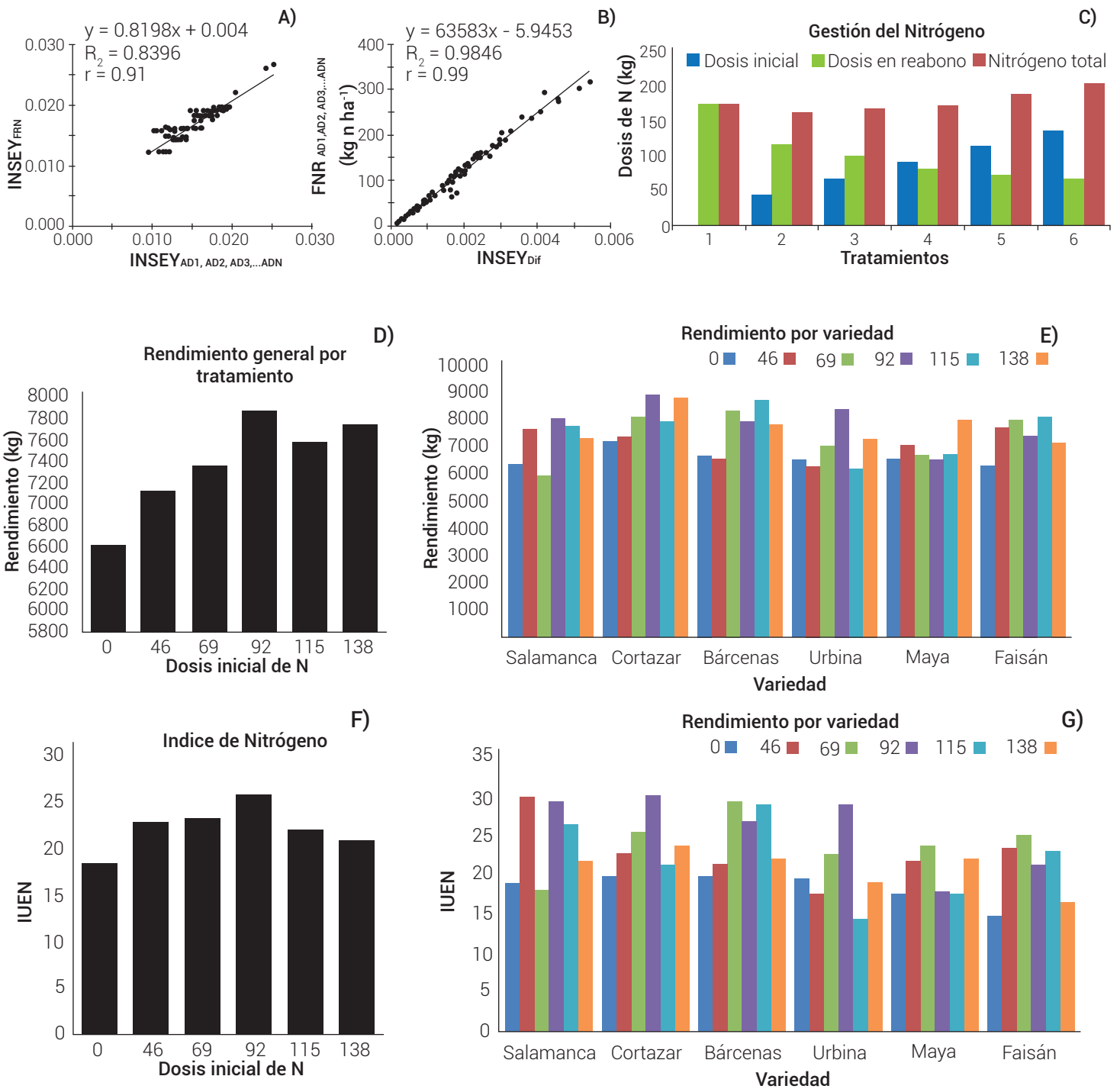


Figura 1. A) Regresión lineal (EC1) entre los valores INSEY de tratamientos crecientes de N y los valores INSEY del ARN en 23 lotes experimentales de la región del Bajío, B) regresión lineal (EC2) entre las cantidades de N calculadas con la ecuación de Raun *et al.* (2002) modificada por Paredes *et al.* (2014) y la diferencia del INSEY entre el área rica en nitrógeno y el INSEY de cada tratamiento, C) gestión de nitrógeno que muestra dosis inicial, dosis recomendada por el nuevo algoritmo y nitrógeno total por cada variedad, D) rendimiento promedio de las seis variedades por cada tratamiento. E) rendimiento de cada variedad considerando los seis tratamientos, F) índice de eficiencia en el uso del nitrógeno, G) índice de eficiencia en el uso del nitrógeno por variedad en cada tratamiento.

nitrógeno (IN) de la siguiente manera:  $IN = AR / Nt$ , donde  $AR = RG2 - RG1$ , ganancia de rendimiento entre el segundo y el primer ensayo y  $Nt$  es la cantidad de N total aplicada en cada tratamiento.

A las variables de respuesta del primer ensayo de validación se les aplicó análisis de varianza de dos vías, donde las variables evaluadas fueron RG, IC, PG, BT, NT, LE, P200G, AR e IN que se analizaron con el procedimiento GLM del programa SAS 9.3 (SAS Institute, 2003), y una prueba de medias de Tukey ( $P \leq 0.05$ ), mientras que para el segundo ensayo únicamente se practicó prueba de comparación de medias Tukey ( $P \leq 0.05$ ) a las variables RG y AR.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Generación del modelo de predicción

El alto coeficiente de correlación de Pearson ( $r = 0.91$ ) del modelo de predicción EC1 (Figura 1A) indica que con este modelo es posible estimar el  $INSEY_{ARN}$  a partir del  $INSEY_{AD}$ , prescindiendo así de la siembra del área rica para calcular la FNR; asimismo, el alto coeficiente de correlación de Pearson ( $r = 0.99$ ) del modelo de predicción EC2 (Figura 1B) indica que con este modelo es posible utilizar la diferencia entre el  $INSEY_{ARN}$  y el  $INSEY_{AD}$  para estimar la FNR; de esta manera, es posible sustituir la NFOA en la que se utilizan los datos de NDVI de una ARN. Al sustituir el modelo de predicción EC1 en el modelo de predicción EC2, se obtuvo el algoritmo simplificado (EC3)  $FNR = (274) - (11458)(NDVI_{AD} / DDS)$ , donde FNR es la dosis de N por aplicar,  $NDVI_{AD}$  es el promedio de las lecturas NDVI de cada área por diagnosticar con el sensor GreenSeeker™ y DDS son los días después de la siembra del cultivo hasta la toma de datos con el sensor. El algoritmo simplificado EC3 únicamente requiere el valor NDVI del área de diagnóstico, por lo que no se requiere del establecimiento de una ARN para su aplicación.

### Validación *in situ* del algoritmo de predicción

El análisis de varianza demostró que la FNR, calculada con la EC3 para cada AD en la etapa de encañe, correlaciona directamente con las DFNI con diferencias estadísticamente significativas ( $P \leq 0.01$ ). Por sí sola, la DFNI generó 99 % de la variabilidad total del modelo, por lo que las FNR para cada DFNI en el intervalo de 0 a 138 kg ha<sup>-1</sup> también fueron diferentes. La variación debida a las variedades fue menor que la debida a las dosis, por lo que el algoritmo simplificado estimó dosis de N complementarias similares en las seis variedades.

La DFNI generó la mayor variabilidad en la expresión de

la biomasa total (BT) y longitud de espiga (LE), con 69.1, 67.8 y 51.6 % de la variación total de las fuentes dosis, variedades y su interacción, respectivamente; por otro lado, el efecto de las variedades (V) fue el de mayor importancia estadística ( $P \leq 0.01$ ) en la definición del peso de 200 granos (P200G), número de tallos (NT) e índice de cosecha (IC), dado que generaron el 69.2, 65.5 y 50 %, respectivamente, de la variación total de las fuentes mencionadas, y superaron el efecto de las DFNI. Esta situación, de acuerdo con Ivić *et al.* (2021), está relacionada con la capacidad de absorción y utilización del N de las diferentes variedades de trigo, de las cuales, las menos eficientes utilizan el N para generar biomasa y las más eficientes para aumentar el rendimiento de grano, tal como lo explican Silva *et al.* (2020).

Para el rendimiento, las DFNI y las V permitieron observar diferencias estadísticas ( $P \leq 0.01$ ) al generar el 44 y 41 % de variación, respectivamente. Al menos una dosis de fertilización inicial y una variedad presentaron una respuesta diferente del resto de DFNI y V.

La prueba de comparación de medias (Tukey,  $P \leq 0.05$ ) para las variables RG y FNR generó tres grupos estadísticos para la fuente de variación DFNI (Cuadro 2). El primer grupo corresponde a la dosis de 0 kg ha<sup>-1</sup> de N, donde el algoritmo simplificado recomendó la mayor cantidad de N complementario, 178.5 kg ha<sup>-1</sup> y donde se registró el menor RG con 6.6 t ha<sup>-1</sup>. El segundo grupo incluyó las DFNI de 46 y 69 kg ha<sup>-1</sup> de N, para las que la EC3 calculó dosis medias complementarias entre 100 y 118 kg ha<sup>-1</sup> y donde el RG promedio fue de 7.2 t ha<sup>-1</sup>; finalmente, el tercer grupo estuvo conformado por las DFNI de 92, 115 y 138 kg ha<sup>-1</sup> de N, para las que el algoritmo simplificado calculó las cantidades más bajas (81, 74 y 69 kg ha<sup>-1</sup> respectivamente) y para las que el RG promedio fue de 7.7 t ha<sup>-1</sup> (Cuadro 2). Lo anterior indica que el algoritmo simplificado recomendó cantidades adecuadas de N complementario para todo el intervalo de DFNI empleadas. LE, BT y P200G mostraron la menor expresión con respecto al resto de tratamientos. La DFNI de 0 kg ha<sup>-1</sup> de N indujo el rendimiento más bajo, debido probablemente a que la falta de N durante los primeros 45 DDS generó mayor estrés nutrimental, lo que afectó el desarrollo del cultivo, situación contrastante con las DFNI 115 y 138 kg ha<sup>-1</sup> de N, con las que se obtuvieron los valores más altos para las variables LE y P200G, no así para la mayor BT, donde el mayor valor se encontró en la DFNI de 92 kg ha<sup>-1</sup> de N. Los tratamientos de fertilización nitrogenada inicial no generaron diferencias estadísticas para las variables NT e IC; la variación en estas características dependió de cada variedad, lo que se confirma en el análisis de varianza (Cuadro 1).

**Cuadro 1. Cuadrados medios del análisis de varianza para rendimiento de grano y sus componentes de seis variedades de trigo harinero fertilizadas al momento de la siembra con dosis de 0 a 138 kg ha<sup>-1</sup> de N.**

FV	GL	FNR	NT	LE	BT	P200G	IC	RG
Bloques	2	577.8	121.4	0.37	45,928	0.34	0.003	1,060,378
DFNI	5	28,739.2 **	140.3	2.60 **	945,877 **	1.97 **	0.005	3,740,335 **
Error a	10	442.0 **	263.9 *	0.32	116,659	0.20	0.002	554,983
Variedad (V)	5	154.6	348.5 **	2.19 **	364,224 **	4.86 **	0.008 **	3,499,448 **
DFNI × V	25	78.8	43.0	0.25	85,202	0.19	0.003	1,247,718
Error b	60	70.2	118.8	0.20	66,527	0.21	0.002	775,160
CV DFNI (%)		20.37	16.28	5.87	11.45	4.08	10.33	10.12
CV Variedad (%)		8.12	10.93	4.66	8.64	4.22	12.11	11.96

\*:  $P \leq 0.05$ , \*\*:  $P \leq 0.01$ , FV: fuentes de variación, GL: grados de libertad, DFNI: dosis de fertilización nitrogenada inicial, FNR: cantidad de N complementario al aplicado en la siembra, calculada con el algoritmo simplificado (EC3), NT: número de tallos, LE: longitud de espiga, BT: biomasa total de la muestra, P200G: peso de 200 granos, IC: índice de cosecha, RG: rendimiento de grano ajustado al 13 % de humedad, CV: coeficiente de variación.

**Cuadro 2. Comparación de medias de rendimiento de grano y sus componentes de seis variedades de trigo harinero fertilizadas a la siembra con dosis de 0 a 138 kg de N ha<sup>-1</sup>.**

FV	FNR (Kg ha <sup>-1</sup> )	NIT TOT	NT	LE (cm)	BT (g)	P200G (g)	IC	RG (kg ha <sup>-1</sup> )	Prod/ Kg de N	AG
<b>DFNI</b>										
0 kg N ha <sup>-1</sup>	175.8a	175.8	96a	9.0b	11,071c	10.2b	0.42a	6602b	37.5	3230a
46 kg N ha <sup>-1</sup>	118.0b	164	99a	9.5ab	11,496bc	10.8a	0.43a	7102ab	43.3	2872a
69 kg N ha <sup>-1</sup>	101.1cb	170.1	99a	9.9a	12,479abc	11.0a	0.40a	7336ab	43.1	2196bc
92 kg N ha <sup>-1</sup>	80.9cd	172.9	101a	9.8a	12,925ab	11.1a	0.43a	7841a	45.3	2705a
115 kg N ha <sup>-1</sup>	74.1d	189.1	101a	10.0a	13,167a	11.0a	0.40a	7555a	40.0	1984c
138 kg N ha <sup>-1</sup>	69.3d	207.3	104a	9.9a	13,454a	11.1a	0.39a	7717a	37.2	1856c
<b>Variedades de trigo harinero</b>										
Salamanca S-75	105.3a		102ab	9.6b	12,321ab	10.7c	0.40ab	7162b	68.0	2514ab
Cortazar S-94	102.3a		95b	9.7ab	12,842a	11.2b	0.43ab	8036a	78.5	2852a
Bárceñas S-2002	100.8a		106a	9.1c	12,521a	10.3c	0.44a	7664ab	76.0	2620ab
Urbina S-2007	99.1a		100ab	10.2a	12,404ab	10.8bc	0.39b	6945b	70.1	2125b
Maya S-2007	105.1a		95b	9.9ab	11,383b	11.7a	0.42ab	6908b	65.7	2193ab
Faisán S-2016	106.6a		101ab	9.6b	13,113a	10.4c	0.40ab	7437ab	69.8	2539ab

Valores con la misma letra en las columnas, dentro de cada factor de variación no son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). FV: fuente de variación, DFNI: dosis de fertilización nitrogenada inicial, FNR: cantidad de N complementario al aplicado en la siembra, calculada con el algoritmo simplificado (EC3), NIT TOT: cantidad de nitrógeno total aplicado como fertilizante, NT: número de tallos en 0.24 m<sup>2</sup>, LE: Longitud de espiga, BT: biomasa total de la muestra, P200G: peso de 200 granos, IC: índice de cosecha, RG: rendimiento de grano ajustado al 13 % de humedad. AG: diferencia entre RG del primer y segundo ensayo.

El análisis de medias en las variables del primer experimento del ensayo de validación indica que el rendimiento obtenido con la DFNI de 92 kg ha<sup>-1</sup> de N es suficiente para obtener valores similares de RG que con las DFNI de 115 y 138 kg ha<sup>-1</sup>, lo que indica que este es el mejor tratamiento para asegurar los mayores rendimientos y rentabilidad del cultivo. La fertilización total de N en los

tratamientos varió entre 164 y 207 kg ha<sup>-1</sup>, cuyo valor superior es similar a los 200 y 210 kg ha<sup>-1</sup> recomendados por Solís *et al.* (2013) para producir grano de trigo harinero bajo condiciones de riego durante otoño-invierno en el Bajío, e inferiores a las dosis de hasta 350 kg ha<sup>-1</sup> aplicadas por los productores para obtener rendimientos similares, en el mejor de los casos, a los rendimientos logrados

en este estudio. Por lo tanto, la FNR de 164 representa un ahorro sustantivo en la aplicación de N, sin pérdidas significativas en la producción.

El ahorro de N utilizando el algoritmo simplificado fue de hasta 140 kg ha<sup>-1</sup> en relación con las cantidades tradicionales aplicadas por los productores y de hasta 30 kg ha<sup>-1</sup>, en contraste con la recomendación generalizada para el Bajío de aplicar 240 kg ha<sup>-1</sup> (Solís *et al.*, 2013). Con base en lo anterior, se estima que en las 69,500 ha de producción de trigo harinero de riego del Bajío es posible dejar de aplicar hasta 9730 t de N, lo cual a un precio promedio actual de \$39.7 MXN por kg, representa ahorros económicos de más de 386 millones MXN. Además del beneficio económico, la gestión del N con el sensor GreenSeeker™ y el algoritmo simplificado genera beneficios ambientales, ya que no se liberan excesos de N al ambiente; esto coincide con lo encontrado por Roberts *et al.* (2010), quienes utilizaron el mismo sensor para gestionar el N en trigo. Cabe destacar que en el presente estudio las reducciones de N no afectaron negativamente el rendimiento, situación similar a la reportada por Butchee *et al.* (2011), quienes también utilizaron el GreenSeeker™.

Respecto al RG generado por efecto de las V, la prueba de medias indicó que, con un rendimiento de 8036 kg ha<sup>-1</sup>, Cortazar S-94 fue la mejor variedad, la cual superó estadísticamente ( $P \leq 0.05$ ) a Maya S-2007, Urbina S-2007 y Salamanca S-75, que en promedio rindieron 7005 kg ha<sup>-1</sup>, y fue estadísticamente igual a Bárcenas S-2002 y Faisán S-2016, que obtuvieron un rendimiento promedio de 7550 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 1E); estas dos últimas junto con Cortazar S-94, presentaron la mayor BT e IC.

La prueba de medias practicada al RG y a la ganancia de rendimiento del segundo ensayo de validación (Cuadro 2, columna AG), donde se llevó el cultivo hasta producción sólo con las dosis de fertilización nitrogenada inicial, indica que el rendimiento más alto (5861 kg ha<sup>-1</sup>) se obtuvo al aplicar una dosis única de 138 kg ha<sup>-1</sup> de fertilizante nitrogenado al momento de la siembra; sin embargo, cuando se aplicó reabono en cantidades determinadas por el algoritmo simplificado, el aumento en el rendimiento de grano en este tratamiento fue de 1856 kg ha<sup>-1</sup>, pero el mayor rendimiento absoluto se obtuvo con la dosis inicial de 92 kg de N a la siembra y reabono con 81 kg (Figuras 1C y 1D). El mayor rendimiento de grano al aplicar una dosis única de fertilizante nitrogenado en la siembra se obtuvo en la variedad Cortazar S-94.

La mayor ganancia de rendimiento de grano al reabonar con base en la dosis de FNR calculada con el algoritmo simplificado (3230 kg ha<sup>-1</sup>) se logró con la DFNI de 0 kg N ha<sup>-1</sup> (Cuadro 2, columna AG); sin embargo, esta dosis inicial

no fue la mejor, ya que al reabonar se obtuvo un rendimiento menor de 1240 kg ha<sup>-1</sup> de grano, comparado con la DFNI de 92 kg ha<sup>-1</sup>, con la que se logró el mayor rendimiento. Esta situación fue igual para las DFNI de 46 y 69 kg ha<sup>-1</sup> N. La DFNI de 92 kg ha<sup>-1</sup> se agrupó con las dosis que lograron la mayor recuperación de rendimiento al reabonar según el algoritmo simplificado, además de que fue la dosis que produjo el mayor rendimiento de grano. Esto sugiere que la dosis de 92 kg ha<sup>-1</sup> es la dosis inicial más adecuada para aplicar al momento de la siembra del trigo harinero (Figura 1D). Por otra parte, la mayor eficiencia en el uso del nitrógeno (NI) se obtuvo también con la dosis inicial de 92 kg ha<sup>-1</sup> de N y reabono según el algoritmo simplificado (Figura 1F).

Con 2852 kg ha<sup>-1</sup> de grano, la variedad que logró la mayor recuperación en rendimiento fue Cortazar S-94, lo que indica alta capacidad de absorción y eficiencia en la utilización del N para la producción de grano (Cuadro 2, columna AG), que de acuerdo con Silva *et al.* (2020) es característico de algunas variedades de trigo, mismas que deben ser consideradas para el mejoramiento genético de esta especie.

## CONCLUSIONES

Se generó un algoritmo para la gestión racional de nitrógeno en trigos harineros en el Bajío mexicano, basado en un algoritmo simplificado que utiliza los valores absolutos del índice de vegetación de diferencia no normalizada para calcular, en la etapa de encañe, la cantidad óptima de fertilizante nitrogenado complementario a la dosis aplicada en la siembra. El algoritmo estimó dosis óptimas de N complementario al aplicado en la siembra para seis variedades de trigo harinero producidas bajo condiciones de riego y fertilizadas al momento de la siembra con dosis de entre 46 y 138 kg ha<sup>-1</sup> de N, lo que permitió obtener una producción promedio de 7.5 t ha<sup>-1</sup> de grano, que supera el rendimiento de la región del Bajío mexicano con 2.0 t ha<sup>-1</sup>. El prescindir de área rica en N para determinar la cantidad óptima de N complementario facilita el uso del sensor óptico GreenSeeker™ y permite extender su uso como herramienta de diagnóstico y gestión del fertilizante nitrogenado, lo cual permite incrementar la eficiencia de su uso y la rentabilidad del cultivo de trigo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ali M. A. (2020) Development of an algorithm for optimizing nitrogen fertilization in wheat using GreenSeeker proximal optical sensor. *Experimental Agriculture* 56:688-698, <https://doi.org/10.1017/S0014479720000241>
- Aula L., P. Omara, E. Nambi, F. B. Oyebiyi and W. R. Raun (2020) Review of active optical sensors for improving winter wheat nitrogen use efficiency. *Agronomy* 10:1157, <https://doi.org/10.3390/agronomy10081157>

- Butchee K. S., J. May and B. Arnall (2011) Sensor based nitrogen management reduced nitrogen and maintained yield. *Crop Management* 10:1-5, <https://doi.org/10.1094/CM-2011-0725-01-RS>
- FIRA, Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (2022) Sistema de costos agrícolas, Resumen de costos, trigo OI 2021-2022. Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. Ciudad de México. <https://www.fira.gob.mx/InfEspDtoXML/abrirArchivo.jsp?abreArc=90966> (Julio 2022).
- Grageda-Cabrera O. A., S. S. González-Figueroa, J. A. Vera-Núñez, J. F. Aguirre-Medina y J. J. Peña-Cabriales (2018) Efecto de los biofertilizantes sobre la asimilación de nitrógeno por el cultivo de trigo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 9:281-289, <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i2.1071>
- Ivić M., S. Grljušić, B. Popović, L. Andrić, I. Playšin, K. Dvojković and D. Novoselović (2021) Screening of wheat genotypes for nitrogen deficiency tolerance using stress screening indices. *Agronomy* 11:1544, <https://doi.org/10.3390/agronomy11081544>
- Ledesma R. L., E. Solís M., M. P. Suaste F. y M. F. Rodríguez G. (2010) Relación de métodos de labranza, siembra, riego y dosis de nitrógeno con el rendimiento de trigo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 1:55-63.
- Mahana S., S. R. Padhan and S. R. Padhan (2022) An insight into GreenSeeker technology: a vital tool for precision nutrient management. *Biotica Research Today* 4:26-28.
- Martínez C. E., E. Espitia R., H. E. Villaseñor M. y R. Hortelano S. R. (2020) La productividad del trigo harinero bajo diferentes condiciones de riego. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 11:1349-1360, <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i6.2050>
- McLellan E. L., K. G. Cassman, A. J. Eagle, P. B. Woodbury, S. Sela, C. Tonitto, ... and H. M. van Es (2018) The nitrogen balancing act: tracking the environmental performance of food production. *BioScience* 68:194-203, <https://doi.org/10.1093/biosci/bix164>
- Miranda D. L. E., C. López C., I. Benítez R. y J. A. Mejía C. (2016) Desarrollo radical y rendimiento en diferentes variedades de trigo, cebada y triticale bajo condiciones limitantes de humedad del suelo. *Terra Latinoamericana* 34:393-407.
- Moges S. M., W. R. Raun, R. W. Mullen, K. W. Freeman, G. V. Johnson and J. B. Solie (2004) Evaluation of green, red, and near infrared bands for predicting winter wheat biomass, nitrogen uptake, and final grain yield. *Journal of Plant Nutrition* 27:1431-1441, <https://doi.org/10.1081/PLN-200025858>
- Ortiz-Monasterio J. I. and W. Raun (2007) Reduced nitrogen and improved farm income for irrigated spring wheat in the Yaqui Valley, Mexico, using sensor based nitrogen management. *The Journal of Agricultural Science* 145:215-222, <https://doi.org/10.1017/S0021859607006995>
- Paredes M. R., A. Mandujano B., J. F. Buenrostro R., G. Jaralillo L. y M. P. Alamilla G. (2014) Estimación de la dosis óptima de fertilización nitrogenada mediante el uso del sensor portátil GreenSeeker™ en Guanajuato. In: *Tecnología para la Producción Sustentable de Trigo de Riego en El Bajío*. E. Solís M. y A. Rodríguez G. (comps.). Campo Experimental Bajío, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Celaya, Guanajuato. México. pp:92-101.
- Raun W. R., J. B. Solie, G. V. Johnson, M. L. Stone, R. W. Mullen, K. W. Freeman, ... and E. V. Lukina (2002) Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. *Agronomy Journal* 94:815-820, <https://doi.org/10.2134/agronj2002.8150>
- Raun W. R., J. B. Solie, M. L. Stone, K. L. Martin, K. W. Freeman, R. W. Mullen, ... and G. V. Johnson (2005) Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 36:2759-2781, <https://doi.org/10.1080/00103620500303988>
- Roberts D. F., N. R. Kitchen, K. A. Sudduth, S. T. Drummond and P. C. Scharf (2010) Economic and environmental implications of sensor-based nitrogen management. *Better Crops with Plant Food* 94:4-6.
- SAGARPA, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2010) Diagnóstico Sectorial en el Estado de Guanajuato. SAGARPA. Guanajuato, México. 516 p.
- Santillano-Cázares J., A. López L., I. Ortiz M. y W. R. Raun (2013) Uso de sensores ópticos para la fertilización de trigo (*Triticum aestivum* L.). *Terra Latinoamericana* 31:95-103.
- SAS Institute (2003) The SAS system for Windows, release 9.1.3. SAS Institute. Cary, North Carolina, USA.
- Silva O. A., G. A. Slafer, A. K. Fritz and R. P. Lollato (2020) Physiological basis of genotypic response to management in dryland wheat. *Frontiers in Plant Science* 10:1644, <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01644>
- Singh B. and A. M. Ali (2022) Using hand-held chlorophyll meters and canopy reflectance sensors for fertilizer nitrogen management in cereals in small farms in developing countries. *Sensors* 20:1127, <https://doi.org/10.3390/s20041127>
- Solís M. E., S. A. Ríos R., H. García N., A. Arévalo V., O. A. Grajeda C., M. A. Vuelvas C., ... y R. Peña M. (2007) Producción de trigo de riego en El Bajío. Folleto Técnico No. 3. Campo Experimental Bajío, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Celaya, Guanajuato, México. 94 p.
- Solís M. E., A. Ramírez R., L. Ledesma R. y M. L. de la Cruz G. (2013) Guía para la producción de trigo. In: *Guía para la Producción de Maíz, Frijol, Trigo y Sorgo en Guanajuato*. Libro Técnico No. 4. A. Mandujano B., R. Paredes M., M. P. Alamilla G. y J. F. Buenrostro R. (comps.). Campo Experimental Bajío, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Celaya, Guanajuato. México. pp:113-138.
- Solís M. E., J. Huerta E., P. Pérez H., E. H. Villaseñor M., A. Ramírez R. y L. Ledesma R. (2017) Cisne F2016: nueva variedad de trigo harinero de gluten fuerte para el Bajío, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8:1911-1917, <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i8.715>
- Solís M. E., J. Huerta E., P. Pérez H., H. E. Villaseñor M., A. Ramírez R. y L. Ledesma R. (2018) Elia M2016: nueva variedad de trigo harinero de gluten medio fuerte para riego restringido para El Bajío. Folleto Técnico No. 5. Campo Experimental Bajío, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Celaya, Guanajuato. México. 40 p.
- Solís M. E., L. A. Mariscal A., J. Huerta E., E. E. Villaseñor M., L. Ledesma R. y P. Pérez H. (2019) Faisán S2016: nueva variedad de trigo harinero de gluten débil para El Bajío. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10:1699-1703, <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i7.1899>
- Xiong Q., G. Tang, L. Zhong, H. He and X. Chen (2018) Response to nitrogen deficiency and compensation on physiological characteristics, yield formation, and nitrogen utilization of rice. *Frontiers in Plant Science* 9:1075, <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01075>
- 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>