

USO DE SENSORES ÓPTICOS PARA LA FERTILIZACIÓN DE TRIGO (*Triticum aestivum* L.)

Use of Optical Sensor Technology for the Fertilization of Wheat (*Triticum aestivum* L.)

Santillano-Cázares Jesús^{1‡}, Ángel López-López², Iván Ortiz-Monasterio³ y W. R. Raun⁴

RESUMEN

A pesar de su importancia económica, la producción de trigo en el valle de Mexicali, B.C., México, atraviesa por dificultades debido a su baja rentabilidad. Una de las causas radica en que los productores podrían estar utilizando más fertilizantes nitrogenados de los necesarios. Además, el nitrógeno (N) que no es recuperado por el cultivo se pierde al ambiente por lixiviación, volatilización, desnitrificación o escurrimiento, acentuando los problemas de contaminación. Una estrategia innovadora, es el uso de sensores ópticos (GreenSeeker®) en combinación con un algoritmo matemático y una franja rica en nitrógeno, lo cual está actualmente demostrando eficacia en el manejo sustentable de los fertilizantes a nivel mundial. Los objetivos de este trabajo fueron: (1) generar una ecuación de predicción confiable de los rendimientos de trigo cultivados localmente y (2) comparar los rendimientos de trigo, dosis de fertilizante y costos de fertilización química, obtenidos mediante la estrategia basada en el uso de sensores, contra la práctica de fertilización convencional de los productores. Se establecieron trabajos de calibración, validación y transferencia de tecnología de 2010 a 2012. Se obtuvo una ecuación de predicción del rendimiento, que demostró ser útil en la recomendación de dosis óptimas de fertilizante nitrogenado. No se detectó reducción en los rendimientos al comparar la práctica convencional de los productores y el uso de sensores ($P = 0.2713$), la fertilización media aplicada, de acuerdo con

la tecnología del uso de sensores, fue inferior en 68 kg de N ha⁻¹ en comparación con la aplicada por los productores acorde a la práctica convencional ($P = 0.0015$). Estos ahorros representaron \$1339 ha⁻¹. Se concluye que en Mexicali, a través del uso de la tecnología de sensores, es posible obtener ahorros sustanciales en los costos de fertilización nitrogenada de trigo, contribuir a incrementar la rentabilidad para los productores y reducir los impactos ambientales al evitar la aplicación de fertilizantes innecesarios.

Palabras clave: agricultura sustentable, GreenSeeker®, calibración, validación, transferencia de tecnología.

SUMMARY

Despite its economic importance, wheat production in the valley of Mexicali, B.C., Mexico, is going through difficult times due to its low profitability. One of the causes of the low profitability of wheat production may reside in farmers' using more nitrogen (N) fertilizers than needed. Moreover, the N that is not recovered by the crop is lost to the environment, accentuating pollution issues. One innovative strategy, optical sensor based technology (GreenSeeker™) along with a mathematical algorithm and a nitrogen rich strip, is showing efficacy for sustainable fertilizer management worldwide. The objectives of this work were two; first, to generate a reliable yield prediction equation for locally grown wheat and second, to compare wheat yields, fertilizer rates and chemical fertilizer costs, using the sensor based technology versus the farmer's conventional fertilization practice. Calibration, validation and technology transfer trials were established from 2010 to 2012. A yield prediction equation was obtained that proved to be useful in recommending optimal fertilizer rates. Without a yield reduction ($P = 0.2713$), the sensor based technology fertilization mean rate was 68 kg N ha⁻¹ lower than that applied by farmers following their conventional practice ($P = 0.0015$). These savings (in Mexican currency)

¹ Instituto de Ciencias Agrícolas, ² Centro de Capacitación y Seguimiento, Universidad Autónoma de Baja California. Carretera a Delta s/n, Ejido Nuevo León. 21705 Mexicali, B. C., México.

[‡] Autor responsable (jsantillano@uabc.edu.mx)

³ Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). Apdo. Postal 6-641. 06600 México, D. F., México.

⁴ Department of Plant and Soil Sciences, Oklahoma State University. 101 Whitehurst Hall. 74078 Stillwater, OK, USA.

accounted for \$ 1339 ha⁻¹. It is concluded that in Mexicali, through the use of sensor based technology, it is possible to obtain substantial savings on wheat related fertilizer costs, to contribute to increasing profitability for farmers and to reduce environmental impacts by avoiding unnecessary fertilizer application rates.

Index words: *sustainable agriculture, GreenSeeker®, calibration, validation, technology transfer.*

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, en el valle de Mexicali, B.C., México, se han venido sembrando alrededor de 80 mil ha de trigo (SAGARPA, 2012), siendo esta actividad importante para la región por los empleos directos e indirectos que de ella derivan (Navarro-Alvarado *et al.*, 2007). Sin embargo, localmente, es del dominio público que la actividad de la producción de trigo está atravesando por momentos difíciles debido a su baja rentabilidad y alto riesgo de inversión. Una de las causas de la baja rentabilidad son los costos de producción, los cuales son cada vez más elevados, particularmente de los fertilizantes. A partir de un análisis de rentabilidad y costos del cultivo de trigo en los valles de San Luis Río Colorado, Sonora y de Mexicali, B.C., se estableció que la fertilización fue el rubro individual más costoso y representó casi un 30% de los costos variables del cultivo de trigo en el ciclo 2007-2008 (FIRA, 2007).

Además del alto costo de los fertilizantes, éstos podrían estar usándose de una forma ineficiente. Aunque no hay información publicada al respecto (hasta donde se conoce), las dosis medias de aplicación de nitrógeno (N) a trigo en Mexicali, en general, oscilan entre 250 y 300 kg ha⁻¹, pero pueden incluso ser superiores a 300 kg ha⁻¹ por ciclo o más (como lo reportado en la sección de resultados). El INIFAP (2010), recomienda 35 kg de N Mg⁻¹ de grano esperado a cosechar en el valle de Mexicali, donde los rendimientos medios son de 6.5 Mg ha⁻¹ (FIRA, 2007). Johnson *et al.* (1997), recomendaron 33 kg de N Mg⁻¹ de rendimiento esperado para trigos invernales. Si en Mexicali se sigue la recomendación del INIFAP (INIFAP, 2010), asumiendo que no existe ninguna reserva de N en el suelo (lo cual es improbable), esto equivale a aplicar una dosis de 228 kg de N ha⁻¹. Esta disparidad entre lo recomendado y lo aplicado es indicativa de que se podría estar

aplicando más fertilizante nitrogenado del necesario para la producción. Por otro lado, la eficiencia de uso del N por cereales, a nivel mundial, es reportada en el orden del 30-35% únicamente (Raun y Johnson, 1999; FAO-IAEA, 2000). En consecuencia, los altos costos de los fertilizantes, las altas dosis de aplicación y la baja eficiencia en el uso de los fertilizantes contribuyen a la baja rentabilidad del cultivo de trigo en Mexicali. Además del componente económico, otro eje de la sustentabilidad es el aspecto ambiental, el N que no se recupera en los cultivos se pierde en la atmósfera como óxido nitroso y óxido nítrico (Matson *et al.*, 1998), por lixiviación (Riley *et al.*, 2001) o por escurrimiento (Beman *et al.*, 2005). Delgado *et al.* (2008), discuten los impactos ambientales y las formas químicas en las que se escapa el N al ambiente desde sistemas de producción agrícola y proponen una herramienta innovadora denominada “índice de nitrógeno”, para estimar la eficiencia del uso del N en agro-sistemas.

La eficiencia en el uso de los fertilizantes podría mejorarse, y así, la sustentabilidad de la producción agrícola, a través del uso de sensores ópticos. El principio del funcionamiento de estos sensores consiste en la emisión de haces de luz en las bandas roja e infrarroja del espectro electromagnético al follaje del trigo. Se ha demostrado que la luz roja es absorbida y que la luz infrarroja es principalmente reflejada por la biomasa verde de las plantas, los datos de luz reflejada en estas dos longitudes de onda son utilizados para estimar el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI por sus siglas en inglés) (Govaerts and Verhulst, 2010). El NDVI del trigo en la etapa de inicio de encañe, etapa fenológica 31-33 de la escala de Zadoks (Zadoks *et al.*, 1974), se ha utilizado para predecir el rendimiento de grano (Raun *et al.*, 2002; Moges *et al.*, 2004).

El NDVI de una franja ricamente fertilizada, la “franja rica”, sirve como referencia del trigo expresando el máximo potencial de rendimiento desde el inicio de encañe. Así, los valores de NDVI de la franja rica y del área donde se seguirá la recomendación del sensor, el “área del sensor”, son introducidos en un algoritmo matemático desarrollado por Raun *et al.* (2002) y posteriormente adaptado para México (Ortiz-Monasterio y Raun, 2007). El algoritmo que permite generar recomendaciones de dosis de fertilizante desde el inicio de encañe contiene varios componentes claramente identificados, tal como una ecuación específica por región para estimación del rendimiento, entre otros elementos

(Raun *et al.*, 2005). De esta manera, la recomendación de fertilizante se estima por la diferencia entre la predicción del rendimiento en la franja rica y en el área del sensor. Una vez aplicada la recomendación derivada del sensor y algoritmo al área del sensor, se espera que el área del sensor produzca rendimientos similares a la franja rica (Ortiz-Monasterio y Raun, 2007). En el valle de Mexicali, como la fertilización convencional del productor es igual o mayor incluso a la franja rica, se espera que el área del sensor rinda similar al área del productor.

En las regiones del mundo donde se ha probado la tecnología de sensores para incrementar la eficiencia de uso de fertilizantes, se han desarrollado tres fases o etapas, las cuales son: calibración, validación y transferencia de tecnología. La calibración consiste en el desarrollo de la ecuación de predicción del rendimiento desde el inicio del encañe, donde se relaciona el INSEY (estimación del rendimiento en la etapa de encañe) y el rendimiento de grano (Lukina *et al.*, 2001; Raun *et al.*, 2001, 2005; Li *et al.*, 2009; Singh *et al.*, 2011). La validación consiste en comprobar a nivel comercial si las recomendaciones derivadas del sensor y algoritmo son efectivas en términos de optimizar la aplicación de fertilizante, sin sacrificar rendimientos, en comparación con el manejo convencional de los productores (Lukina *et al.*, 2001; Raun *et al.*, 2001, 2005; Ortiz-Monasterio y Raun, 2007; Li *et al.*, 2009). La fase de transferencia de tecnología consiste en el establecimiento de un programa para la adopción a nivel comercial de esta tecnología donde se aplicarán solamente las dosis recomendadas por la tecnología de sensores y el algoritmo.

Con base en los antecedentes de la literatura, se esperaba que con el uso de la tecnología de sensores ópticos en el valle de Mexicali, B.C., México, se produjeran rendimientos similares a los obtenidos convencionalmente por los productores, pero utilizando dosis de fertilizante de N menores; contribuyendo así a incrementar la rentabilidad del cultivo al ahorrar fertilizante aplicado innecesariamente y además reducir el impacto ambiental. Los objetivos de este trabajo fueron (1) generar una ecuación capaz de predecir los rendimientos de trigos con base en INSEY en el valle de Mexicali y (2) comparar los rendimientos de trigo, cantidades de fertilizante empleadas e implicaciones económicas por costos de la fertilización química, empleando la estrategia basada en el uso de sensores y algoritmo, contra la fertilización convencional de los productores.

MATERIALES Y MÉTODOS

Experimentos para Predecir los Rendimientos (Experimentos de Calibración)

En los ciclos de producción agrícola de otoño-invierno 2010-2011 y 2011-2012, se condujeron experimentos de calibración del sensor para predecir los rendimientos de trigo con base en el INSEY. En 2010-2011 se establecieron tres experimentos en el campo experimental del Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California (ICA-UABC) y tres en campos de productores del valle de Mexicali, B.C., México. El ICA-UABC se localiza en el ejido Nuevo León, a 42 km al sureste de la ciudad de Mexicali, B.C., México, a 32° 24' N y 115° 11' O, a una altitud de 8.7 m. El clima es de tipo desértico y en verano se caracteriza por ser cálido, muy seco, con temperaturas promedio máximas y mínimas de 43 y 16 °C, respectivamente. Con base en el sistema de clasificación climática de Köppen, modificado por García (1973), el clima de Mexicali, por su escasa precipitación anual es desértico cálido (Bwh), con una precipitación pluvial promedio anual de 85 mm.

La variedad de trigo sembrada en 2010-2011 fue Rayón, en los dos experimentos en el ICA-UABC y en campos de productores las variedades utilizadas fueron Río Colorado, Cerro Prieto, Yécora, y Rafi en el ciclo 2011-2012, en el ICA-UABC se utilizó la variedad Río Colorado y en los campos de productores se utilizaron diversas variedades de trigos cristalinos. En las áreas experimentales, tanto en campos de agricultores cooperantes como en el campo experimental del ICA-UABC, no se aplicaron fertilizantes de N, con excepción de las parcelas de los experimentos, las cuales recibieron los tratamientos prescritos. La siembra se realizó en plano, con una sembradora de labranza mínima, con separación entre hileras de 15 cm. La fertilización con fósforo estuvo en el rango de 60-80 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Las fechas de siembra, riegos, preparación del suelo, aplicación de plaguicidas, entre otras labores de manejo del cultivo, se realizaron conforme a las recomendaciones del INIFAP (1999), en los tres ciclos de establecimiento de experimentos de calibración.

Para efectos de crear un gradiente de variabilidad de valores de NDVI y de rendimiento, se aplicaron ocho tratamientos de fertilizante con N en dosis de 0, 60, 120,

180, 240, 300, 360 y 420 kg de N ha⁻¹, replicados tres veces. Los tratamientos de fertilizante con N en los dos ciclos de producción fueron los mismos y fueron aplicados al momento de la siembra. La aplicación de las dosis de N al momento de la siembra se realizó con el objetivo de que el trigo mostrara todo su potencial de rendimiento al momento del encañe; momento en el que se realiza el diagnóstico con el sensor. El diseño experimental fue de bloques completos al azar. En los dos ciclos, las parcelas tuvieron un área de 6 m² (2 × 3 m), tanto para los experimentos en el ICA-UABC, como para los establecidos en campos de productores. Se realizaron mediciones de NDVI con un sensor óptico (GreenSeeker®, NTech Industries Incorporation, Ukiah, CA, EUA) a partir de 50 días transcurridos entre la fecha del riego de germinación y la fecha de la medición. La etapa fenológica al momento de las mediciones fue al final del amacollamiento a inicio de encañe, con uno a dos nudos visibles por encima del suelo, en la etapa Z30-Z32 en la escala de Zadoks (Zadoks *et al.*, 1974). Cuando el cultivo alcanzó madurez fisiológica, se cosecharon 4 m² del área de cada parcela para estimar el rendimiento de grano. La cosecha se hizo manualmente, cortando el trigo con hoces, depositándolo en costales de rafia, trillado en una maquina estacionaria de manojos tipo Pulman, cribada y pesada. Las mediciones de NDVI con el sensor abarcaron una superficie aproximada de 1.8 m² centrales de las parcelas, lo que se logró al recorrer toda la longitud de las parcelas y donde el haz de luz del sensor abarcó 0.6 m. En los dos ciclos de experimentos de calibración se utilizaron los datos de NDVI y se procedió a normalizarlos mediante la división del NDVI entre el número de días transcurridos entre la fecha del riego de germinación y la fecha de medición con el sensor, para obtener los INSEY (estimación del rendimiento al comienzo de las etapas de encañe, por sus siglas en inglés). Con los datos de INSEY (en el eje de las abscisas x) y los datos de rendimiento de grano observados (en el eje de las ordenadas y), se obtuvo un gráfico y se ajustó una función exponencial. Con base en esta ecuación exponencial se derivó la ecuación de predicción de los rendimientos de trigo, como fue realizado por Lukina *et al.* (2001) y Raun *et al.* (2001 y 2005). Para los datos obtenidos de los dos ciclos se utilizó Microsoft Excel (Microsoft Corporation, Redland CA) para obtener las gráficas que relacionaron al INSEY con los rendimientos observados, las ecuaciones de predicción y los coeficientes de determinación (R^2).

Experimentos de Validación, Experimentos de Evaluación y Transferencia de Tecnología

En el ciclo 2011-2012, ya contando con una primera versión de ecuación de predicción del rendimiento, específica para trigos cultivados en el valle de Mexicali, se tuvo la participación de tres despachos de asesoría técnica agrícola para establecer trabajos de validación y transferencia de tecnología en campos de productores locales. Es pertinente aclarar que se tuvieron simultáneamente trabajos de validación, en áreas generalmente pequeñas (3 ha lo más frecuente) dentro de los lotes de los productores cooperantes, y trabajos de transferencia de tecnología, en los lotes comerciales completos de los productores cooperantes. Lo anterior, debido a que algunos productores decidieron, bajo su propio riesgo, fertilizar los lotes completos con la recomendación derivada del sensor y algoritmo. En el ciclo 2012-2013 se introdujo en el algoritmo la versión más actual de la ecuación de predicción, obtenida al final del ciclo 2011-2012. El manejo agronómico en los lotes participantes de validación y de transferencia de tecnología en el ciclo 2011-2012 fue muy variado entre los productores cooperantes. En general, los productores aplicaron el riego de germinación entre mediados de noviembre y finales de diciembre. La fertilización convencional a la siembra fue de 100-150 kg de urea ha⁻¹ (46-69 kg de N ha⁻¹) y 50-100 kg de fosfato monoamónico (MAP-11-52-00) (26-52 kg ha⁻¹ P₂O₅). Además del riego de germinación, se aplicaron cuatro riegos de auxilio en planta. En la mayoría de los lotes se realizó combate de malezas y control químico de plagas, para control de pulgón [*Schizaphis graminum* (Rondani)], principalmente. Las cosechas comenzaron en mayo y terminaron en junio de 2012.

Los experimentos de validación incluyeron el establecimiento de franjas ricas de fertilizante, o franjas de referencia, una en cada lote participante. A las franjas ricas se les aplicó una dosis de 320 kg de N ha⁻¹ al momento de la siembra. Las recomendaciones de fertilizante complementario recomendado por el sensor y algoritmo, se realizaron al inicio del encañe, justo antes del segundo riego de auxilio. Los experimentos de validación fueron generalmente establecidos en superficies relativamente pequeñas en los lotes de los productores; en tres, cinco o seis ha, aunque hubo dos trabajos de validación de 20 y de 24 ha.

El área donde se aplicó la fertilización recomendada por la tecnología de sensores se denominará a partir de

aquí “área del sensor” y el área manejada convencionalmente por el productor se denominó “área del productor”. La fertilización al momento de la siembra y la aplicada con el primer riego de auxilio en planta fue igual en el área del productor y del sensor, se realizó de acuerdo con las prácticas convencionales de los productores. En el segundo riego de auxilio, en el área del sensor se aplicó la dosis de fertilización recomendada por el mismo y el algoritmo en una sola aplicación; mientras que en el área del productor se continuó con la fertilización convencional de los productores, tanto en dosis, como en el número de aplicaciones. Después de la fertilización en el segundo riego de auxilio, las áreas del sensor ya no recibieron fertilizante con N. En los experimentos de validación de tecnología, se comparó la cantidad de fertilizante empleada en el área del sensor contra la cantidad de fertilizante empleada en el área del productor, los rendimientos y los costos por fertilización de N en las dos áreas. La estimación de los rendimientos en campos de productores, para el caso del área del sensor, se hicieron mediante el pesado de un camión completo o con camiones semi-completos, cuando no alcanzaron a completar la carga y tomando en cuenta el área de cosecha. En el caso de las áreas de los productores, los rendimientos se determinaron mediante el pesaje de camiones completos. Los trabajos de transferencia de tecnología fueron similares a los de validación, con la diferencia de que en los trabajos de transferencia de tecnología, la recomendación del sensor se aplicó a todo el campo del productor (en el segundo riego de auxilio). Debido a que en trabajos de transferencia de tecnología no existió área manejada convencionalmente por el productor, no se realizaron comparaciones entre el área del sensor y el área del productor.

La naturaleza original de este proyecto era de extensionismo (Programa de Desarrollo de Capacidades y Extensionismo Rural, promovido por SAGARPA y los gobiernos estatales), por eso, los trabajos de validación y transferencia de tecnología se llevaron a cabo a escala comercial o semi-comercial y no se tuvieron repeticiones dentro de los lotes de los productores cooperantes. Sin embargo, en el caso de los trabajos de validación, se utilizaron 12 lotes de agricultores cooperantes como repeticiones de las dos estrategias de fertilización, similar a lo realizado por Li *et al.* (2009) y Ortiz-Monasterio y Raun (2007). El análisis estadístico consistió en un análisis de varianza, se compararon las medias de fertilizante y rendimientos a un nivel de significancia de

0.05, se utilizó el PROC GLM del paquete estadístico SAS versión 9.1.2. (SAS Institute, 2003).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Experimentos para Estimar el Rendimiento (Experimentos de Calibración)

En el ciclo 2010-2011, al realizar experimentos de calibración, se observó una tendencia exponencial (Figura 1), similar a la observada por otros investigadores (Raun *et al.*, 2001; Lukina *et al.*, 2001; Li *et al.*, 2009; Singh *et al.*, 2011). La primera versión de la ecuación de predicción del rendimiento fue $y = 0.6714e^{168.31\text{INSEY}}$, con una $R^2 = 0.72$ dicha ecuación incluyó cinco localidades (Cuadro 1). Li *et al.* (2009), reportaron una relación exponencial significativa entre el INSEY y los rendimientos observados en seis experimentos conducidos en 2005, con $R^2 = 0.63$ y $R^2 = 0.45$ en 10 experimentos conducidos de 2005 a 2007. Ellos concluyeron que el INSEY puede predecir los rendimientos potenciales de trigos invernales en las Planicies del Norte de China y consecuentemente estimar adecuadamente las dosis complementarias de fertilizante. En India, Singh *et al.* (2011), reportaron tendencias exponenciales significativas entre INSEY y los rendimientos medidos con $R^2 = 0.90$, 0.66 y 0.61 en uno, dos y tres años de pruebas, respectivamente, cuando las mediciones con el sensor se hicieron en la etapa de Feekes 5-6 (Large, 1954) (equivalente a Z30-Z31, en la escala de Zadoks); y $R^2 = 0.84$, 0.83 y 0.76 en uno, dos y tres años de experimentos de calibración, respectivamente, en las mismas tres localidades, cuando las mediciones con el sensor se hicieron en la etapa de Feekes 7-8 (equivalente a Z32-Z37, en la escala de Zadoks). El estudio concluyó que para las Planicies del Indo-Ganges del sur de Asia, el INSEY es un predictor confiable de los rendimientos de trigo.

Los rendimientos predichos de cuatro de los cinco experimentos usados para desarrollar la ecuación de predicción para el valle de Mexicali en 2010-2011, tuvieron un rango de $\pm 19\%$ de los promedios de rendimientos medidos, con coeficientes de determinación r^2 de 0.77 a 0.90 (Cuadro 1). El experimento identificado como El Colorado A (Cuadro 1), tuvo un desempeño pobre en términos de predicción de los rendimientos, sobrestimando en un 32% a los rendimientos medidos. Este experimento se encontraba completamente acamado al momento de su cosecha

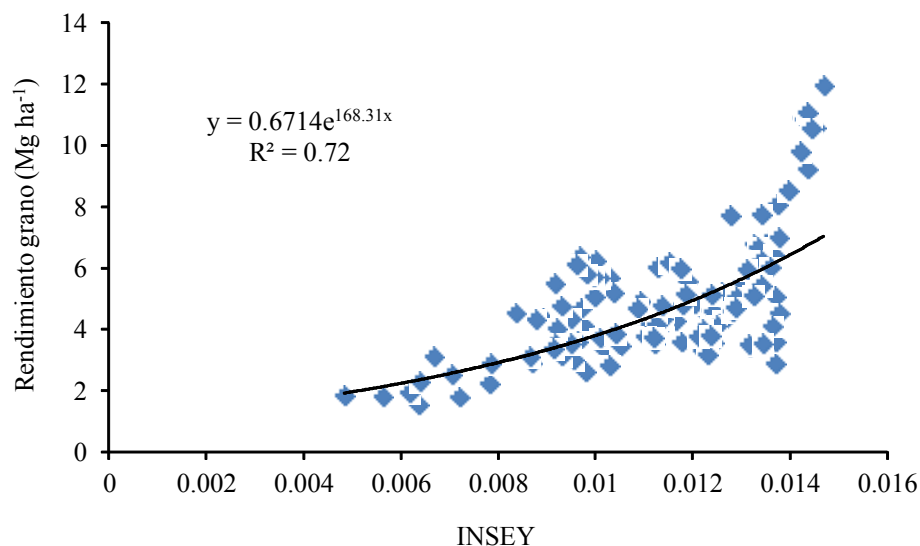


Figura 1. Relación entre el rendimiento observado y el rendimiento estimado (INSEY) de grano de trigo en experimentos desarrollados en el valle de Mexicali, en el ciclo de siembra 2010-2011.

lo cual dificultó su corte en las parcelas. En este caso, es posible que los rendimientos predichos y medidos, si no hubiera habido complicaciones en la cosecha, podrían haber estado mejor relacionados. Raun *et al.* (2001), reportaron una diferencia de ± 14 entre los rendimientos medidos y los predichos, en seis de nueve experimentos de calibración.

En 2011-2012, se mantuvo una tendencia exponencial entre las variables (Figura 2). Esta segunda versión de la ecuación de predicción del rendimiento de trigos en Mexicali fue $y = 0.8483e^{153.79\text{INSEY}}$, con $R^2 = 0.68$. Esta ecuación de regresión se obtuvo a partir de seis ambientes repartidos en dos ciclos, cuatro en 2010-2011 y dos en 2011-2012. En esta ecuación se excluyó el experimento de El Colorado A (por las razones

ya discutidas en párrafos anteriores) y se agregaron otros dos experimentos que se ajustaron mejor a la nube de puntos previa, sin reducir sustancialmente la R^2 (de 0.72 a 0.68). Se espera que la efectividad de predicción del modelo se mantenga o incremente debido a la inclusión de una localidad más y la remoción de una localidad que estaba perjudicando al modelo. Raun *et al.* (2005), concluyeron que una ecuación de predicción confiable puede lograrse con sólo dos ciclos de datos.

Experimentos de Validación

Los 12 experimentos de validación se llevaron a cabo en un área de 87 ha (Cuadro 2). En estos lotes la fertilización aplicada de acuerdo con el sensor fue

Cuadro 1. Rendimiento medido y predicho mediante un algoritmo, porcentaje del rendimiento medido y coeficiente de determinación (r^2) de cinco experimentos de calibración en el valle de Mexicali, B.C., México, en el ciclo 2010-2011.

Experimento	N	Rendimiento medido	Rendimiento predicho	Porcentaje del rendimiento medido	r^2
----- Mg ha ⁻¹ -----					
ICA-A [†]	24	3.9	3.9	100	0.77
ICA-B [‡]	24	3.5	4.2	118	0.82
Palmerín A	24	4.3	3.1	73	0.80
Palmerín B	24	7.5	6.1	81	0.90
El Colorado A	24	4.6	6	132	0.17

[†] Campo experimental del Instituto de Ciencias Agrícolas, Experimento "A" (ICA-A), [‡] Campo experimental del Instituto de Ciencias Agrícolas, Experimento "B" (ICA-B).

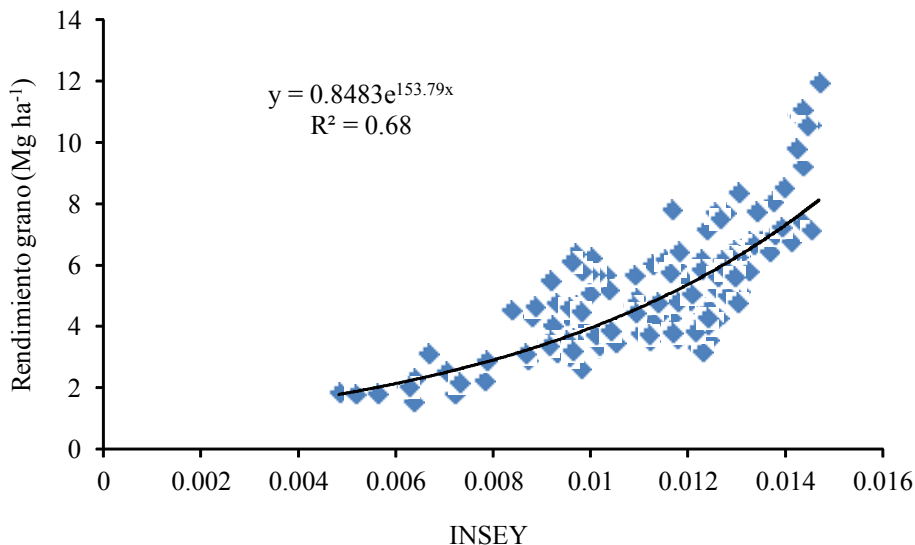


Figura 2. Relación entre el rendimiento observado y el rendimiento estimado (INSEY) de grano de trigo en experimentos desarrollados en el valle de Mexicali, en los ciclos de siembra 2010-2011 y 2011-2012.

significativamente inferior, en promedio 68 kg ha^{-1} de N, a la aplicada por el productor bajo un manejo convencional ($P = 0.0015$); aun y cuando los rendimientos fueron iguales ($P = 0.2713$), 7.8 y 7.3 Mg ha^{-1} , en las parcelas fertilizadas con la dosis obtenida con base en el sensor y algoritmo, y las fertilizadas de forma convencional, respectivamente (Cuadro 2). Es preciso aclarar que el rendimiento sustancialmente superior en el área del sensor, comparada con el área de manejo convencional, en tres de los casos reportados en el Cuadro 2, uno obedeció a que el área del sensor quedó en una zona naturalmente más productiva que el área de manejo convencional. Así lo informó el productor, al cuestionársele sobre posibles causas de esta diferencia. Se especula que en los otros dos casos, la diferencia pudo obedecer a problemas de acame. Se ha observado que los lotes ricamente fertilizados son más susceptibles al acame que lotes fertilizados moderadamente.

Utilizando un precio de $\$ 9000 \text{ Mg}^{-1}$ de fertilizante urea, vigente al momento del desarrollo de estos trabajos, el ahorro por concepto de fertilización representó en promedio $\$1339 \text{ ha}^{-1}$ (Cuadro 2). Los ahorros documentados en fertilizante y en costos de fertilización a través de los experimentos de validación (Cuadro 2), son similares a los estimados en los experimentos de transferencia de tecnología en este estudio y también con los reportados para el sur de Sonora, en donde se reportaron ahorros de $69 \text{ kg de N ha}^{-1}$ (Ortiz-Monasterio

y Raun, 2007). En consecuencia, se propone que, utilizando la tecnología de uso de sensores en el noroeste de México (Sonora y Baja California), donde la producción es intensiva, con altos insumos e inversión, es posible obtener un ahorro cercano a $70 \text{ kg de N ha}^{-1}$, sin sacrificar rendimientos. Además, es posible pensar que los ahorros de fertilizante y dinero en el valle de Mexicali pudieran ser todavía más significativos que los que se presentan en estos experimentos de validación. Los productores cooperantes en estos trabajos, de antemano están dispuestos a reducir sus dosis de fertilización. Los resultados de este estudio coinciden con de Li *et al.* (2009), quienes reportaron que de tres estrategias de fertilización, el uso del GreenSeeker®, un sistema intensivo de muestreo de suelos durante la temporada de crecimiento del trigo y la práctica común de los productores en las Planicies del Norte de China, la tecnología de uso de sensores, el manejo basado en muestreo intensivo de suelos y la práctica de los productores produjeron rendimientos similares, pero utilizaron 67 , 88 y 372 kg N ha^{-1} , respectivamente. Las pérdidas de N al ambiente fueron 4 , 15 y 205 kg N ha^{-1} , respectivamente. Ellos concluyeron que la estrategia de fertilización basada en sensores ópticos es relativamente fácil de usar, tiene un potencial para mejorar la eficiencia del uso del N y la rentabilidad del cultivo, más que otros métodos utilizados en la actualidad en China (Li *et al.*, 2009). Del mismo modo, Singh *et al.* (2001) reportaron que la fertilización basada en sensores resultó en altos

Cuadro 2. Resultados de los experimentos de validación de tecnología del uso de sensores ópticos, en el valle de Mexicali, B.C., México, durante el ciclo de siembra de trigo O-I 2011-2012.

Localidad/ Lote	Área bajo prueba	Fertilizante aplicado por productor	Fertilizante aplicado recomendado por sensor	Diferencia entre fertilización	Ahorro fertilizante	Rendimiento área del productor	Rendimiento área del sensor	Diferencia rendimiento
	ha	-----	kg de N ha ⁻¹	-----	\$ha ⁻¹	-----	Mg ha ⁻¹	-----
Ej. Coahuila/8	3	214	146	68	\$1330	7.3	7	0.3
Ej. Coahuila/16	3	214	146	68	\$1330	7.3	7	0.3
Ej. M. Ocampo/54	3	303	196	107	\$2093	8	7.8	0.2
Ej. Janitzio	6	320	250	70	\$1370	9	9	0.0
Ej. Janitzio	3	320	270	50	\$978	9	9	0.0
Col. Zacatecas/45-F	24	287	255	32	\$626	7.9	8	-0.1
Col. Camacho/41	20	283	170	113	\$2211	5.5	6.6	-1.1
Col. Carranza/204	3	344	292	52	\$1017	6.1	7.6	-1.5
Col. Juárez/3	9	312	247	65	\$1272	5.9	7.5	-1.6
Ej. Veracruz II	3	320	250	70	\$1370	7	8.5	-1.5
Ej. M. de Ocampo/123	5	305	228	77	\$1507	6.7	7	-0.3
Ej. M. de Ocampo/28	5	326	277	49	\$959	7.9	8	-0.1
12 Lotes	87	296a [†]	227b	68	\$1339	7.3NS	7.8 NS	-0.4
DMS			39.2				0.83	

Ej. = ejido; Col. = colonia. [†] Letras distintas indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). NS = no significativo.

rendimientos y alta eficiencia del uso del N; y concluyeron que una alta eficiencia del uso del N en trigo irrigado en la India puede lograrse con una aplicación inicial medida al momento de la siembra y después una fertilización complementaria determinada con el sensor en los riegos coincidentes con Feekes 5-6 ó 7-8.

Transferencia de Tecnología

En estos trabajos sólo se aplicaron las dosis recomendadas por el sensor, en lotes de transferencia de tecnología, por lo cual no se hacen comparaciones como las que se realizan en experimentos de validación; como la magnitud del ahorro de fertilizante, diferencias en rendimiento o costos de la fertilización de N. En estos trabajos de transferencia de tecnología, donde los productores siguieron la recomendación de fertilización en lotes completos, se utilizaron en promedio 204 kg de N ha⁻¹ y el rendimiento promedio fue de 6 Mg ha⁻¹. Si se toma en cuenta la recomendación del INIFAP (INIFAP, 2010), se encuentra que ésta resultó casi exacta; ya que, bajo este criterio, para producir 6 Mg ha⁻¹ se requerirían 210 kg de N ha⁻¹ (35 kg de N ha⁻¹ × 6 Mg ha⁻¹). Es decir, la tecnología de uso de

sensores resultó adecuada para efectuar recomendaciones óptimas. Por otro lado, si se toma en cuenta la fertilización convencional en el valle de Mexicali, de entre 250 a 300 kg de N ha⁻¹, 275 kg de N ha⁻¹ en promedio, se estima, con todas las reservas del caso, un ahorro de 71 kg de N ha⁻¹ (275-204 kg de N ha⁻¹). Estos resultados coinciden numéricamente con los experimentos de validación reportados en este artículo y con los reportados para el sur de Sonora (Ortiz-Monasterio y Raun, 2007) y coinciden también con los resultados generales (no necesariamente numéricos) reportados para China, India (Li *et al.*, 2009; Singh *et al.*, 2011) y EUA (Raun *et al.*, 2002), donde se coincidió en la utilidad de la tecnología de uso de sensores como herramienta para economizar fertilizantes, reducir el impacto ambiental y contribuir a la rentabilidad de la producción de trigo.

CONCLUSIONES

Acorde con los resultados obtenidos en los procesos de calibración, validación y transferencia de tecnología del uso de sensores ópticos para la predicción del rendimiento y fertilización racional de N para trigo en el valle de Mexicali, B.C., se concluye que, después

de haber generado una ecuación de predicción del rendimiento específica para la región, relacionando el INSEY con los rendimientos medidos, fue posible efectuar recomendaciones de fertilizantes nitrogenados que permitieron un ahorro de aproximadamente 70 kg de N ha⁻¹. Esta cifra representa un ahorro sustancial en los costos de producción del cultivo de trigo y una contribución considerable para el incremento de la rentabilidad de la actividad; al mismo tiempo que podría reducir el impacto ambiental, al evitar aplicar fertilizantes en exceso y sus respectivas pérdidas a la atmósfera, mantos acuíferos y diferentes fuentes de agua.

LITERATURA CITADA

- Beman, J. M., K. R. Arrigo, and P. A. Matson. 2005. Agricultural runoff fuels large phytoplankton blooms in vulnerable areas of the ocean. *Nature* 434: 211-214.
- Delgado, J. A., M. J. Shaffer, C. Hu, R. Lavado, J. C. Wong, P. Joosse, X. Li, H. Rimski-Korasako, R. F. Follett, S. J. Del Grosso, W. Colon, D. Sotomayor. 2008. An index approach to assess nitrogen losses to the environment. *J. Ecol. Eng.* 32: 108-120.
- FAO/IAEA (Food and Agriculture Organization, International Atomic Energy Agency). 2000. Optimizing nitrogen fertilizer application to irrigated wheat. http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1164_prn.pdf (Consulta: enero 23, 2013).
- FIRA (Fideicomisos Instituidos en relación con la Agricultura). 2007. Rentabilidad del trigo en el ciclo OI 2006/2007 y costos del cultivo de trigo en el ciclo 2007/2008. http://www.fira.gob.mx/Nd/TRIGO_OI_Sonora_y_BC_-_Rentabilidad_2006-2007_Costos_2007-2008.pdf. (Consulta: enero 24, 2013).
- García, E. 1973. Modificaciones al Sistema de clasificación Climática de Köppen. Instituto de Geografía UNAM. México. pp. 246.
- In: C. A. Ortega. 2008. Convenio Núm. FBI1319/FZ016/08. Anexo 1. Proyecto: Conocimiento de la diversidad y distribución actual del maíz nativo y sus parientes silvestres en México. Segunda Etapa 2008-2009. 69 pp. (Documento interno INIFAP). México, D. F.
- Govaerts, B. and N. Verhulst. 2010. The normalized difference vegetation index (NDVI) GreenSeeker™ handheld sensor: Toward the integrated evaluation of crop management. Part A: Concepts and case studies. CIMMYT. <http://www.plantstress.com/methods/Greenseeker.PDF> (Consulta: junio 1, 2013).
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). 1999. Manejo agronómico del trigo duro para exportación en DDR 002 Río Colorado. INIFAP Valle de Mexicali. Folleto para productores no. 34. Mexicali, B.C., México.
- INIFAP. 2010. Guía para producir trigo en los valles de Mexicali, B.C. y San Luis Río Colorado, Son. INIFAP Valle de Mexicali. Folleto para productores no. 57. Mexicali, B. C., México.
- Johnson, G. V., W. R. Raun, H. Zhang, and J. A. Hattey. 1997. Soil fertility handbook. Oklahoma Agric. Exp. Stn. Stillwater, OK, USA.
- Large, E. C. 1954. Growth stages in cereals. *Plant Pathol.* 3: 128-129.
- Li, F., Y. Miao, F. Zhang, Z. Cui, R. Li, X. Chen, H. Zhang, J. Schroder, W. R. Raun, and L. Jia. 2009. In-season optical sensing improves nitrogen-use efficiency for winter wheat. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 1566-1574.
- Lukina, E. V., K. W. Freeman, K. J. Wynn, W. E. Thomason, R. W. Mullen, G. V. Johnson, R. L. Elliott, M. L. Stone, J. B. Solie, and W. R. Raun. 2001. Nitrogen fertilization optimization algorithm based on in-season estimates of yield and plant nitrogen uptake. *J. Plant Nutr.* 24: 855-898.
- Matson, P. A., R. Naylor, and I. Otriz-Monasterio. 1998. Integration of environmental, agronomic, and economic aspects of fertilizer management. *Science* 280: 112-115.
- 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. *J. Plant Nutr.* 27: 1431-1441.
- Navarro-Alvarado, J. F., E. Sánchez-López, M. L. Bravo-Zanoguera y S. L. Zazuete-Beltrán. 2007. Evaluación del comportamiento del financiamiento no bancario aplicado a la producción de trigo en Mexicali B. C. *Rev. Mex. Agroneg.* 11: 282-297.
- Ortiz-Monasterio, I. and W. Raun. 2007. Reduced nitrogen and improved farm income for irrigated spring wheat in the Yaqui Valley, Mexico. *J. Agric. Sci.* 145: 215-222.
- Raun, W. R., and G.V., Johnson. 1999. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agron J* 91: 357-363.
- Raun, W. R., J. B. Solie, G. V. Johnson, M. L. Stone, E. V. Lukina, W. E. Thomason, and J. S. Schepers. 2001. In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. *Agron. J.* 93: 131-138.
- Raun, W. R., J. B. Solie, G. V. Johnson, M. L. Stone, R. W. Mullen, K. W. Freeman, W. E. Thomason, and E. V. Lukina. 2002. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. *Agron. J.* 94: 815-820.
- Raun, W. R., J. B. Solie, M. L. Stone, K. L. Martin, K. W. Freeman, R. W. Mullen, H. Zhang, J. S. Schepers, and G. V. Johnson. 2005. Optical sensor based algorithm for crop nitrogen fertilization. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 36: 2759-2781.
- Riley, W. J., I. Ortiz-Monasterio, and P. A. Matson. 2001. Nitrogen leaching and soil nitrate, nitrite and ammonium levels under differing fertilizer management in an irrigated wheat system in northern Mexico. *Nutr. Cycling Agroeco.* 61: 223-236.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación) 2012. Boletín B2142012. <http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/bajacalifornia/Boletines/Paginas/B2142012.aspx>. (Consulta: enero 24, 2013).
- SAS Institute. 2003. SAS 9.1 for windows. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA.
- Singh B., R. K. Sharma, J. Kaur, M. L. Jat, K. L. Martin, Y. Singh, V. Singh, P. Chandna, O. P. Choudhary, R. K. Gupta, H. S. Thind, J. Singh, H. S. Uppal, H. S. Khurana, A. Kumar, R. K. Uppal, M. Vashistha, W. R. Raun, and R. Gupta. 2011. Assessment of the nitrogen management strategy using an optical sensor for irrigated wheat. *Agron. Sust. Dev.* 31: 589-603.
- Zadoks, J. C., T. T. Chang, and C. F. Konzak, 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Res.* 14: 415-421.