

Manejo sitio específico de N en trigo a través del diagnóstico por sensores remotos

Matías Redel¹, Tristán de Villalobos¹, Agustín Mossini¹, Leonardo Fernandez², Leandro Sabignoso², Nicolás Larrandart²

¹Administración Villalobos, ² Auravant

*Contacto: hredel@agro.uba.ar

Introducción

Nuevas tecnologías de producción se proponen en las buenas prácticas agrícolas para lograr una producción sustentable (FAO, 2004) y con mayor retorno económico (Bongiovanni y Lowenberg De Boer, 2001). La aplicación de tecnologías y principios para manejar la variabilidad espacial y temporal de los atributos de un lote asociados a la producción agrícola se realiza a través de tecnologías como la agricultura de precisión (AP) (Pierce y Nowak, 1999).

Las recomendaciones de fertilización de N presentan una elevada complejidad debido a la gran cantidad de factores que intervienen en la dinámica en el sistema suelo-planta-atmósfera (Havlin et al., 2005). En el país, la metodología más comúnmente utilizada para la estimación de la dosis de fertilización nitrogenada en trigo tiene en cuenta el contenido de nitratos a la siembra disponibles en la capa 0-60 cm. Debido a los bajos ajustes encontrados entre rendimiento de trigo y nitratos a la siembra o macollaje se comenzó a buscar nuevas alternativas de diagnóstico. Recientemente se ha utilizado a la percepción remota en la predicción de la demanda de N por el cultivo a nivel internacional y nacional (Raun et al., 2005; Teal et al., 2006; Melchiori et al., 2008). En este sentido, se busca determinar con mayor precisión la necesidad de N del cultivo para cada sector del lote para hacer una aplicación diferencial dentro del mismo.

Los sensores remotos detectan la respuesta de los cultivos a la radiación electromagnética, que se asocia con variables relacionadas a la demanda y/u oferta de nitrógeno (Fitzgerald et al., 2006). Su utilización permitiría realizar determinaciones en cultivo de manera no destructiva, instantánea, facilitando la repetitividad de las determinaciones (Hatfield y Prueger, 2010) durante el ciclo del cultivo.

El principal índice espectral utilizado para estimar el rendimiento de diversos cultivos (Colwell et al., 1977; Tucker et al., 1980; Pinter et al., 1981) ha sido el índice de la diferencia normalizada

de la vegetación o NVDI por sus siglas en inglés (Rouse et al., 1973). Para el diagnóstico de fertilización basado en herramientas de teledetección, se requiere que el cultivo sensado en etapas tempranas posea una relación consistente entre NDVI y los rendimientos (Stone et al., 1996). En este sentido, Raun et al. (2002) ajustaron un algoritmo para la fertilización nitrogenada en trigo, haciendo uso de la predicción potencial del rendimiento a mitad del ciclo del cultivo, y un índice de respuesta (Mullen et al., 2003) a partir de la comparación con un sector sin limitantes de nitrógeno.

Los objetivos del presente trabajo son: Poner en evidencia la accesibilidad de metodologías de agricultura de precisión emergentes, en este caso a través del diagnóstico de la fertilización sitio específica nitrogenada en Trigo por imágenes de muy alta definición (aproximadamente 10 cm/píxel); y cuantificar el beneficio económico que esta metodología presenta desde un análisis de costo marginal entre el ahorro de fertilizante nitrogenado y mejora en el rinde.

Materiales y Métodos

Descripción del sitio experimental

La experimentación se llevó a cabo en Pampa Arenosa, ubicada en el sector noroeste de la provincia de Buenos Aires, en el partido de Lincoln (34°41'37.71"S y 61°31'30.79"O). A escala de lote se pueden identificar ambientes de marcada heterogeneidad de la productividad. En las posiciones de loma predominan los Hapludoles énticos caracterizados por menor profundidad efectiva, contenido de materia orgánica y retención hídrica que los Hapludoles Típicos, ubicados en las posiciones más bajas (INTA, 1989; Niborski et al., 2004). Todos estos atributos se relacionan con la variabilidad intralote de la productividad de los suelos y por ende con la fertilidad nitrogenada de los suelos (Redel et al., 2012).

Dentro del lote de producción se diseñó un ensayo en franjas de 50 m de ancho por 600 m de largo, donde se aplicaron 4 dosis de N (0, 85,

115 y 160 kg de N ha⁻¹) en pre-siembra mediante urea granulada (46-0-0), donde la franja de 160 kg de N ha⁻¹ fue considerada la de suficiencia. En cada uno de los lados se dispusieron dos franjas apareadas (30 metros por 600 metros cada una), una con la práctica usual del productor y otra con la práctica que optimiza la fertilización nitrogenada (la que hace uso de la medición con sensores multispectrales del cultivo) (**Figura 1**). La superficie total destinada al ensayo fue de 18 ha. La fecha de aplicación de N para conformar las franjas fue el 11 de Julio mientras que la fecha de siembra fue el 21 de Julio de 2016 con variedad Proteo y una densidad de siembra de 135 kg semillas ha⁻¹, conjuntamente con una dosis de 140 kg ha⁻¹ de fosfato monoamónico (11-52-0).

Las franjas correspondientes a la práctica usual del productor y a la metodología de optimización de fertilización nitrogenada fueron divididas en tres subparcelas (denominadas A1, A2 y A3) correspondientes a la metodología de uso eficiente de N, y P1, P2 y P3 a las destinadas a la práctica usual del productor. La división de las franjas se realizó para excluir de los resultados una zona baja en la cual se perdió el cultivo. Para la separación entre la zona de ensayo y el bajo se tuvo en cuenta un margen de 50 metros con respecto al límite de éste para eliminar condiciones de borde. Asimismo, en cada franja se tomó un margen de medio ancho de cabezal de la cosechadora para eliminar muestras mixtas.



Figura 1. Diagrama del ensayo de fertilización nitrogenada en trigo.

La dosis de N utilizada en la franja denominada práctica usual del productor se obtuvo a través

de un balance de masas de N. Para esta determinación se utilizó un rendimiento esperado de 50 qq ha⁻¹ multiplicado por la absorción de N por t de grano, 30 kg N t⁻¹, siendo el requerimiento de 150 kg de N ha⁻¹. Asimismo se tomaron muestras pre-siembra de N-nitrato hasta los 60 cm de profundidad (a intervalos de 20 cm), los cuales dieron valores de 30.72, 15.34 y 12.48 kg de N ha⁻¹ para los intervalos 0-20, 20-40 y 40-60 respectivamente, siendo el total de 58.55 kg de N ha⁻¹. El aporte de N por el proceso de mineralización se consideró en un 0.8% del N en el estrato 0-30 cm (Álvarez et al., 2000). Con un porcentaje de materia orgánica de 2.5%, el N aportado por este proceso sería de alrededor de 45 kg de N ha⁻¹. El cálculo para determinar la absorción necesaria de N por parte del cultivo fue el siguiente:

$$150 \text{ kg N ha}^{-1} - (58.55 \text{ kg N ha}^{-1} + 45 \text{ kg N ha}^{-1}) = 47 \text{ kg de N ha}^{-1}$$

Ec. 1

Para llegar a la dosis final se utilizó una eficiencia de absorción del fertilizante del 50%, por lo que la dosis final fue de 108 kg de N ha⁻¹ o 235 kg de urea ha⁻¹.

La dosis de N utilizada en la franja de optimización fue calculada a partir del algoritmo de prescripción en base a imágenes aéreas multispectrales obtenidas mediante mapeo con vehículos aéreos no tripulados (drones). La cámara utilizada permite capturar cuatro imágenes en distintas longitudes de onda simultáneamente, en las siguientes bandas:

- Banda Verde (V): 530 a 570 nm (550 nm long. de onda central)
- Banda Roja (R): 640 a 680 nm (660 nm long. de onda central)
- Banda Red-Edge (RE): 730 a 740 nm (735 nm long. de onda central)
- Banda Infrarroja Cercana (NIR): 770 a 810 nm (790 nm long. de onda central)

El índice NDVI, en el que se basa la metodología, se calcula a partir de las bandas Roja (R) e Infrarroja Cercana (NIR), de la siguiente forma:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R}).$$

El algoritmo utilizado se basa en investigaciones previas (Raun et al., 2005) en las que se determina un Índice de Respuesta (RI) para predecir la respuesta del cultivo de trigo a la adición de N extra. El RI se aproxima a partir de mediciones del

NDVI de una franja de suficiencia de nitrógeno (N_{sat}) frente al área de interés cercana a la misma.

En la metodología aplicada se utiliza una aproximación exponencial ($y = a \cdot e^{b \cdot x}$) para estimar el rinde potencial del lote sin agregar N (Y_{P0}); y ajusta el potencial máximo (Y_{PN}) de acuerdo al RI ($Y_{PN} = Y_{P0} \cdot (RINDVI)$). El rango dinámico se establece entre los puntos donde no existe canopia (NDVI < límite inferior) y el rinde máximo histórico del lote (Y_{Pmax}). Una vez definidos estos datos, se calcula para cada punto del terreno una recomendación a partir de la diferencia del rinde potencial.

Los valores específicos utilizados en los cálculos (coeficientes de curvas de aproximación y límites de corte, entre otros) necesitan evolucionar constantemente y adaptarse a las condiciones específicas de cada zona en cada campaña, por lo cual es evidente la necesidad de dejar de utilizar curvas estándar y migrar a nuevas tecnologías de procesamiento de datos para obtener los mejores resultados. El método de diagnóstico utilizado en este ensayo proviene de ajustes del algoritmo base descrito en este documento.

Las dosis prescriptas tanto mediante este método como la correspondiente a la práctica usual del productor fueron aplicadas el 4 de Septiembre en macollaje avanzado utilizando una voleadora (AGCO Terragator) con controladora Raven. El ancho de labor de la aplicación fue de 11 m.

Análisis estadístico

En primer lugar, se realizó un análisis de los rendimientos según las distintas dosis aplicadas. El análisis estadístico consistió en estimar los parámetros de la función de producción de trigo a partir de los datos del monitor de rendimiento, teniendo en cuenta la estructura espacial de los residuales (modelos lineales generalizados). Esto debido a que los datos obtenidos por el monitor no presentan independencia de las observaciones. Los coeficientes del modelo de regresión fueron estimados mediante máxima verosimilitud haciendo uso del programa de estadística R (R Core Team, 2013).

Luego, se analizaron los valores NDVI de la imagen obtenida mediante el sensor remoto de los distintos tratamientos en las tres subparcelas (pseudo-replicas). Asimismo, se realizó un análisis sobre las dosis y rendimientos obtenidos por el método de optimización y la aplicación variable.

Por último, se analizó la conveniencia económica del diagnóstico de optimización sobre la práctica del productor, ya sea por un ahorro en el uso de fertilizante como por una variación en el rendimiento.

Resultados y Discusión

Curva de fertilización

Los rendimientos del cultivo de trigo respondieron al agregado de dosis crecientes de N, con rendimientos de 40.45, 42.45, 46.28 y 47.25 qq ha⁻¹ para el testigo, 85, 115 y 160 kg N ha⁻¹, respectivamente (aumentos de 2, 5.83 y 6.8 qq ha⁻¹ respecto al testigo). Las eficiencias (kg grano kg N fertilizante⁻¹) muestran una relación inversa, siendo menor cuanto mayor es la dosis de N. Las eficiencias son de 49.9, 40.2 y 29.5 kg gr/kg N para las dosis 85, 115 y 160 respectivamente.

Al realizar las regresiones entre rendimientos y dosis de N (teniendo en cuenta no solo las dosis del ensayo de fertilización, sino también las de las franjas de optimización y práctica del productor), se seleccionó el modelo que contempla la estructura espacial de los errores. Esta selección se realizó debido a que los modelos que contemplan la estructura espacial de los errores presentaron menores valores de AIC y BIC. El modelo seleccionado presentó una correlación de errores esférica. Los parámetros de la función Constante, N y N² fueron significativos al 1% (Figura 2).

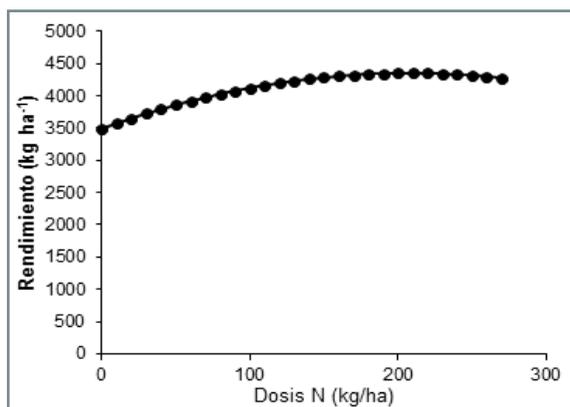


Figura 2. Rendimiento de trigo en función de la dosis de N aplicada.

Análisis de ensayo de diagnóstico de fertilización nitrogenada.

Las mediciones NDVI fueron realizadas el día 9 de agosto de 2016, a inicios de macollaje (Z 2.0) observándose en las mismas dos situaciones cla-

ramente definidas: la zona usual de producción por una parte y el bajo por otra. Por otra parte, las imágenes NDVI de alta definición permiten detectar otro tipo de anomalías como ser malezas o fallas de siembra (Figura 3).

A partir de las mediciones NDVI, se obtuvo el índice de vegetación promedio para todas las franjas del ensayo (Figura 4). En base a las hipótesis de la metodología, un mayor valor de NDVI está asociado a una mejor condición de fertilidad, requiriendo por lo tanto una menor cantidad de fertilizante. Esto se puede observar en los valores de NDVI de las franjas fertilizadas en comparación con las franjas del ensayo o la franja de control. El caso puntual de la franja P3, que se observa con un valor superior incluso a los de la franja, será analizado posteriormente. Por otra parte, se puede observar que la franja de saturación de nitrógeno tiene un valor sensiblemente menor de NDVI que la intermedia, lo cual puede estar dado por un exceso de aplicación de nitrógeno. El exceso de fertilizante nitrogenado pudo causar una pérdida en el número de plantas (Ferraris et al., 2012) con la consecuente disminución en la lectura del índice espectral. Sin embargo, esta tendencia no se observó en los rendimientos.

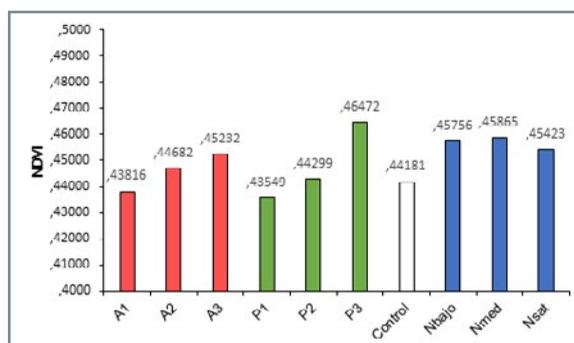


Figura 4. Valor promedio de NDVI según subparcela y franjas de fertilización (control, Nbajo, Nmed y Nsat).

Es importante destacar también que los valores de NDVI están dados entre -1 y 1 para todo el rango del indicador, y entre aproximadamente 0.3 a 1 para el rango de valores esperable para uso agronómico (dado que dentro de ese rango se observarán los valores de tierra y cultivo). Lo anterior implica que una mínima variación en el valor de un índice como NDVI puede implicar una gran variación en el vigor observable de la planta.

A partir de las mediciones realizadas se calculó la prescripción de aplicación de N, con la precisión de los datos obtenidos (10cm por píxel). Dado que la tecnología de aplicación de fertilizante, ya sea pulverizada como por voleo, tiene

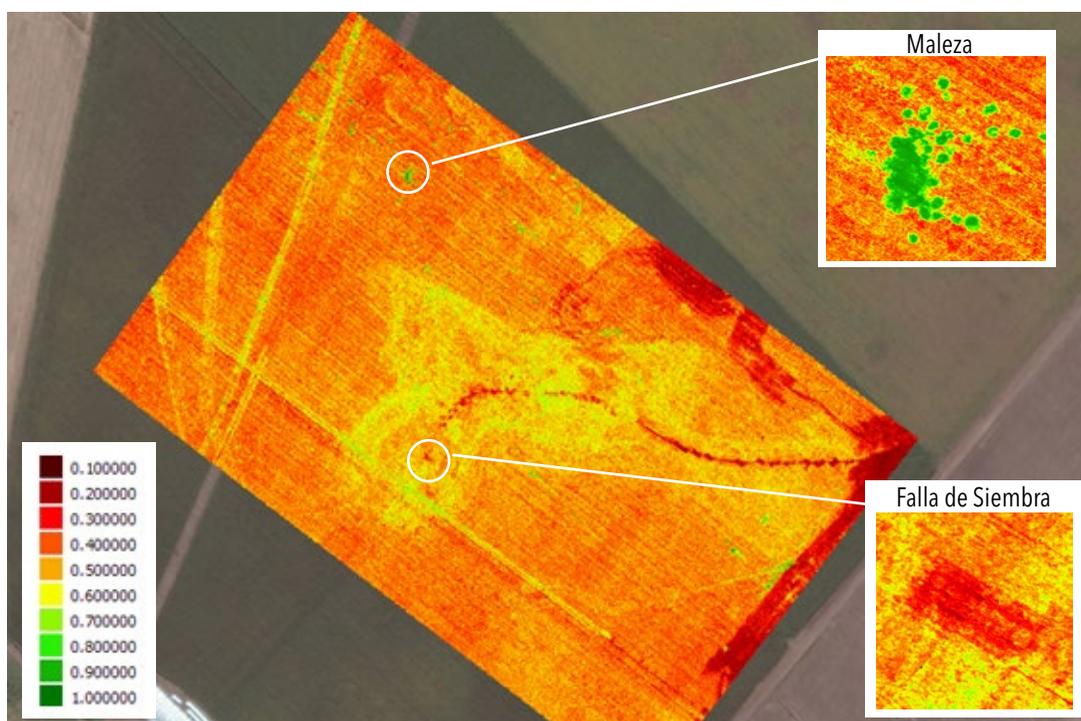


Figura 3. Mapa NDVI de la zona del ensayo de fertilización nitrogenada en trigo.

limitantes en cuanto a su precisión espacial, los resultados fueron generalizados y reclasificados en dosis discretas y sobre superficies manejables por la tecnología de aplicación. El resultado fue convertido a un mapa de curvas que luego fue adaptado a la maquinaria VRT que realizó la aplicación (**Figura 5**).

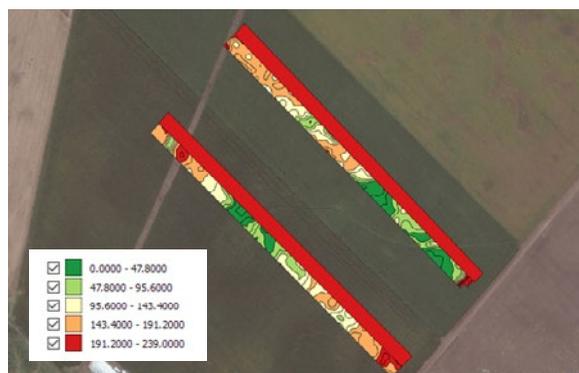


Figura 5. Mapa de curvas de aplicación VRT y franja de aplicación constante según práctica del productor.

Las dosis de nitrógeno aplicadas en la superficie de las franjas de la metodología de uso eficiente de N son discretas, con su moda en 152 kg Urea ha⁻¹ y media de 113 kg Urea ha⁻¹, con sectores donde no se adicionó fertilizante y sitios donde el agregado fue superior a la de la práctica del productor (**Figura 6**). El uso de esta metodología de diagnóstico de necesidad de N permitió disminuir significativamente la dosis media en 122 kg urea ha⁻¹ sin que el rendimiento se vea afectado negativamente (rendimiento promedio de 48.3 y 46.8 qq ha⁻¹ para la metodología de optimización y práctica del productor respectivamente). La eficiencia promedio (kg grano/kg de nitrógeno) varió de 39 a 21 kg grano kg N⁻¹ según el método utilizado.

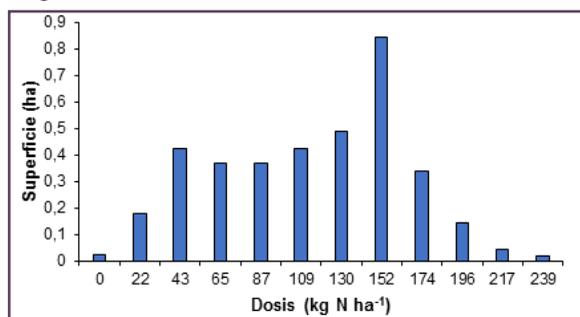


Figura 6. Histograma de aplicación de N según metodología de optimización.

Al analizar los resultados de las subparcelas se observó que los rindes fueron similares para

ambas metodologías (**Tabla 1**). Una de las ventajas de la metodología de optimización es la posibilidad de usar a la planta como indicador del estado nutricional. En este sentido, el contenido de nitratos pre-siembra y el rendimiento final del cultivo suele presentar un bajo ajuste. Esto se debe al transcurso de tiempo entre la determinación y la absorción por parte del cultivo, tiempo en el cual los nitratos están sujetos a posibles pérdidas. El lavado de nitratos es a menudo el principal mecanismo de pérdida de N de los sistemas agrícolas de regiones húmedas, siendo un proceso con mayor relevancia en suelos de textura gruesa (Echeverría y Sainz Rosas, 2015) como los del presente ensayo.

Tabla 1. Rendimiento de trigo según metodología de diagnóstico y pseudoreplica.

Franja	Rendimiento (kg ha ⁻¹)		
	1	2	3
Optimización (Ax)	4510	5321	4672
Productor (Px)	4552	53.51	41.38
Mejora Rinde	- 0.9 %	- 0.6 %	12.9 %

En todas las subparcelas se obtuvo un resultado en rinde similar, a excepción del caso de la parcela P3 y A3 (**Figura 7**). En este caso puntual se observó un 12% más de rinde utilizando la metodología de uso eficiente de N en la parcela A3 (aplicando un 50% menos de fertilizante) respecto de la parcela P3. En los relevamientos iniciales se observó un valor de NDVI notoriamente elevado en P3 lo que implica un nivel inicial elevado de nitrógeno, donde posteriormente se adicionó 108 kg N ha⁻¹. Dosis excesivas de N pueden afectar el rendimiento de trigo por vuelco y mayor susceptibilidad al ataque de parásitos (García y Reussi Calvo, 2014).

Otro aspecto relevante en el uso de esta metodología de uso eficiente de nitrógeno es la sustentabilidad de la actividad agrícola, sobre todo de cara a que los fertilizantes son la principal causa de contaminación de aguas (FAO, 2002). La conjunción de métodos de prescripción con maquinaria de aplicación cada vez más precisa permitirá hacer un uso responsable de este insumo que, a raíz de su uso en exceso, lixivia y contamina acuíferos.

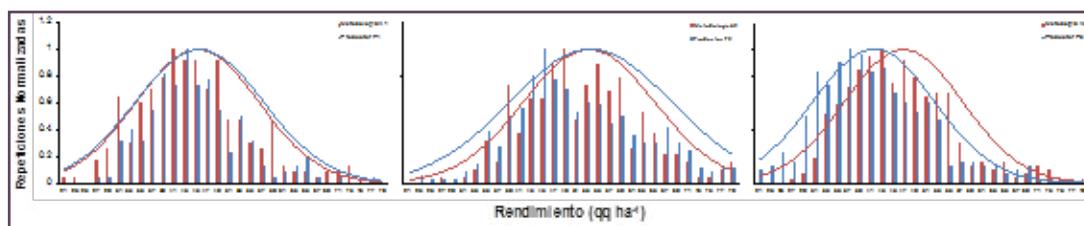


Figura 7. Histogramas de rendimiento de trigo según metodología para las tres subparcelas muestreadas.

Análisis Económico

Desde el punto de vista económico, se dan dos ejes principales de análisis: el ahorro de fertilizante y la variación del rinde obtenido. Dado que cada uno tiene sus implicancias en costos, así como en ingresos tanto directos como indirectos, se propone un análisis costo-beneficio considerando todas las fuentes de costos o ingresos diferenciales entre el método de uso eficiente de N y la práctica usual del productor.

Para este análisis se siguieron las siguientes premisas:

- Se utilizaron los costos reales de los insumos en el momento de su uso y el precio real del grano al momento de la cosecha
- Para simplificar la comparativa se asumió el arriendo de servicios para realizar las labores frente a un análisis de inversión en maquinaria. Se utilizaron las cotizaciones de contratistas a la fecha de la labor.

- Dado que no se cuenta con referencias del costo de realizar la adquisición de imágenes NDVI y su posterior procesamiento, el mismo deberá ser tenido en cuenta luego en el margen bruto final obtenido.
- Dado que el análisis es diferencial, se busca discriminar aquellos costos o ingresos que varían entre una metodología y otra
 Los valores de referencia de los insumos, labores y precios del grano con el que se realizó el cálculo son:
 - Aplicación uniforme (voleo): USD 11.88 ha⁻¹
 - Aplicación VRT (voleo): USD 12 ha⁻¹
 - Cosecha: 8% del valor de la producción cosechada
 - Costo Urea: USD 410 t⁻¹
 - Precio Trigo: USD 166 t⁻¹
 - TC utilizado USD ARS⁻¹ = 16

Realizando el análisis de costo beneficio incremental, se obtienen los siguientes resultados:

	Parcelas Optimización N			Parcelas Práctica Usual Productor		
	A1	A2	A3	P1	P2	P3
Valores productivos						
Fertilizante (kg urea ha ⁻¹)	121	130	124	235	235	235
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	4511	5321	4673	4553	5351	4138
Costos						
Fertilizante (USD ha ⁻¹)	50	53	51	96	96	96
Labor con VRT (USD ha ⁻¹)	12	12	12			
Labor sin VRT (USD ha ⁻¹)				12	12	12
Cosecha (USD ha ⁻¹)	60	71	62	60	71	55
Total Costos (USD ha ⁻¹)	122	136	125	169	179	163
Promedio Costos (USD ha ⁻¹)	128			170		
Ahorro Incremental por uso de metodología (USD ha ⁻¹)	42.86					
Ingresos						
Producción [USD/ha]	749	883	776	756	888	687
Promedio Ingresos (USD ha ⁻¹)	802.58			776.99		
Ingresos extra por uso de metodología (USD ha ⁻¹)	25.59					
Beneficio Total por uso de metodología (USD ha ⁻¹)	68.45					

Como se puede observar, en todos los casos se obtuvo un ahorro de fertilizantes nitrogenados de aproximadamente 50%, contribuyendo a un aporte diferencial positivo al beneficio total de, en promedio, 42 USD ha⁻¹.

Por otra parte, para las superficies sujetas a ensayo, se observaron los mismos rindes en todas salvo una repetición. En dicha repetición se obtuvo un rinde adicional de aproximadamente un 13%, lo cual en el promedio general aporta un beneficio adicional de 25 USD ha⁻¹ en el promedio de todo el ensayo.

Conclusiones

El diagnóstico de la fertilización nitrogenada en trigo mediante el uso de sensores remotos presentó ventajas sobre el diagnóstico en base a muestreo de suelos previo a la siembra. La principal ventaja fue un mejor ajuste de la dosis de N a emplear, donde se redujo el uso del fertilizante en un 48% sin afectar el rendimiento. Asimismo, se observó esta mejora en el margen diferencial de las prácticas, donde la metodología que optimiza y reduce el uso de fertilizante presentó un beneficio económico cercano a los 70 USD ha⁻¹.

El uso eficiente de N (sin excedentes que lixivien) tiene asociado un impacto ecológico positivo, abriendo las puertas a una agricultura más sustentable, con especial cuidado en la preservación de acuíferos. Por otra parte, se verificó que además de los beneficios económicos y ecológicos por ahorro de N, existió un aumento en el rinde en sitios en donde hay evidencia de una alta disponibilidad de nitrógeno base al evitar la saturación/sobre-aplicación.

La adopción de prescripciones basadas en algoritmos que engloban múltiples fuentes de información histórica y de la campaña en curso abre nuevas oportunidades para mejorar la competitividad en la producción de cereales.

Por último, el nuevo paradigma de AgTech/Digital Farming elimina la brecha entre productos y tecnologías de procesamiento de grandes cantidades de datos e inteligencia artificial, entre otros, pudiendo resolver estas complejas tareas con la simple entrega de un archivo para colocar en una controladora VRT.

Bibliografía

Álvarez, R., C.R. Álvarez, y H.S. Steinbach. 2000. Fertilización de trigo y maíz. Ed. Hemisferio Sur, Buenos Aires, 95 pág.

Bongiovanni, R., y R. Lowenberg-De Boer. 2001. Agricultura de precisión y sustentabilidad. 2001. En: Actas del VII Congreso Nacional de Maíz, Pergamino, Argentina, CD.

FAO. 2002. Agricultura mundial: hacia los años 2015/2030. FAO. 2004. Las buenas prácticas agrícolas. Oficina regional de la FAO para América Latina y el Caribe. www.rlc.fao.org/es/agricultura/bpa/docfao/110.doc.

Ferraris, G. N., A. Caamaño, y A. Capridi. 2012. Efectos sobre la Fitotoxicidad y el Rendimiento de Dosis Crecientes de Fertilizantes Fosforados y Nitrogenados en Trigo. <http://www.fertilizando.com/articulos/Trigo%20-%20Efectos%20sobre%20Fitotoxicidad%20y%20Rendimiento.asp>.

Fitzgerald, G. J., D. Rodríguez, L.K. Christensen, R. Belford, y V.O. Sadras. 2006. Spectral and thermal sensing for nitrogen and water status in rainfed and irrigated wheat environments. *Precision Agricultural Journal* 7:233-248.

García, F.O., y N. I. Reussi Calvo. 2014. Trigo. Pp:401-434. En: H. E. Echeverría y F. O. García (eds.) *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Editoria INTA, Buenos Aires, Argentina.

Hatfield, J.L., y J.H. Prueger. 2010. Value of using different vegetative indices to quantify agricultural crop characteristics at different growth stages under varying management practices. *Remote sensing*. 2: 562-578.

Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale, y W.L. Nelson. 2005. *Soil fertility and fertilizers*. 7th ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ. P. 515.

Melchiori, R., P.A. Barbagelata, S.M. Albarenque, A.A. Bianchini, y W. Raun. 2008. Spatial resolution for N management with active sensors in corn. 9th International Conference of Precision Agriculture. Denver, Colorado.

Mullen, R.W., K.W. Freeman, W.R. Raun, G.V. Johnson, M.L. Stone, y J.B. Solie. 2003. Identifying an in-season response index and the potential to increase wheat yield with nitrogen. *Agronomy Journal*. 95: 347-351.

Niborski, M.J., S. Urricariet, G. Sznaider, M. Amado, y H. Rosatto. 2004. Variabilidad de la humedad del suelo, contenidos de arena y materia orgánica y su asociación con rendimiento de cultivos. En: Navone S M, Rosatto H y Vilella F. (Eds.). *Teledetección aplicada a la problemática ambiental argentina*. CIATE/FAUBA. EFA, Buenos Aires. pp.117-124.

Pierce, F.J., y P. Nowak. 1999. Aspects of Precision Agriculture. *Advances in Agronomy* 67: 1-85.

Raun, W.R., J.B. Solie, M.L. Stone, K.L. Martin, K.W. Freeman, R.W. Mullen, H. Zhang, J.S. Schepers, y G.V. Johnson. 2005. Optical sensor based algorithm for crop nitrogen fertilization. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 36: 2783-2792.

Raun, W.R., J.B. Solie, G.V. Johnson, M.L. Stone, R.W. Mullen, K.W. Freeman, W.E. Thomason, y E.V. Lukina. 2002. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. *Agronomy Journal*. 95: 815-820.

Redel, H.M., A. Medina, y M.M. Zubillaga. 2012. Mineralización del nitrógeno para una agricultura por ambientes. Congreso Ciencia del Suelo, Mar del Plata. Argentina.

Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, y D.W. Deerin. 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. N. SP-351. Ed Third ERTS Symposium. 1,309-317. Whashington. NASA.

SAGYP-INTA. 1989. Mapas de suelos de la provincia de Buenos Aires.

Stone, M.L., J.B. Solie, W.R. Raun, R.W. Whitney, S.L. Taylor, y J.D. Ringer. 1996. Use of spectral radiance for correcting in se-season fertilizer nitrogen deficiencies in winter wheat. *Trans. ASAE* 39: 1623-1631.

Teal, R.K., B. Tubana, K. Girma, K.W. Freeman, D.B. Arnall, O. Walsh, y W.R. Raun. 2006. In-season prediction of corn grain yield potential using normalized difference vegetation index. *Agron. J.* 98:1488-1494.