



IV CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2018

Aguascalientes, Ags., del 15 al 18 de octubre de 2018

USO DE VANT EN EL MONITOREO DE REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES

**Victor Manuel Gordillo Salinas^{1*}; Héctor Flores Magdaleno²; Carlos A. Ortiz Solorio³;
Ramón Arteaga Ramírez⁴; Antonia Macedo Cruz²; Juan Enrique Rubiños Panta¹**

¹Coordinación de Riego y Drenaje. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. México.

manuel_gordillo@tlaloc.imta.mx – (777) 329 3600 ext. 864 (*Autor de correspondencia)

²Hidrociencias. Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco Km. 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México. C.P. 56230.

³Edafología. Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco Km. 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México. C.P. 56230.

⁴Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5 Carretera México – Texcoco Chapingo, Texcoco, Estado de México C.P. 56230.

Resumen

El consumo excesivo de los fertilizantes nitrogenados es uno de los actores principales en la problemática de la insostenibilidad de las actuales prácticas y manejos en la producción de alimentos, las cuales han causado una serie de problemas medioambientales y de salud humana. Ante esta situación, surgió la alternativa del uso de los sensores remotos y VANT'S (vehículos aéreos no tripulados) para generar información que coadyuve a una agricultura de precisión donde el fertilizante pueda aplicarse en dosis óptima, en el tiempo y lugar correcto. El experimento se estableció en el Colegio de Postgraduados campus Montecillo, la variedad de trigo sembrada fue Nana F2007, el diseño experimental fue bloques completamente al azar con 7 tratamientos de Nitrógeno (0,4,6,8,10,14 y 18 g/m²) y 4 repeticiones, se usó un VANT multirrotor (3DR X8+) con una cámara canon S110 NIR, se hicieron 4 campañas de vuelo durante las etapas fenológicas de vaina engrosada, espigado, inicio de antesis y fin de antesis. Se midió la Biomasa aérea (materia seca) y la concentración de nitrógeno (CN) de la parte área del cultivo, con el uso de las imágenes del sensor se estimaron los índices de vegetación NDVI "verde" (GNDVI, siglas en inglés) y NDVI "azul" (BNDVI, siglas en inglés). Los resultados arrojaron curvas de ajuste aceptables donde el índice BNDVI pudo estimar de manera confiable la biomasa aérea presentando un $R^2=0.7533$, mientras que el índice GNDVI como estimador confiable del contenido de nitrógeno presentó un $R^2=0.8139$.

Palabras claves: Sensores remotos, índices de vegetación, etapas fenológicas, biomasa aérea, contenido de nitrógeno.



Introducción

La agricultura intensiva ha obligado a un cambio de paradigma en cuanto al manejo eficiente de la fertilización, en la actualidad estamos en la disyuntiva, por una parte, seguir produciendo mayor volumen de productos agrícolas para satisfacer la demanda humana, pecuaria e industrial y por la otra hacer un uso eficiente de los recursos naturales.

Dentro de todo el contexto de la producción agrícola intensiva, la aplicación de fertilizantes químicos de manera irracional y excesiva ha sido uno de los actores principales en la contaminación de los distintos ecosistemas, de manera más específica el “nitrógeno”, uno de los macronutrientes de las plantas, es el que ha propiciado una mayor incidencia negativa, provocando problemas como la eutrofización, la lluvia ácida, la contaminación del agua potable y las emisiones de óxidos nitrosos (Matson et al., 1997; Spiertz, 2010; Cameron et al., 2013; OECD, 1982 y WHO 1984).

Los agricultores y administradores agropecuarios están interesados en la medición y evaluación del estado nutricional de los cultivos en fechas críticas específicas: en primer lugar, en las etapas de crecimiento tempranas a fin de suministrar adecuadas cantidades de fertilizantes para un crecimiento normal de la cosecha, y la segunda, durante la etapa de un desarrollo avanzado para el monitoreo de la salud y la predicción de rendimiento.

Desde hace algunos años, los sensores remotos desempeñan un papel importante como fuente de información oportuna en tiempo y espacio para la agricultura de precisión, debido a sus capacidades en la medición de indicadores/parámetros biofísicos y detección de la variabilidad espacio-temporal.

Los índices de vegetación (IV) se han propuesto como una forma indirecta de medir variables biofísicas de la vegetación con base en datos espectrales obtenidos con sensores remotos. Los índices han sido relacionados positivamente (tanto en forma lineal como logarítmicamente) con peso seco del cultivo (CDM, crop dry mass), Índice de área foliar (LAI, Leaf Area Index), Índice de área verde (GAI, green area index) y la fracción de radiación fotosintéticamente activa (PAR, photosynthetically active radiation) para el dosel en cereales de granos pequeños tales como trigo harinero y cebada (*Hordeum vulgare* L.). (Bellairs et al., 1996; Fernández et al., 1994; Field et al. 1994; Peñuelas et al., 1997).

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) ha sido utilizado como medida indirecta de la biomasa y el rendimiento del cultivo, incluyendo la de trigo (Raun et al., 2001; Pinter et al., 2003; Prasad et al., 2007).

Wang et al. (2007), analizaron la relación existente entre el índice de área foliar (IAF), como parámetro estructural fundamental en la descripción del estado de la cubierta vegetal del cultivo de arroz, y 7 índices de vegetación que utilizan las bandas del espectro del visible, medidos con un radiómetro, concluyendo que el IAF y los NDVI's con las distintas bandas en el visible (VNDVI) presentan valores de coeficiente de R^2 mayores de



0.85, igualmente demuestra que el BNDVI y GNDVI presentan $R^2=0.981$, mientras que el BNDVI y NDVI un $R^2=0.987$.

En los últimos años, la miniaturización de sensores multiespectrales, hiperespectrales y térmicos aunado a los avances en software, hardware, electrónica, mecatrónica además de la liberación de las tecnologías de posicionamiento, han permitido que dichos sensores sean montados en VANT's, haciéndolos más populares y surgiendo como una herramienta viable para la agricultura de precisión (AP).

Diferentes aplicaciones en AP usando VANT's con sensores remotos han sido un parteaguas en la forma de realizar acciones pasivas (mapeo, monitoreo) y activas (aspersión) en la producción agrícola, Hunt *et al.* (2010) mostraron la aplicación de una cámara digital Fuji FinePix S3 Pro UVIR montada sobre un VANT, como método para medir el índice de área foliar (IAF) de trigo, encontrando que el índice de vegetación de diferencia normalizada verde (GNDVI) correlaciona muy bien a esta variable biofísica, reportando un $R^2=0.85$, siempre y cuando el IAF sea menor de 2.7, concluyen mencionando que el sistema de cámara de peso ligero puede usarse para proporcionar información importante en la toma de decisiones agrícolas.

Geipel *et al.* (2016), desarrollo un prototipo de cámara multiespectral para estimación aérea de biomasa y contenido de nitrógeno en trigo de invierno (*Triticum aestivum L.*) diseñado para VANT's. El sistema captura imágenes multiespectrales con las cuales estimaron el Índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI, siglas en inglés) y el punto de inflexión del borde del rojo (REIP, siglas en inglés), encontrando que los mejores resultados para estimación de biomasa aérea fueron alcanzados con el NDVI ($R^2=0.72-0.85$), mientras el contenido de nitrógeno fue estimado mejor con REIP ($R^2=0.59-0.89$).

El objetivo principal del trabajo de investigación es conocer y demostrar si el Índice de vegetación de diferencias normalizadas "Azul" (BNDVI, por sus siglas en inglés) y el Índice de vegetación de diferencias normalizadas "verde" (GNDVI), derivados de los sensores remotos con VANT's son sensibles a la heterogeneidad de biomasa y CN presente en una parcela sembrada con trigo.

Materiales y Métodos

Ubicación

El trabajo de investigación se llevó a cabo en las instalaciones del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, en Montecillo, Texcoco, Estado de México, con un cultivo de trigo variedad Nana F2007 liberado por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

El área del experimento tiene una superficie alrededor de 3000 m² (Figura 1), se instaló un sistema de riego por goteo, manteniendo siempre el suelo a capacidad de campo y

evitando que esta variable afectara al comportamiento de las distintas dosis de nitrógeno aplicado.



Figura 1. Área de establecimiento del trabajo de investigación (área a volar). La figura a) muestra un panorama general de las unidades experimentales y b) representa una sola unidad experimental y se observa el tipo de sistema de riego (goteo).

Diseño Experimental

El diseño estadístico fue bloques completamente al azar con 7 tratamientos de N (0, 4, 6, 8, 10, 14, 18 g/m²) y cuatro repeticiones (28 unidades experimentales), el tamaño de las unidades experimentales fue 10 x 4.5 m (Figura 2).

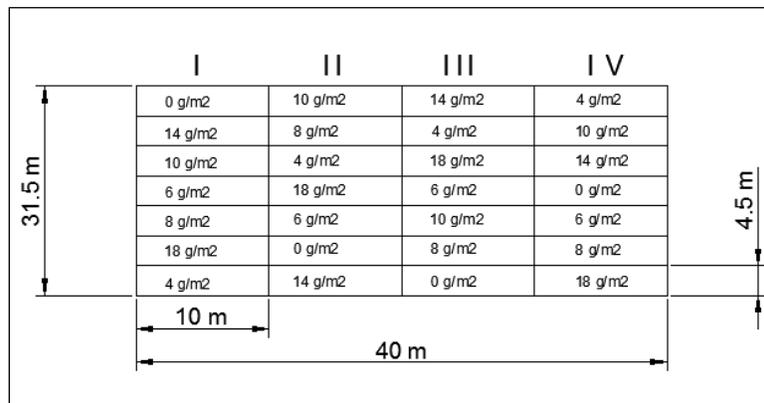


Figura 2. Arreglo del diseño experimental.

La cantidad total de N aplicado fue dividida en dos partes: la primera aplicación a la siembra y en Z31 (Escala de Zadoks), la cual corresponde a la etapa de inicio de elongación de tallo (primer nudo), la escala de Zadoks es la más utilizada en el cultivo de trigo y sólo describe estados morfológicos externos del cultivo que involucran algunos procesos de desarrollo y otros de crecimiento, la escala Zadoks tiene 10 fases numeradas de 0 a 9 que describen el cultivo. Antes de la siembra se realizó un análisis de N en suelo antes de la primera aplicación para conocer el nivel de este elemento en todas las unidades experimentales.

Adquisición de imágenes aéreas

La plataforma aérea usada fue un VANT multirrotor 3DR X8+, el sensor usado en este estudio fue la Cámara digital Canon S110 NIR, con las bandas espectrales azul, verde e infrarrojo cercano (Figura 3).



Figura 3. VANT y cámara digital canon S110 NIR.

Fueron realizadas 4 misiones de vuelo durante la etapa media del desarrollo del cultivo. Las misiones fueron conducidas durante las etapas de crecimiento Z45, Z55, Z61 y Z69, las etapas de crecimiento corresponden a las etapas de vaina engrosada, espigado, inicio de antesis y fin de antesis. Las misiones se planearon a una altura sobre el nivel del suelo de 50 m, un traslape frontal de 70 % y lateral de 60 % y una resolución espacial de alrededor de 1.5 cm/pixel

Muestreo de campo

Se realizó un muestreo de campo mediante método destructivo (Figura 4), donde el cultivo fue cortado lo más cercano a la superficie del suelo para un área de 0.25 m², a continuación, se pesó para determinar materia fresca, posteriormente fueron colocadas en el horno para secarlas y se volvió a pesar para conocer la materia seca, por último, se molió 50 g de muestra seca de cada unidad experimental y se enviaron 28 muestras por vuelo al laboratorio para estimar el CN.



Figura 4. Muestreo de campo y medición de biomasa.

Procesamiento de Imágenes y datos experimentales

Se procesaron las imágenes con el software Pix4D que requiere de puntos de control en tierra y el log del vuelo, este último contiene las localizaciones gruesas de las imágenes, se obtuvo como salida un ortomosaico, en formato GeoTIFF con sistema de coordenadas proyectadas WGS 1984, UTM zona 14 norte, para cada misión de vuelo, la nube de puntos y los mapas de reflectancia de cada banda.

Los datos de biomasa (materia seca) y contenido de nitrógeno fueron sometidos a un proceso de eliminación de valores atípicos (outliers) usando el rango intercuartil, que es una estimación estadística de la dispersión de una distribución de datos con la finalidad de evitar que valores extremos afecten el valor promedio de la variable de interés, posteriormente se realizó un gráfico del comportamiento de la biomasa y el contenido de nitrógeno a través del tiempo (fechas de campañas de vuelo).

Cálculo de índices de vegetación

Uno de los índices más utilizados es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, NDVI, (Rouse, 1973) que contrasta la reflectancia en el rojo (centrada en 670 nm) y en el infrarrojo cercano (centrada en 860 nm). Sin embargo, se ha demostrado que se satura para valores de IAF superiores a 3. La limitante, antes mencionada, ha llevado a que se desarrollen una serie de índices alternativos entre ellos el índice de vegetación de diferencias normalizadas verde (GNDVI), que es una variante del NDVI, donde se sustituye la banda roja por la banda verde y el índice de vegetación de diferencias normalizadas azul (BNDVI) donde se sustituye la banda roja por la banda azul, en la Tabla 1 se muestran los 2 índices, la relación de bandas involucradas para su estimación y la fuente.



Tabla 1. Índices de Vegetación (IV) utilizados en el estudio, ecuación del IV y la fuente.

Índice de vegetación	Ecuación	Fuente
GNDVI	$\frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN}$	(Gitelson et al., 1996)
BNDVI	$\frac{NIR - BLUE}{NIR + BLUE}$	(Yang et al., 2004)

Donde:

NIR= valores de la banda del infrarrojo cercano

GREEN= Valores de la banda del verde

BLUE= Valores de la banda del azul

El software Pix4D, cuenta con una herramienta donde podemos hacer álgebra de mapas, dicha herramienta nos permitió estimar los índices de vegetación.

Clasificación orientada a objetos

La clasificación de imágenes mediante la técnica de clasificación orientada a objetos, intenta separar la vegetación de las demás clases presentes en la escena en función de los patrones de forma, características espaciales y espectrales, consiguiendo con esto obtener grupos de píxeles puros de la vegetación (trigo).

El modelo de análisis de imágenes orientada a objetos se basa en primer lugar en realizar una segmentación de la imagen, en donde se estableció como características de segmentación darle un mayor peso (el doble) a la banda del infrarrojo cercano ya que se considera que cuando es vegetación la banda antes mencionada tiene mayor influencia, para poder parar la segmentación se usó el parámetro de escala de 20, esto dependerá del tamaño del objeto en la imagen que se pretende segmentar, en cuanto a los criterios de homogeneidad como la forma y la compacidad fueron de 0.1 y 0.5 respectivamente.

Después de la segmentación, el proceso que se realizó fue la clasificación, donde se usó una clasificación supervisada, la cual necesita de zonas de entrenamiento para definir las distintas clases presentes en la imagen, y el clasificador fue el de vecino más cercano.

Extracción del valor promedio de los índices de vegetación

Para cada unidad experimental se extrajeron las estadísticas de los IV de cada unidad experimental (media, máximo, mínimo y desviación estándar) con la herramienta "Zonal Statistics" del software QGIS.

El valor representativo de cada unidad fue el valor promedio de los índices y fue este dato el que se usó para compararlo con las variables de biomasa y CN



Resultados y Discusión

Campañas de vuelo

El resultado de los planes de vuelo programados durante las distintas etapas fenológicas del cultivo de trigo es resumido en la Tabla 2.

Tabla 2. Características de los vuelos realizados con VANT's en las diferentes etapas fenológicas, identificadas con la nomenclatura Zadoks. La tabla comprende la fecha de la misión, el número de imágenes (n) capturadas con el sensor, altura de vuelo (A), puntos de control en tierra (PCT), resolución espacial y la hora de vuelo.

Fecha	Escala Zadoks	n	A (m)	PCT	Resolución (cm/pixel)	hora
29-03-2017	Z45	46	50	8	1.5	12:00
6-04-2017	Z55	57	50	8	1.59	11:30
12-04-2017	Z61	55	50	8	1.51	13:30
20-04-2017	Z69	33	50	8	1.39	12:30

Las misiones se realizaron en la etapa media del cultivo, correspondiente a las etapas de vaina engrosada (Z45), espigado (Z55), inicio de antesis (Z61) y fin de antesis (Z69), en promedio se obtuvieron 50 imágenes útiles por vuelo, en el vuelo del 20 de abril se presentó un problema en el disparo de la cámara por lo que para esta fecha las fotos resultantes fueron menores, a pesar de esto, fue posible la reconstrucción de los objetos en la imagen, se obtuvo una resolución promedio de 1.5 cm de pixel, y se ejecutaron las misiones de vuelo a medio día para evitar el sombreado.

Biomasa aérea (peso seco)

La biomasa se comportó con una tendencia lineal positiva, donde a medida que avanzaban las fechas de vuelo aumentaba el peso seco de las muestras colectadas, se observó que la tasa de crecimiento de la biomasa es menor cuando los niveles de tratamientos de N son bajos, mientras que en los tratamientos de dosis altas de N la biomasa tiene un aumento mayor.

Los datos de campo mostraron que la biomasa es dependiente de la dosis de N aplicada, estos resultados concuerdan con datos presentados en distintas investigaciones (Geipel et al. 2016; Lebourgeois et al., 2008; Melchiori et al., 2016)

En la Figura 5 se muestra como fue el comportamiento de la biomasa para los distintos niveles de N a través de las 4 campañas de vuelo.

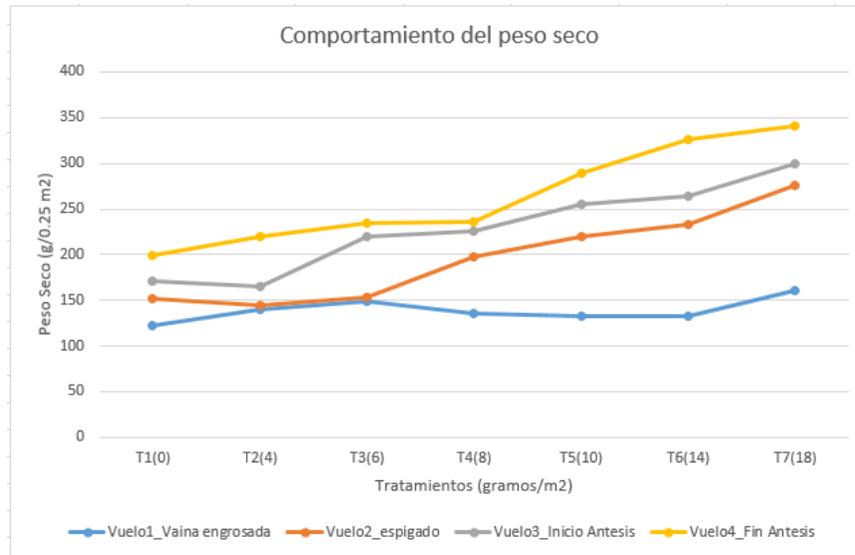


Figura 5. Comportamiento de la Biomasa (peso seco) a varios niveles de N a través del tiempo (4 campañas de vuelo)

Contenido de nitrógeno

Los resultados de laboratorio para contenido de nitrógeno de la parte aérea de la planta muestran que a medida que avanzan los vuelos, el contenido de nitrógeno va disminuyendo como se puede observar en la Figura 6, esto quiere decir que a medida que el cultivo pasa de etapas medias hacia madurez el CN va disminuyendo, la etapa fenológica de vaina engrosada que corresponde al primer vuelo es donde se presentan los valores más altos de CN, mientras los valores más bajos son observados en fin de antesis, que corresponde a la última misión de vuelo, de igual forma se puede ver que en el vuelo 1 la pendiente de cambio es mayor para los distintos tratamientos, mientras que en el vuelo 4 los valores de CN en todos los tratamientos es prácticamente horizontal.

En experimento muestra una tendencia de mayor (%) de N con el aumento de la dosis de N, es decir el N tuvo efecto sobre el CN presente en el tallo y paja del trigo, estos resultados concuerdan con los obtenidos por Emam et al. (2009), Nikolic (2009) y Ballesteros et al. (2016), en cereales, y los de Samonte et al. (2006), en otros cultivos.

En el vuelo 3 (inicio de antesis), existe un valor atípico del CN, donde presenta una caída, por practicidad al momento de ajustar la línea de tendencia y estimar el R^2 , este dato fue despreciado ya que no es representativo comparado con los demás datos.

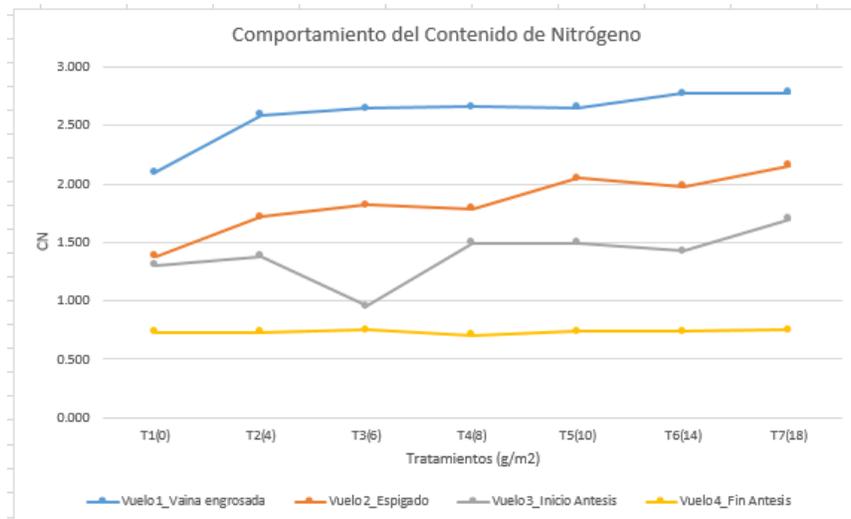


Figura 6. Comportamiento del CN a diferentes niveles de N a través del tiempo (4 Campañas de vuelo).

Correlación Índices de vegetación con variables biofísicas

Los resultados de las correlaciones entre los IV y las variables biofísicas muestran que existe buena correlación entre el índice de vegetación de diferencias normalizadas “azul” (BNDVI) y la biomasa expresada como peso seco durante las 4 campañas de vuelo (Figura 7), y el vuelo 2 (6-04-2017) que corresponde a la etapa fenológica de espigado es donde se presenta el mayor coeficiente de determinación $R^2=0.7533$ (Figura 7.b).

De manera general se puede observar que, a mayor biomasa, mayor es el valor de BNDVI, el enfoque de usar índices de vegetación para mostrar diferencias de la biomasa en un campo agrícola es viable ya que el IV presenta diferencias durante el crecimiento del cultivo similares a los datos medidos en campo, estos resultados también son presentados por trabajos anteriores (Fu-min, 2007; Corti, 2017; Campos et al. 2018).

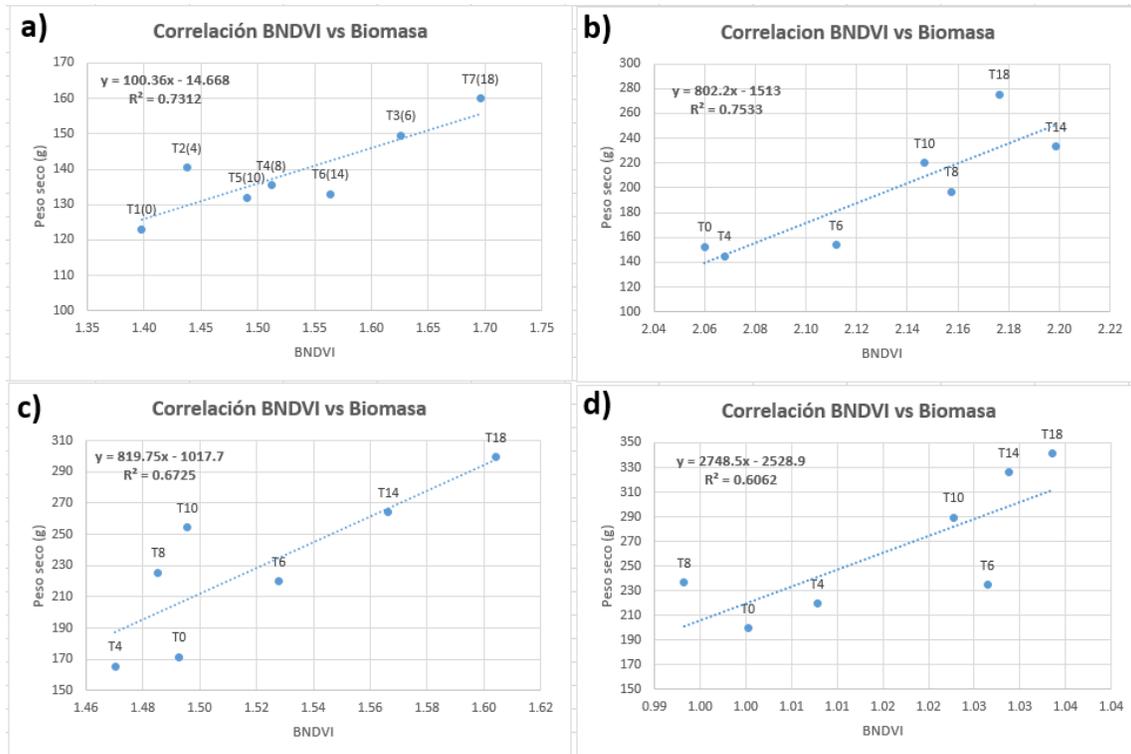


Figura 7. Correlación entre el índice de vegetación BNDVI y la biomasa para 4 vuelos. a) 29-03-2017). b) (6-04-2017). c) (12-04-2017). d) (20-04-2017).

En lo que respecta al contenido de nitrógeno (CN), los resultados muestran que la correlación existente entre el índice GNDVI y el CN durante las 4 campañas de vuelo (Figura 8) presentan una tendencia lineal y la curva de ajuste tiene un R^2 hasta de 0.8139, esta situación se presentó en la campaña de vuelo 2 (6-04-2017).

En la Figura 8 se pueden observar las distintas curvas de ajuste para el índice GNDVI y el CN, las tres primeras etapas de vuelo muestran una tendencia donde el tratamiento de 0 g/m² presenta valores de GNDVI más bajos, y por el contrario el tratamiento de 18 g/m² cuenta con los valores más altos del IV, para la campaña de vuelo 4 los valores de GNDVI son más compactos, la variación es muy poca y el tratamiento de 8 g/m² presenta un valor atípico.

De manera general los resultados presentados en esta investigación demuestran que el GNDVI es un buen predictor del CN, y es una herramienta alternativa no destructiva para el monitoreo del CN, investigaciones pasadas como reportan resultados similares (Gitelson et al., 1996; Hatfield et al., 2008; Candiago et al. 2015; Magney et al. 2017).

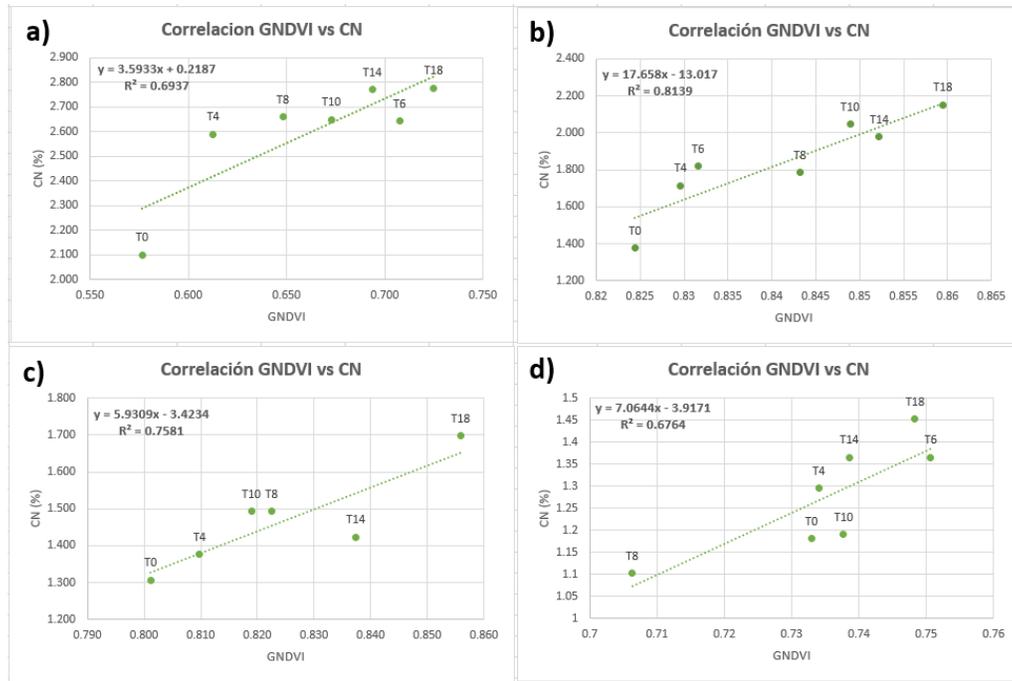


Figura 8. Correlación entre el índice de vegetación GNDVI y el CN para 4 vuelos. a) (29-03-2017). b) (6-04-2017). c) (12-04-2017). d) (20-04-2017).

Conclusiones

Los índices de vegetación estimados desde los sensores remotos con VANT's son capaces de detectar la variabilidad y heterogeneidad de las necesidades nutrimentales en un cultivo de trigo a nivel de parcela ya que son sensibles a los cambios que se producen en las distintas etapas fenológicas del cultivo, llegando a obtener un R^2 hasta de 0.7533 en la estimación de la biomasa usando el BNDVI y un R^2 de 0.8139 para estimar CN con el GNDVI, de igual forma se comprobó que los índices variantes del NDVI obtenidos con cámaras comerciales modificadas son una opción económica y confiable para poder monitorear variables biofísicas de los cultivos.

Los VANT's representan una alternativa asequible al momento de buscar imágenes de alta resolución espectral y temporal, y con la ayuda del avance de los sensores de peso ligero se ha conseguido la alta resolución espectral (sensores hiperspectrales).

El sistema sensor ligero-VANT, es una tecnología con gran potencial para los tomadores de decisiones, previo a realizar acciones activas, ya que puede proporcionar información oportuna de los cultivos monitoreados.



Referencias Bibliográficas

- Ballesteros R., Vaca, V. M., Morales, E. J., Mora, F., Zamudio, B. y Gutiérrez, F. (2016). Fraccionamiento de nitrógeno: eficiencia de recuperación y concentración proteica en triticale (xTriticosecale Wittmack). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(3), 585-598.
- Bellairs, M., Turner, N.C., Hick, P.T. y Smith, R.C.G. (1996). Plant and soil influences on estimating biomass of wheat in plant breeding plots using spectral radiometers. *Australian Journal of Agricultural Research*, 47(7), 1017–1034.
- Cameron, K.; Di, H.; Moir, J. (2013) Nitrogen losses from the soil/plant system: A review. *Annals of Applied Biology*, 162(2), 145–173.
- Campos, I., González G., L., Carrilero, J., Calera, M., Campoy, J., Jiménez, N., Plaza, C., Sánchez-Prieto, S. y Calera, A. (2018). Mapping within-field variability in wheat yield and biomass using remote sensing vegetation indices. *Precision Agriculture*, 1-23.
- Candiago, S., Remondino, F., De Giglio, M., Dubbini, M. y Gattelli, M. (2015). Evaluating Multispectral Images and Vegetation Indices for Precision Farming Applications from UAV Images. *Remote Sensing*, 7(4), 4026-4047; doi:10.3390/rs70404026
- Corti, M. (2017). Multispectral and hyperspectral sensing for nitrogen management in agriculture. Università degli studi di Milano. Dipartimento di scienze agrarie e ambientali - produzione, territorio, agroenergia. Milan, Italia.
- Emam, Y., Salimi K. S. y Shokoufa, A. 2009. Effect of nitrogen levels on grain yield and yield components of wheat (*Triticum aestivum* L.) under irrigation and rainfed conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 7(1), 323-334.
- Fernández, S., Vidal, D., Simón, E. y Solís-Sugranes. (1994). Radiometric characteristics of *Triticum aestivum* cv. Astral under water and nitrogen stress. *International Journal of Remote Sensing*, 15(9), 1867–1884.
- Field, C.B., Gamon, J. y Peñuelas, J. (1994). Remote sensing of terrestrial photosynthesis. En Schulze, E.D. y Caldwell, M.M. (ed.) *Ecophysiology of photosynthesis* (pp. p. 511–528). Springer-Verlag, Berlin.
- Fu-min, W., Jing-feng, H., Yang-lin, T. y Xiu-zhen, W. (2007). New Vegetation index and its application in estimating leaf area index of rice. *Rice Science*, 21(2), 159-166.
- Geipel, J., Link, J., Wirwahn, J.A. y Claupein W. (2016). A programmable aerial multispectral camera system for in-season crop biomass and nitrogen content estimation. *Agriculture*, 6(1), 4.
- Gitelson, A. Kaufman J., Y.; Merzlyak N., M. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58. 289-298. doi:10.1016/S0034-4257(96)00072-7.



- Hatfield, J. L., Gitelson, A.; Schepers, J; y Walthall, C. L., (2008). Application of Spectral Remote Sensing for Agronomic Decisions. *Papers in Natural Resources*. 257.
- Hunt, E.R., Hively, W.D., Fujikawa, S., Linden, D., Daughtry, C.S., y McCarty, G. (2010). Acquisition of NIR-Green-Blue digital photographs from unmanned aircraft for crop monitoring. *Remote Sensing*, 2(1), 290-305. doi:10.3390/rs2010290.
- Lebourgeois, V., Bégué, A., Labbé, S., Mallavan, B., Prévot, L. y Roux, B. (2008) Can Commercial Digital Cameras Be Used as Multispectral Sensors? A Crop Monitoring Test. *Sensors*, 8(11), 7300-7322. doi:10.3390/s8117300.
- Magney, T.S., Eitel, J.U.H. & Vierling, L.A. (2017). Mapping wheat nitrogen uptake from RapidEye vegetation indices. *Precision Agriculture*, 18(4), 429-451. doi: 10.1007/s11119-016-9463-8.
- Matson, P.A., Parton, W.J., Power, A.G., Swift, M.J. (1997). Agricultural Intensification and Ecosystem Properties. *Science*, 277(5325), 504–509. doi: 10.1126/science.277.5325.504.
- Melchiori, R.J.M., Kemerer, A.C., Casuccio, L.M., Albarenque, S.M. (2016). Uso de imágenes de drones y sensores para evaluar el efecto del nitrógeno en trigo. 15° Curso internacional de agricultura y ganadería de precisión con agregado de valor en origen. Córdoba, Argentina.
- Nikolic, O. 2009. Geneticka divergentnost genotipova pšenice za parameter efikasnosti ishrane azotom. Doctoral thesis. Faculty of Agriculture Zemun, Belgrade, Serbia. 112 p.
- OECD. (1982). Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessment and Control; Final Report; Organization for Economic Co-Operation and Development (OECD): Paris, France.
- Peñuelas, J., Isla, R., Filella, I. y Araus, J.L. (1997). Visible and near-infrared reflectance assessment of salinity effects on barley. *Crop Science*, 37(1), 198–202.
- Pinter, P., Hatfield, J.L., Schepers, J.S., Barnes, E.M., Moran, M.S., Daughtry, C.S.T., Upchurch, D.R. (2003). Remote sensing for crop management. *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, 69, 647–664.
- Prasad, B., Carver, B.F., Stone, M.L., Babar, M.A., Raun, W.R., y Klatt, A.R. (2007). Potential use of spectral reflectance indices as a selection tool for grain yield in winter wheat under great plains conditions. *Crop Science*, 47, 1426–1440.
- Raun, W.R., Solie, J.B., Johnson, G.V., Stone, M.L., Lukina, E.V., Thomason, W.E. y Schepers, J.S. (2001). In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. *Agronomy Journal*, 93, 131–138.



- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. and Deering, D.W. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351 I, pp. 309–317.
- Samonte, S. O., Wilson, L. T., Medley, J. C., Pinson, S. R. M., McClung, A. M. y Lales, J. S. 2006. Nitrogen utilization efficiency: relationships with grain yield, grain protein, and yield-related traits in rice. *Agronomy Journal*, 98(1), 168-176.
- Spiertz, J.H.J. (2010). Nitrogen, sustainable agriculture and food security. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30(1), 43–55.
- WHO. (1984). Guidelines for Drinking-Water Quality, Volume 1: Recommendations; World Health Organization (WHO): Geneva, Switzerland.
- Wang, F.M., J.F. Huang, Tang, Y.L. y Wang, X.Z. (2007). New vegetation index and its application in estimating leaf area index of rice. *Rice Science*, 14(3), 195-203.
- Yang, Ch., Everitt, J. H., Bradford, J. M. (2004). Airborne Hyperspectral Imagery and Yield Monitor Data for Mapping Cotton Yield Variability. *Precision Agriculture*, 5, 445-461.