

Nitrógeno total en maíz forrajero (*Zea mays* L.) estimado mediante índices espectrales con el satélite Sentinel-2
Total Nitrogen in forage corn (*Zea mays* L.) estimated by satellite Sentinel-2 spectral indices

**Magali J. López-Calderón¹, Juan Estrada-Ávalos^{2†}, Aldo R. Martínez-Sifuentes²,
 Ramón Trucíos-Caciano² y Enrique Miguel-Valle²**

¹ Facultad de Agricultura y Zootecnia. Universidad Juárez del Estado de Durango. Carretera Gómez Palacio-Tlahualilo km 32, Venecia. 35000 Gómez Palacio, Durango. México.

² Centro de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Margen derecho del canal del Sacramento km 6.5. 35140 Gómez Palacio, Durango, México.

[†] Autor para correspondencia (estrada.juan@inifap.gob.mx)

Editor de Sección: Dr. Pablo Preciado Rangel

RESUMEN

El nitrógeno es el nutriente más importante en cultivos forrajeros, debido a su participación en diversas reacciones bioquímicas en las diferentes etapas fenológicas de la planta. El objetivo del presente estudio fue desarrollar un modelo de regresión lineal múltiple para estimar el nitrógeno total (Nt) en planta de maíz a partir de imágenes satelitales. El porcentaje de Nt se determinó mediante tres muestreos de planta en cuatro parcelas experimentales. El modelo de estimación se obtuvo al procesar las imágenes satelitales Sentinel-2 de acuerdo a las fechas de muestreo, se calcularon 13 índices espectrales y se analizó la asociación entre los valores del contenido de nitrógeno y la reflectancia a través de: análisis de componentes principales (ACP), matriz de correlación y dendrograma. Los índices con mayor relación fueron MCARI/OSAVI, TCARI/OSAVI, MCARI/OSAVI RE y TCARI/OSAVI RE, esto permitió explicar más de 50% de la variabilidad del modelo propuesto y un EMC de 0.12. El presente estudio indicó que el cálculo de índices espectrales derivados de Sentinel-2 tiene gran potencial para conocer el estado nitrogenado del cultivo de maíz, sin embargo, para futuras investigaciones se sugiere obtener modelos de estimación de Nt por etapa fenológica del cultivo.

Palabras clave: borde rojo, regresión lineal múltiple, sensores remotos.

SUMMARY

Nitrogen is the most important nutrient for forage crops because of its contribution in various biochemical reactions in the different phenological stages of the plant. The main aim of this study is to develop a multiple linear regression model to estimate total nitrogen (Nt) in corn plants using spectral indexes. The percentage of total nitrogen (Nt) was determined through three plant samplings in four experimental plots. The estimation model was obtained to process the Sentinel-2 satellite images according to the plant sampling dates; 13 spectral indexes were calculated and the association between nitrogen and the reflectance values was analyzed by the principal component analysis (ACP), correlation matrix, and dendrogram. The indexes with the highest relationship were MCARI / OSAVI, TCARI / OSAVI, MCARI / OSAVI RE and TCARI / OSAVI RE, explaining more than 50% of the variability of the proposed model and a MSE of 0.12. This study indicates that the estimation obtained from Sentinel-2 spectral indexes images has great potential to determine nitrogen in crops. However, for future research, Nt estimation models should be obtained for each phenological crop stage.

Index words: red edge, multiple linear regression, remote sensing.



Cita recomendada:

López-Calderón, M. J., Estrada-Ávalos, J., Martínez-Sifuentes, A. R., Trucíos-Caciano, R., & Miguel-Valle, R. (2023). Nitrógeno total en maíz forrajero (*Zea mays* L.) estimado mediante índices espectrales con el satélite Sentinel-2. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-14. e1628. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1628>

Recibido: 31 de julio de 2022.
 Aceptado: 18 de octubre de 2022.
 Artículo. Volumen 41.
 Febrero de 2023.

INTRODUCCIÓN

Generar estrategias para optimizar la sustentabilidad de la producción agrícola intensiva a través del uso adecuado de la fertilización nitrogenada, es una práctica agronómica esencial para optimizar el crecimiento, rendimiento y calidad de los cultivos (Ju *et al.*, 2010; Sharifi, 2020). En este contexto, la aplicación de fertilizantes nitrogenados de manera irracional, ha sido uno de los principales actores en la contaminación y deterioro de los diferentes ecosistemas (Spiertz, 2010).

El nitrógeno (N) es el nutriente más importante en la planta, debido a que participa en múltiples reacciones bioquímicas con implicaciones en la fisiología en etapas de crecimiento, desarrollo y producción de los cultivos (Rao, 2009). Mediante el nivel de expresión de la clorofila es posible estimar el nivel de nitrógeno en la planta, debido a que existe una correlación entre ambas variables (Sánchez *et al.*, 2015). Esta relación se basa en que el nitrógeno forma parte de la molécula de la clorofila por lo que la falta de este elemento se refleja en una fotosíntesis ineficiente, lo que se manifiesta en hojas de color verde claro o amarillentas (clorosis) (Basso, Fiorentino, Cammarano y Schulthess, 2015). La clorosis se representa por un aumento en reflectancia del rango del espectro visible, y una disminución en la absorción de la región del infrarrojo cercano (Cruz-Durán, Sánchez, Galvis y Carrillo, 2011). Estos cambios en la reflectancia hacen posible estimar el contenido de nitrógeno en planta de manera indirecta mediante índices espectrales derivados de expresiones matemáticas que emplean las longitudes de onda del espectro electromagnético, situación que permite una eficiencia en costos y tiempo para la toma de decisiones en campo (Schlemmer *et al.*, 2013).

Se han desarrollado estudios para conocer la cantidad de clorofila, tanto a nivel de campo (hoja) como el uso de teledetección, proponiendo una gran variedad de índices que relacionan la reflectividad obtenida por sensores remotos en distintas bandas (Haboudane, Miller, Tremblay, Zarco y Dextraze, 2002). El uso de imágenes obtenidas a través de sensores montados en vehículos aéreos no tripulados (VANT), resultan una alternativa viable para estimar variables agronómicas, aunque en la actualidad su obtención todavía resulta limitada por los altos costos que representa la inversión de los equipos (López-Calderón *et al.*, 2020). Una alternativa de bajo costo, es el uso de imágenes de satélite como el satélite Sentinel-2, el cual puede monitorear la variabilidad espacial y temporal del contenido de nitrógeno, lo cual permite a los agricultores un manejo más preciso de sus predios (Zhang *et al.*, 2019; Crema, Boschetti, Nutini, Cillis y Casa, 2020).

El satélite Sentinel-2 cuenta con 13 bandas espectrales, tres de ellas corresponden a la región del borde rojo. En la literatura se ha documentado que existe una relación entre la posición del borde rojo y el contenido de clorofila en el cultivo de maíz (Clevers y Gitelson, 2013; Li *et al.*, 2014), esta característica del satélite lo hace un instrumento útil para la agricultura de precisión (Zhang *et al.*, 2019). Para este cultivo Sharifi (2020) utilizó imágenes de este sensor para estimar la concentración de nitrógeno a través de índices espectrales basados en el borde rojo y el infrarrojo cercano y obtuvo una $R^2 = 0.91$ al integrar la concentración de clorofila en la estimación del nitrógeno. De igual forma Martínez (2017) encontró una buena relación ($R^2 = 0.85$) entre índices espectrales con el contenido de nitrógeno en el mismo cultivo. Sin embargo, son nulos los estudios que han utilizado índices espectrales derivados de imágenes del satélite Sentinel-2 con el objetivo de estimar el contenido de nitrógeno en maíz forrajero en la Comarca Lagunera. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue desarrollar un modelo de regresión lineal múltiple con base en índices espectrales y análisis multivariado utilizando imágenes del satélite Sentinel-2, para estimar el contenido de nitrógeno en maíz forrajero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El experimento se desarrolló en una superficie de 130 ha, que se distribuyeron en cuatro parcelas, las cuales fueron nombradas Benito Juárez, Oto, Granadas y Solima; de acuerdo al nombre de la unidad de producción a la que pertenecen. La información de las parcelas se muestra en el Cuadro 1. Las parcelas experimentales se ubican al noroeste del municipio de Matamoros en el estado de Coahuila. La elevación promedio de la zona de estudio es de 1110 m de altitud, el clima regional es característico del semidesierto, con temperatura media anual de 20 a 22 °C, y un rango de precipitación de 200 a 300 milímetros (García, 1998).

Las prácticas culturales de manejo para cada una de las parcelas consistieron en barbecho, pase de rastra, bordeo, y nivelación a una pendiente de 2 cm a cada 100 m de longitud. La dosis de fertilización fue (217-55-00). La cuál se fraccionó en dos tiempos: el primero al momento de la siembra a razón de 250 kg ha⁻¹, incluyó mezcla física en proporción de 42% de sulfato de amonio, 42% de fosfato monoamónico (MAP) y 16% de Ryzogen, cubriendo la dosis total de fósforo y la mitad de nitrógeno. La segunda aplicación, para cubrir la dosis de nitrógeno, se realizó después del primer riego de auxilio con 400 kg ha⁻¹ de Urea. La densidad fue de 103 000 plantas por hectárea, con una distribución de ocho semillas por metro lineal y una distancia entre surcos de 0.75 m para las cuatro parcelas experimentales.

Muestreo en Campo y Análisis de Laboratorio

Se realizó un total de tres muestreos a lo largo del desarrollo de los cultivos de manera simultánea en las cuatro parcelas experimentales en el ciclo primavera-verano; el primero se realizó el 13 de mayo, el segundo el 2 de junio, y el tercero el 22 de junio de 2017. Se obtuvo una muestra compuesta de planta (MCP) por cada punto de muestreo, para antes de floración la MCP consistió en 3 plantas completas por parcela y para después de floración se tomó la hoja opuesta a la mazorca de diez plantas.

Con la finalidad de cuantificar el contenido de Nt, se empleó el método de Dumas, el cual se fundamenta en la conductividad térmica (Sweeney y Rexroad

Cuadro 1. Características de las cuatro parcelas de estudio.
Table 1. Characteristics of the four study plots.

Predio	Material	Ciclo	Fecha de siembra	Superficie sembrada	Puntos de muestreo	Tipo de Riego
	híbrido			ha		
Benito Juárez	RS 7010	Intermedio-Precoz	07-03-2017	7.32	3	Superficial combinando agua bombeada de pozo y agua de presa
Oto	Cimarrón	Intermedio	28-03-2017	37.35	24	Superficial con agua de canal
Granadas	31Y34	Intermedio-Precoz	20-04-2017	57.95	21	Superficial con agua de bombeo de pozo
Solima	RS 3578	Precoz	29-04-2017	27.21	14	Superficial combinando agua bombeada de pozo y agua de residuos de establo

1987). Este método consiste en la transformación de todas las formas de nitrógeno en nitrógeno gaseoso por calcinación; los gases producidos son reducidos por el cobre y posteriormente desecados, mientras que el CO₂ (dióxido de carbono) queda atrapado. El N se cuantifica utilizando un cuantificador universal.

Imágenes Satelitales Sentinel-2 y Obtención de Índices Espectrales

Las imágenes se obtuvieron del portal earth explorer del servicio geológico de los Estados Unidos (USGS, 2022). Las fechas de adquisición de las imágenes coincidieron con los tres muestreos de planta, es decir, del 13 de mayo, 2 de junio y 22 de junio de 2017, con nivel de procesamiento 1-C. Se realizó una corrección atmosférica por el método de sustracción de objeto oscuro (DOS, por sus siglas en inglés) (Chavez, 1996), a través del Semi-Automatic Classification Plugin en el software QGIS versión 3.20 (Qgis Org, 2021).

Se calcularon 13 índices espectrales (Cuadro 2) de los cuales 7 utilizan en su cálculo la longitud de onda correspondiente al borde rojo, que en distintos estudios se ha relacionado con el contenido de clorofila. Para obtener una base de datos con información puntual espacial, se extrajo el valor de índices estimados, para cada punto de muestreo de las parcelas experimentales.

Análisis Estadístico

Para los análisis estadísticos se procesaron los resultados de las tres fechas de muestreo en conjunto. Para determinar los índices espectrales con mayor relación con el contenido de Nt en maíz forrajero, se empleó el ACP, a través de los componentes y factores de carga que representan una mayor varianza (Olivares, 2014).

Cabe señalar que el ACP solamente se realizó para determinar los índices con mayor asociación con el Nt. Aunado a lo anterior se comprobó la relación mediante correlación de Pearson ($P < 0.05$) entre los índices y el valor calculado de Nt mediante el software R versión 4.0 (R Core Team, 2020); de igual manera se generó una validación cruzada a través de un análisis de agrupamiento mediante dendrograma por método Ward (Peña, 2002). Para los índices con mayor asociación con el Nt de maíz ($r > 0.7$), se realizó un modelo de regresión múltiple, debido a la relación existente entre índices espectrales e información fenológica y nutrimental de la vegetación (Dray, Saïd y Débias, 2008). Todos los análisis previos se realizaron con el software STATISTICA 8 (Statsoft, 2007).

Validación del Modelo

El ajuste del modelo generado entre los índices espectrales y el Nt de maíz, se calculó utilizando el error medio cuadrático (*MSE*, por sus siglas en inglés), el error porcentual medio absoluto (*MAPE*, por sus siglas en inglés), y el error relativo (*RE*, por sus siglas en inglés).

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (1)$$

Donde y_i es el valor real, \hat{y}_i es el valor estimado, N es el tamaño de la muestra y *MSE* es el error cuadrático medio.

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (2)$$

Donde, N es el tamaño de la muestra y_i es el valor real e \hat{y}_i es el valor estimado, multiplicando este resultado por cien, entrega el porcentaje de error.

$$RE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \right)^2} \times 100\% \quad (3)$$

Donde, N es el tamaño de la muestra y_i es el valor real e \hat{y}_i es el valor estimado, multiplicando este resultado por cien, entrega el error relativo. La estimación se considera como excelente si $RE < 10\%$, buena si 10-20%, débil si 20-30%, y pobre si $> 30\%$ (Zhu et al., 2006).

Cuadro 2. Índices espectrales aplicados a imágenes Sentinel-2 para estimar Nt en maíz.
Table 2. Spectral indices applied to Sentinel-2 images to estimate total nitrogen (Nt) in corn.

Índice espectral	Ecuación ajustada a Sentinel-2	Referencia
NDRE (Normalized Difference Red Edge)	$\frac{B8 - B5}{B8 + B5}$	Barnes et al. (2000)
CCCI (Canopy Chlorophyll Content Index)	$\left(\frac{NDRE}{NDVI} \right)$	Barnes et al. (2000)
CCCI simpl (Canopy Chlorophyll Content Index)	$\frac{NDRE - NDRE MIN}{NDRE MAX - NDRE MIN}$	Fitzgerald, Rodríguez y O'Leary (2010)
Clred edge (Red edge Chlorophyll Index)	$\frac{B8}{B5} - 1$	Gitelson, Gritz y Merzlyak (2003)
MCARI/OSAVI (Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index /Optimized Soil Adjusted Vegetation Index)	$\frac{\left\{ [(B5 - B4) - 0.2 (B5 - B3)] \left(\frac{B5}{B4} \right) \right\}}{\left[\frac{(1 + 0.16)(B8 - B4)}{B8 + B4 + 0.16} \right]}$	Daughtry, Walthall, Kim, Brown y McMurtrey, (2000)
MCARI/OSAVI RE (Red Edge-based Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index / Optimized Soil Adjusted Vegetation Index)	$\frac{\left\{ [(B6 - B5) - 0.2 (B6 - B3)] \left(\frac{B6}{B5} \right) \right\}}{\left[\frac{(1 + 0.16)(B6 - B5)}{B6 + B5 + 0.16} \right]}$	Wu, Niu, Tang y Huang (2008)
TCARI/OSAVI (Transformed Chlorophyll Absorption in Reflectance Index/Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index)	$\frac{3 \left[(B5 - B4) - 0.2 (B5 - B3) \right] \left(\frac{B5}{B4} \right)}{\left[\frac{(1 + 0.16)(B8 - B4)}{B8 + B4 + 0.16} \right]}$	Haboudane, Miller, Tremblay, Zarco y Dextraze (2002)
TCARI/OSAVI RE (Red Edge-based Transformed Chlorophyll Absorption in Reflectance Index/Optimized Soil Adjusted Vegetation Index)	$\frac{3 \left[(B6 - B5) - 0.2 (B6 - B3) \right] \left(\frac{B6}{B5} \right)}{\left[\frac{(1 + 0.16)(B6 - B5)}{B6 + B5 + 0.16} \right]}$	Wu et al. (2008)
MTCI (MERIS Terrestrial Chlorophyll Index)	$\frac{B6 - B5}{B5 - B4}$	Dash y Curran (2010)
GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index)	$\frac{B8 - B3}{B8 + B3}$	Gitelson y Merzlyak (1996)
Clgreen (Green Chlorophyll Index)	$\frac{B8}{B3} - 1$	Gitelson, Viña, Ciganda, Rundquist y Arkebauer (2005)
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$\frac{B8 - B4}{B8 + B4}$	Rouse, Haas, Schell, y Deering (1974)
RVI (Ratio Vegetation Index)	$\frac{B8}{B4}$	Jordan (1969)

La base de datos se dividió en dos grupos, uno para calibración y otro para validación, y se estimó la correlación de Pearson ($P < 0.05$). A través de los índices y coeficientes obtenidos del modelo, se representó espacialmente el Nt estimado mediante imágenes Sentinel-2 para los meses de mayo y junio de 2018, 2019 y 2020 de cada parcela.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Nitrógeno Total

Los valores obtenidos de Nt, presentaron variaciones espaciales entre las cuatro parcelas analizadas ($n = 62$, media = 2.92, mediana = 2.85), donde la parcela Oto registró los valores más bajos de Nt (2.01%). Por el contrario, Granadas registró los valores más altos (4.20%). El Cuadro 3 muestra las concentraciones de Nt medido en planta para los cuatro sitios de estudio.

Índices Espectrales

En la Figura 1, se muestra como es la distribución de los valores de los índices espectrales obtenidos de las parcelas estudio. En el gráfico de cajas se observa que en los índices MCARI/OSAVI y MCARI/OSAVI RE (media = 0.09, mediana = 0.09; media = 0.21, mediana = 0.21, respectivamente) se estimó una menor variación. Por el contrario, en los índices CI Green y RVI (media = 2.64, mediana = 2.20; media = 3.59, media = 3.59, mediana = 3.23, respectivamente) se estimó una mayor variabilidad. Esta variabilidad fue en comparación con la dispersión de las estimaciones para todos los índices, considerando que para todos ellos se realizaron el mismo número de muestras ($n=62$).

Análisis de Asociación entre Nitrógeno Total e Índices Espectrales

El ACP (Figura 2) ubicó al contenido de Nt y a los índices TCARI/OSAVI y MCARI/OSAVI, en el Componente Principal 1 (PC1), el cual explica el 78.22% de la varianza total, dejando a los demás índices en los otros componentes, de manera menos directa están relacionados el TCARI/OSAVI RE y MCARI/OSAVI RE los cuales se explican de manera parcial por el componente 2. Sin embargo, estos dos índices también fueron incluidos ya que estos integran la banda del borde rojo, la cual, ha presentado una mayor relación con el nitrógeno en cultivos (Li *et al.*, 2014). La matriz de correlación (Figura 3) mostró relaciones negativas entre el Nt y los índices espectrales, no obstante, fueron significativos ($P < 0.05$). El índice MCARI/OSAVI RE presentó correlaciones bajas con todos los índices y el Nt en la matriz de correlación,

Cuadro 3. Nt medido en laboratorio para los puntos de muestreo de los cuatro sitios de estudio.
Table 3. Total nitrogen (Nt) measured in the laboratory for the sampling points of the four study sites.

Predio	Material	Puntos de muestreo	Media Nt	Mínima Nt	Máxima Nt
			----- % -----		
Benito Juárez	RS 7010	3	2.48	2.53	2.57
Oto	Cimarrón	24	2.69	2.01	3.83
Granadas	31Y34	21	3.12	2.20	4.20
Solima	RS 3578	14	3.07	2.22	3.75

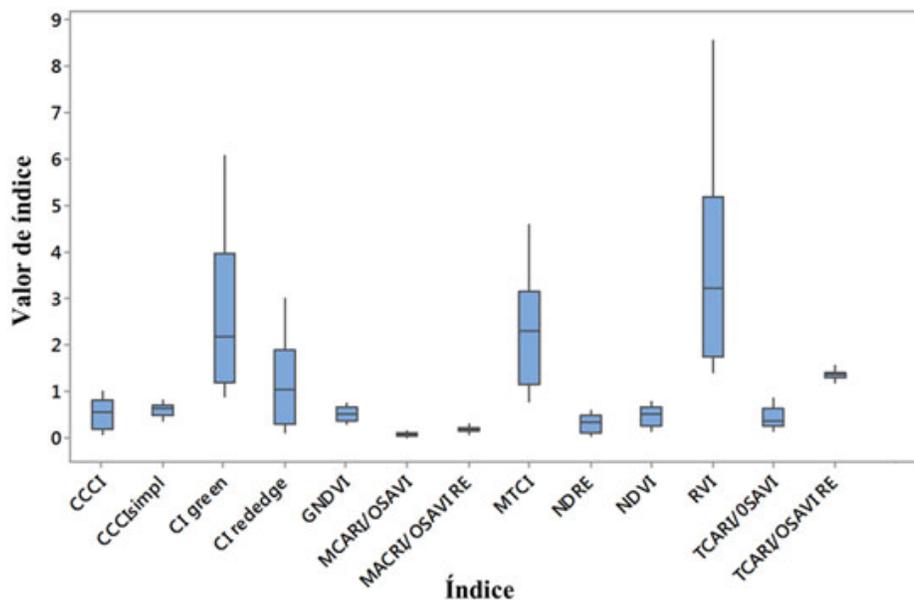


Figura 1. Valores máximos, mínimos y mediana de los índices espectrales obtenidos de las parcelas de estudio.

Figure 1. Maximum, minimum and median values of the spectral indices obtained from the study plots.

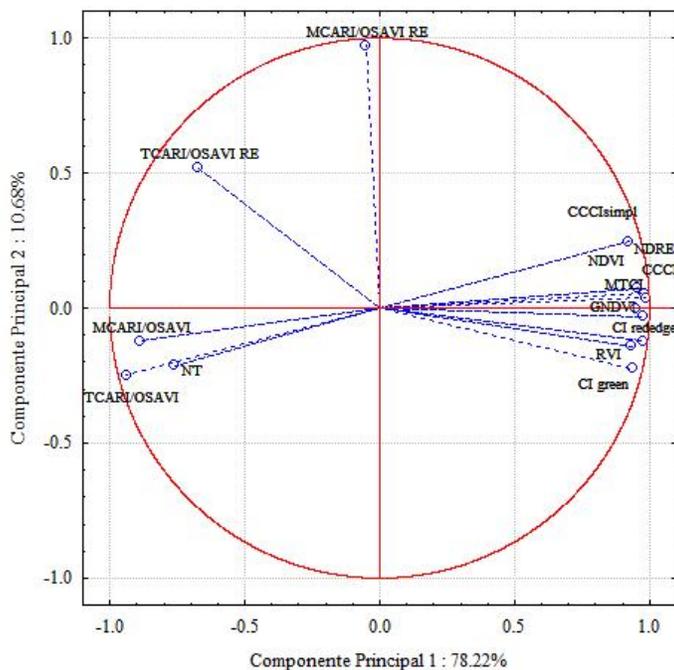


Figura 2. ACP entre el contenido de Nt en maíz, e índices espectrales obtenidos con imágenes del satélite Sentinel-2.

Figure 2. The Principal Component Analysis (ACP) between the total nitrogen (Nt) content in maize, and spectral indices obtained with images from the Sentinel-2 satellite.

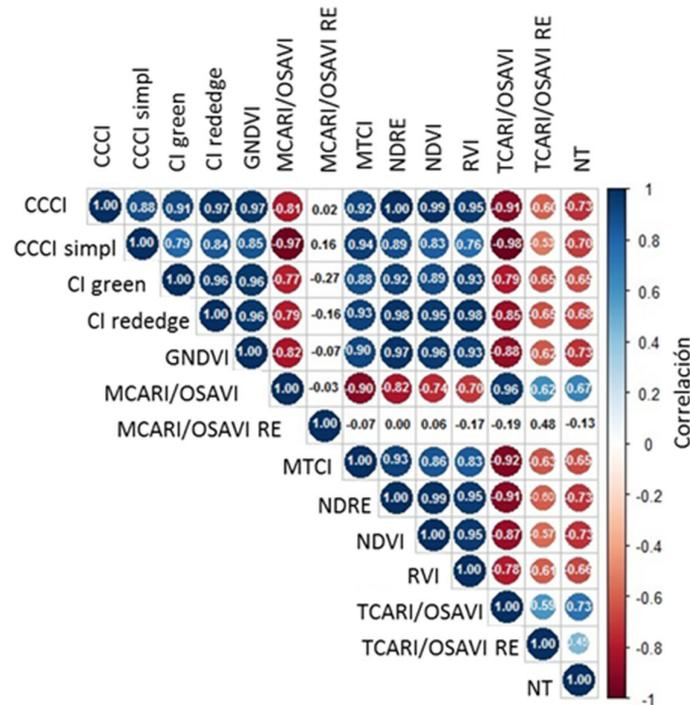


Figura 3. Matriz de correlación de Pearson ($P < 0.05$), donde se muestra la asociación entre los 13 índices espectrales y el Nt en maíz.
Figure 3. Pearson's correlation matrix ($P < 0.05$), showing the association between the 13 spectral indices and total nitrogen (Nt) in corn.

sin embargo, la información mostrada en el dendrograma de la Figura 4, sugiere una relación significativa entre el Nt y los índices *MCARI/OSAVI*, *TCARI/OSAVI*, *MCARI/OSAVI RE* y *TCARI/OSAVI RE*, lo cual permite utilizar estos cuatro índices espectrales para estimar el contenido de nitrógeno y el contenido de clorofila en planta, por su longitud de onda desde los 705 a los 750 nanómetros (Wu, Niu, Tang y Huang, 2008).

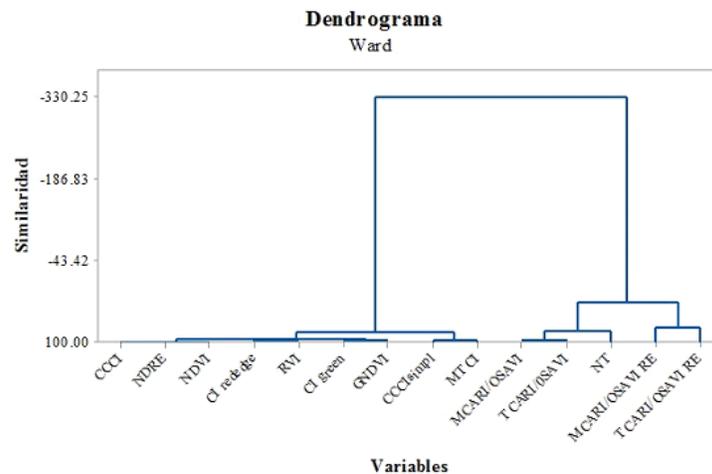


Figura 4. Dendrograma por método Ward entre el Nt y los índices espectrales de las imágenes de Sentinel-2.
Figure 4. Ward method dendrogram between total nitrogen (Nt) and the spectral indices of the Sentinel-2 images.

Los índices seleccionados corroboran lo encontrado por Inoue, Sakaiya, Zhu y Takahashi (2012) y Yao, Zhu, Tian, Feng y Cao (2010) quienes observaron que el combinar los índices de las bandas NIR y RE proporciona un enfoque eficiente del estado del N en la planta. De igual forma, Hunt Jr, Daughtry, Eitel y Long (2011) encontraron que existe una mayor relación de los índices que utilizan la reflectancia en las longitudes de onda de borde rojo en comparación con aquellos que no la utilizan para estimar el contenido de clorofila.

Modelo de Regresión Lineal Múltiple

Se observó que de manera individual los índices *MCARI/OSAVI*, *MCARI/OSAVI RE* y *TCARI/OSAVI RE* tuvieron coeficientes R^2 bajos con respecto al contenido de Nt (Cuadro 4). Sin embargo, el modelo óptimo para estimación de Nt incluye a los índices mencionados en conjunto con el índice *TCARI/OSAVI*, al obtener un $R^2 = 0.56$. El coeficiente de determinación R^2 obtenido, es similar al que reportan Chen *et al.* (2010) quienes encontraron una de las mejores relaciones con la concentración de Nt en maíz utilizando el índice *TCARI/OSAVI* con un $R^2 = 0.66$, pero menor comparado a estudios como el de Yao *et al.* (2010) quienes obtuvieron un modelo de regresión lineal múltiple basado en cuatro índices espectrales para estimar Nt en trigo $R^2 = 0.81$, por su parte, Zhao *et al.* (2019) también utilizaron un modelo de regresión lineal múltiple con 4 índices espectrales en el cultivo de trigo con información derivada de imágenes Sentinel-2 con un $R^2 = 0.47$, menor a la del presente estudio.

El modelo propuesto en este estudio a través de análisis multivariado es el siguiente:

$$Y = (3.68 * TCARI/OSAVI) + (-8.83 * MCARI/OSAVI) + (-0.26 * TCARI/OSAVI RE) + (1.53 * MCARI/OSAVI RE) + 2.21 \quad (4)$$

Donde, Y es el contenido de nitrógeno total estimado en (%). Los estadísticos de ajuste del modelo entre el Nt observado y el Nt estimado fueron los siguientes; el $MSE = 0.12$, el $MAPE = 9.92\%$ y el $RE = 12.57\%$, por otro lado, considerando la división por sub grupos (50% de los datos observados) calibración y (50% de los datos observados) validación del modelo, la correlación de Pearson fue de 0.74 para ambos grupos (Cuadro 5).

Nitrógeno Estimado de Imágenes Sentinel-2

Al aplicar el modelo propuesto para estimar nitrógeno total en maíz, el comportamiento a través del tiempo fue variado, al encontrar un mayor déficit para el mes de mayo en las parcelas de Oto, Granadas y Benito Juárez (Figura 5), situación similar para el mes de junio para el año 2020, pero solamente para Granadas y Benito

Cuadro 4. Modelos de regresión lineal (Nt ~índices espectrales).
Table 4. Linear regression models (total nitrogen (Nt) ~spectral indices).

Índice espectral	Ecuación	R^2
TCARI/OSAVI	$1.9426x + 2.0752$	0.5359
MCARI/OSAVI	$9.3133x + 2.016$	0.4427
TCARI/OSAVI RE	$2.5908x - 0.6006$	0.1997
MCARI/OSAVI RE	$-1.5114x + 3.2608$	0.018

Cuadro 5. Estadísticos de validación del modelo por división de valores para calibración y validación.
Table 5. Model validation statistics by division of values for calibration and validation.

Estadísticos	Calibración	Validación
	Grupo 1	Grupo 2
Correlación de Pearson	0.74*	0.74*
Reducción del error	0.53*	0.58*
Valor de T	4.09*	3.87*
Producto de signos	7*	4*
Primera diferencia negativa	11NS	9*
Coefficiente de Durbin-Watson	1.16	1.43
Coefficiente de eficiencia	0.52*	0.56*

* Significativo ($P < 0.05$). NS = No significativo.

* Significant ($P < 0.05$). NS = Not significant.

Juárez (Figura 6). En el predio de Benito Juárez para el mes de mayo y junio del 2020 el déficit se debió a que no había cultivo establecido y el suelo estaba desnudo, lo que se reflejó con valores de 0.00% de Nt

En el predio de Granadas para el 2020 el cultivo estaba en madurez fisiológica, donde ocurre una pérdida significativa en el contenido de clorofila propio de la senescencia (Viña y Gitelson, 2005), lo cual se manifestó en valores mínimos de nitrógeno. El predio Oto en mayo del 2020 presentó valores mínimos de nitrógeno debido a que estaba en las etapas iniciales con un bajo contenido de hojas, mientras que para junio del 2020 la concentración estimada de nitrógeno fue mayor, esto concuerda con lo reportado por Mendoza-Elos *et al.* (2006) quienes observaron que la clorofila aumenta gradualmente hasta llegar a un máximo a los 90 dds.

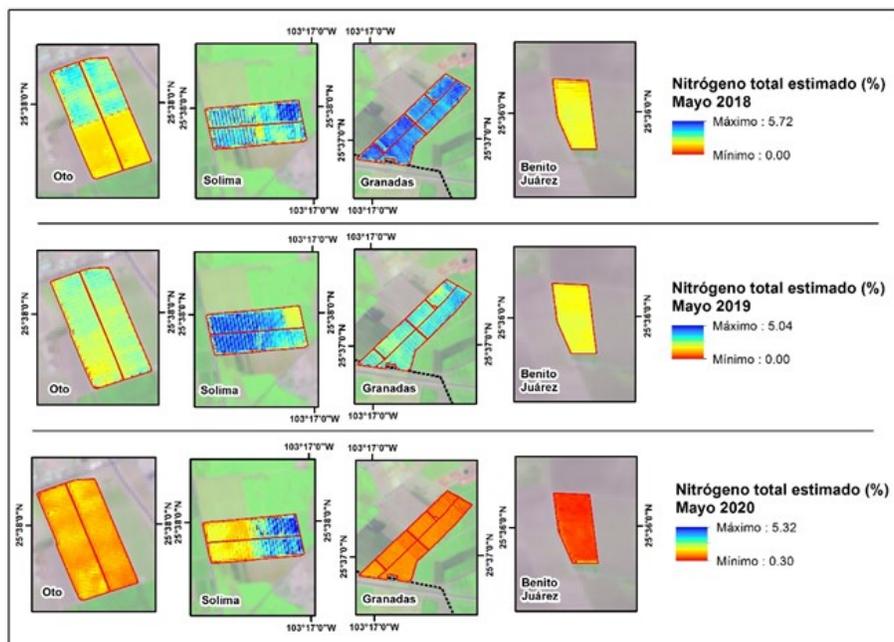


Figura 5. Distribución espacial de Nitrógeno total estimado en planta de maíz para el mes de mayo, en tres diferentes años (2018, 2019 y 2020).

Figure 5. Spatial distribution of estimated total Nitrogen (Nt) in corn plants for the month of May in three different years (2018, 2019 and 2020).

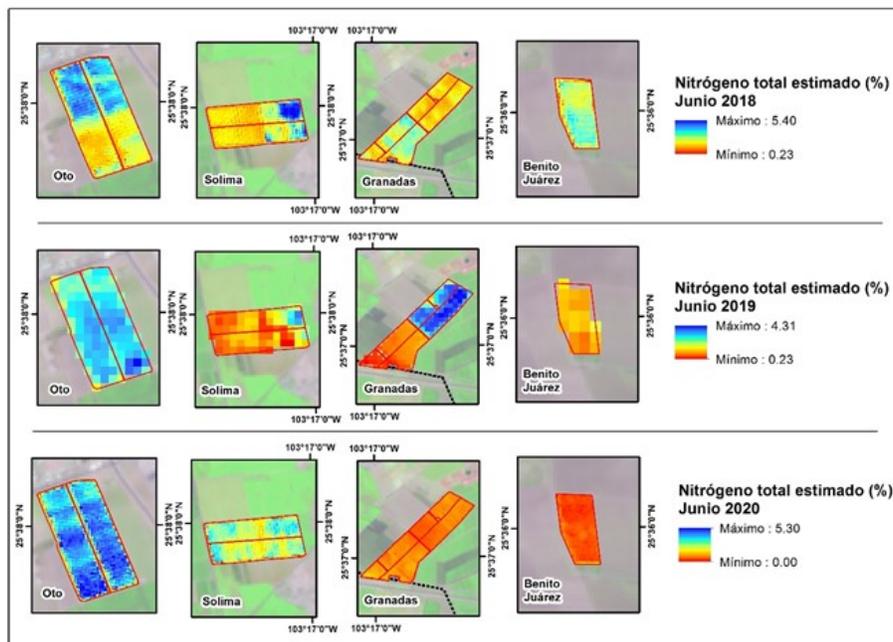


Figura 6. Distribución espacial de Nitrógeno total estimado en planta de maíz para el mes de junio, en tres diferentes años (2018, 2019 y 2020).
Figure 6. Spatial distribution of estimated total Nitrogen (Nt) in corn plants for the month of June in three different years (2018, 2019 and 2020).

Cabe señalar que la dinámica del nitrógeno en planta es compleja, ya que depende de diversos factores que pueden variar de un ciclo a otro, como la temperatura, la humedad del suelo, así como las prácticas agronómicas y culturales en el sistema (Sosa-Rodríguez y García-Vivas, 2018).

CONCLUSIONES

En este manuscrito, se evaluó el potencial de 13 índices espectrales derivados de Sentinel-2 para estimar el contenido de Nt en el cultivo de maíz. El análisis de datos mostró una notable asociación del Nt medido en campo y los índices *MCARI/OSAVI*, *TCARI/OSAVI*, *MCARI/OSAVI RE* y *TCARI/OSAVI RE*, a través de ACP, correlación de Pearson y Dendrograma. Para estimar el contenido de Nt en el maíz, se generó un modelo de regresión lineal múltiple con los cuatro índices seleccionados, permitiendo explicar más del 50% de la variabilidad del modelo propuesto y un *MSE* de 0.12. A través de la sensoría remota mediante índices espectrales es posible estimar espacialmente el contenido de Nt a nivel predio.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos están disponibles de los autores previa solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FONDOS

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización y diseño: J.E.A. y M.J.L.C. Metodología: M.J.L.C., J.E.A., A.R.M.S. y E.M.V. Escritura: revisión y edición: J.E.A., A.R.M.S., R.T.C. y M.J.L.C. Recursos: J.E.A. Administración del proyecto: J.E.A.

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT por la beca recibida al primer autor. Al INIFAP CENID-RASPA por el apoyo recibido en el desarrollo de la presente investigación y al Departamento de Posgrado de la FAZ-UJED por las facilidades otorgadas.

LITERATURA CITADA

- Barnes, E. M., Clarke, T. R., Richards, S. E., Colaizzi, P. D., Haberland, J., Kostrewski, M., ... Moran, M. S. (2000). Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data. In P. C. Robert, R. H. Rust, & W. E. Larson (Eds.). *Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture* (pp. 16-19). Bloomington, MN, USA: American Society of Agronomy.
- Basso, B., Fiorentino, C., Cammarano, D., & Schulthess, U. (2015). Variable rate nitrogen fertilizer response in wheat using remote sensing. *Precision Agriculture*, 17(2), 168-182. <https://doi.org/10.1007/s11119-015-9414-9>
- Chavez, P. S. (1996). Image-Based Atmospheric Corrections-Revisited and Improved Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Falls Church, Va. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9), 1025-1035.
- Chen, P., Haboudane, D., Tremblay, N., Wang, J., Vigneault, P., & Li, B. (2010). New spectral indicator assessing the efficiency of crop nitrogen treatment in corn and wheat. *Remote Sensing of Environment*, 114(9), 1987-1997. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.04.006>
- Clevers, J. G. P. W., & Gitelson, A. A. (2013). Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and -3. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23(1), 344-351. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.10.008>
- Crema, A., Boschetti, M., Nutini, F., Cillis, D., & Casa, R. (2020). Influence of soil properties on maize and wheat nitrogen status assessment from Sentinel-2 data. *Remote Sensing*, 12(14), 1-23. <https://doi.org/10.3390/rs12142175>
- Cruz-Durán, J. A., Sánchez-García, P., Galvis-Spínola, A., & Carrillo-Salazar, J. A. (2011). Índices espectrales en pimiento para el diagnóstico nutrimental de nitrógeno. *Terra Latinoamericana*, 29(3), 259-265.
- Dash, J., & Curran, P. J. (2010). The MERIS terrestrial chlorophyll index. *International Journal of Remote Sensing*, 25(23), 5403-5413. <https://doi.org/10.1080/0143116042000274015>
- Daughtry, C. S. T., Walthall, C. L., Kim, M. S., Brown-de Colstoun, E., & McMurtrey, J. E. (2000). Estimating corn leaf Chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 74(2), 229-239. [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(00\)00113-9](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(00)00113-9)
- Dray, S., Saïd, S., & Débias, F. (2008). Spatial ordination of vegetation data using a generalization of Wartenberg's multivariate spatial correlation. *Journal of Vegetation Science*, 19(1), 45-56. <https://doi.org/10.3170/2007-8-18312>
- Fitzgerald, G., Rodríguez, D., & O'Leary, G. (2010). Measuring and predicting canopy nitrogen nutrition in wheat using a spectral index-The canopy chlorophyll content index (CCCI). *Field Crop Research*, 116(3), 318-324. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.01.010>
- García, E. (1998). *Climas, clasificación de Köppen, modificado por García. Escala 1:1000000*. México. Consultado el 15 de febrero, 2018, desde <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>.
- Gitelson, A. A., & Merzlyak, M. N. (1996). Signature Analysis of leaf reflectance spectra: algorithm development for remote sensing of chlorophyll. *Journal of Plant Physiology*, 148(3-4), 494-500. [https://doi.org/10.1016/s0176-1617\(96\)80284-7](https://doi.org/10.1016/s0176-1617(96)80284-7)
- Gitelson, A. A., Gritz, Y., & Merzlyak, M. N. (2003). Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of Plant Physiology*, 160(3), 271-282. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-00887>

- Gitelson, A. A., Viña, A., Ciganda, V., Rundquist, D. C., & Arkebauer, T. J. (2005). Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical Research Letters*, 32(8), 1-4. <https://doi.org/10.1029/2005GL022688>
- Haboudane, D., Miller, J. R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P. J., & Dextraze, L. (2002). Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 81(2-3), 416-426. [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(02\)00018-4](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(02)00018-4)
- Hunt Jr, E. R., Daughtry, C. S. T., Eitel, J. U. H., & Long, D. S. (2011). Remote sensing leaf chlorophyll content using a visible band index. *Agronomy Journal*, 103(4), 1090-1099. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0395>
- Inoue, Y., Sakaiya, E., Zhu, Y., & Takahashi, W. (2012). Diagnostic mapping of canopy nitrogen content in rice based on hyperspectral measurements. *Remote Sensing Environment*, 126(1), 210-221. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.08.026>
- Jordan, C. F. (1969). Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 50(4), 663-666. <https://doi.org/10.2307/1936256>
- Ju, C., Tian, Y., Yao, X., Cao, W., Zhu, Y., & Hannaway, D. (2010). Estimating Leaf Chlorophyll Content Using Red Edge Parameters. *Pedosphere*, 20(5), 633-644. [https://doi.org/10.1016/s1002-0160\(10\)60053-7](https://doi.org/10.1016/s1002-0160(10)60053-7)
- Li, F., Miao, Y., Feng, G., Yuan, F., Yue, S., Gao, X., ... Chen, X. (2014). Improving estimation of summer maize nitrogen status with red edge-based spectral vegetation indices. *Field Crops Research*, 157(1), 111-123. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.12.018>
- López-Calderón, M. J., Estrada-Ávalos, J., Rodríguez-Moreno, V. M., Mauricio-Ruvalcaba, J. E., Martínez-Sifuentes, A. R., Delgado-Ramírez, G., & Miguel-Valle, E. (2020). Estimation of total nitrogen content in forage maize (*Zea mays* L.) Using spectral indices: analysis by random forest. *Agriculture*, 10(10), 1-15. <https://doi.org/10.3390/agriculture10100451>
- Martínez, M. L. (2017). Relationship between crop nutritional status, spectral measurements and Sentinel 2 images. *Agronomía Colombiana*, 35(2), 205-215. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v35n2.62875>
- Mendoza-Elos, M., Mosqueda-Villagómez, C., Rangel-Lucio, J. A., López-Benítez, A., Rodríguez-Herrera, S. A., Latournerie-Moreno, L., & Moreno-Martínez, E. (2006). Densidad de población y fertilización nitrogenada en la clorofila, materia seca y rendimiento de maíz normal y QPM. *Agricultura técnica en México*, 32(1), 89-99.
- Statsoft. (2007). *STATISTICA User's Guide*. Version 8. Tulsa, OK, USA: Statsoft Inc.
- Olivares, B. (2014). Aplicación del análisis de componentes principales (ACP) en el diagnóstico socioambiental. Caso: sector campo alegre, municipio simón rodríguez de anzoátegui. *Multiciencias* 14(4), 364-374.
- Peña, D. (2002). *Análisis de datos multivariantes*. España: McGrawHill. ISBN: 9788448136109
- QGIS.org (2021). *QGIS Geographic Information System. User's Guide. Version 3.20*. Grüt, Switzerland: QGIS Association.
- R Core Team (2020). *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Rao, I. M. (2009). *Essential plant nutrients and their functions*. Cali, Colombia: CIAT.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. TX, USA: Texas A&M University College Station.
- Sánchez, A., Delgado, R., Lorbés, J., Rodríguez, V., Figueredo, L., & Gómez, C. (2015). Diagnóstico e índice para fertilización nitrogenada en etapa vegetativa del cultivo maíz (*Zea mays* L.). *Revista Unellez de Ciencia y Tecnología*, 33(1), 75-82.
- Schlemmer, M., Gitelson, A., Schepers, J., Ferguson, R., Peng, Y., Shanahan, J., & Rundquist, D. (2013). Remote estimation of nitrogen and chlorophyll contents in maize at leaf and canopy levels. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 25(1), 47-54. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.04.003>
- Sharifi A. (2020). Using Sentinel-2 data to predict nitrogen uptake in maize crop. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 2656-2662, <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.2998638>
- Sosa-Rodríguez B. A., & García-Vivas, Y. S. (2018). Eficiencia de uso del nitrógeno en maíz fertilizado de forma orgánica y mineral. *Agronomía Mesoamericana*, 29(1), 1-13. <https://doi.org/10.15517/ma.v29i1.27127>
- Spiertz, J. H. J. (2010). Nitrogen, sustainable agriculture and food security. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30, 43-55. <https://doi.org/10.1051/agro:2008064>
- Sweeney, R. A., & Rexroad, P. R. (1987). Comparison of LECO FP-228 'Nitrogen Determinator' with AOAC copper catalyst Kjeldahl method for crude protein. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists*, 70(6), 1028-1030.
- USGS (Science for a changing world). (2020). *Earth Explorer*. Consultado el 10 de marzo, 2020, desde <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Viña, A., & Gitelson A. A. (2005). New developments in the remote estimation of the fraction of absorbed photosynthetically active radiation in crops. *Geophysical Research Letters*, 32(17), 1-4. <https://doi.org/10.1029/2005GL023647>
- Wu, C., Niu, Z., Tang, Q., & Huang, W. (2008). Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(8-9), 1230-1241. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.03.005>

- Yao, X., Zhu, Y., Tian, Y., Feng, W., & Cao, W. (2010). Exploring hyperspectral bands and estimation indices for leaf nitrogen accumulation in wheat. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12(2), 89-100. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.11.008>
- Zhang, M., Su, W., Fu, Y., Zhu, D., Xue, J. H., Huang, J., ... Yao, C. (2019). Super-resolution enhancement of Sentinel-2 image for retrieving LAI and chlorophyll content of summer corn. *European Journal of Agronomy*, 111(125938), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125938>
- Zhao, H., Song, X., Yang, G., Li, Z., Zhang, D., & Feng, H. (2019). Monitoring of nitrogen and grain protein content in winter wheat based on sentinel-2A data. *Remote Sensing*, 11(14), 1-25. <https://doi.org/10.3390/rs11141724>
- Zhu, Y., Li, Y., Feng, W., Tian, Y., Yao, X., & Cao, W. (2006). Monitoring leaf nitrogen in wheat using canopy reflectance spectra. *Canadian Journal of Plant Science*, 86(4), 1037-1046. <https://doi.org/10.4141/P05-157>