

Utilización de imágenes multiespectrales en el seguimiento de nitrógeno foliar en cultivos forrajeros

Dimas Pereira Obaya

Fundación Centro Tecnológico y Forestal de la Madera (CETEMAS), Pola de Siero, Asturias. Correo electrónico: dpereira@cetemas.es

Introducción

Antecedentes

Los pastos y cultivos forrajeros tienen un peso muy importante dentro de la Unión Europea (UE), de hecho, en 2022 este tipo de cubiertas del suelo ocupaban el 30% de su superficie total. Ocurre lo mismo en el caso de España donde son 15 millones de hectáreas las ocupadas por este tipo de cultivos (FAO, 2024). En la actividad agroganadera está generalizada la fertilización para evitar deficiencias en nitrógeno (N), ya que el buen desarrollo de los pastos y cultivos forrajeros depende de este elemento esencial. Debido a que condiciona su productividad, calidad nutricional y palatabilidad (Marschner y Marschner, 2012). La producción de este tipo de fertilizantes es costosa energéticamente y además una gestión descontrolada o excesiva puede perjudicar al medio ambiente, principalmente debido a la emisión de un gas volátil como es el óxido de nitrógeno (N_2O) (Xu et al., 2012).

Los países miembros de la UE se han fijado como objetivo alcanzar la neutralidad climática para 2050, para poder alcanzarlo quieren reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero de forma progresiva. A través de directrices y políticas, entre ellas la Política Agraria Común (PAC) se pretenden reducir las emisiones de N_2O asociadas a la actividad Ganadera. En este contexto, la Central Lechera Asturiana (CLAS), las Cooperativas Agroalimentarias de Asturias (COAPA) y la Fundación CETEMAS trabajan de manera conjunta en GEPROCAR. Un proyecto de ámbito regional con el que se pretende desarrollar herramientas innovadoras basadas en el uso de sensores remotos que ofrezcan mejoras que permitan conseguir un sector lácteo carbono neutral en el Principado de Asturias. Como parte de este proyecto, el presente trabajo propone una metodología basada en el uso de imágenes multiespectrales para hacer un seguimiento del nitrógeno foliar en cultivos forrajeros.

Material y métodos

Área de estudio

Para el desarrollo de este estudio se trabajó en dos parcelas ocupadas con dos tipos de cultivos forrajeros distintos. Las parcelas analizadas se ubican en Tineo y en Gozón (Figura 1), en la zona interior alta y en la zona costera occidental respectivamente si se atiende a criterios edafoclimáticos para el cultivo forrajero (SERIDA, 2023). En la parcela de Tineo (2,29 ha) se sigue un sistema de pasto permanente en el que se siembra una mezcla de especies del género *Lolium* (raigrás). Mientras la parcela de Gozón (10,21 ha) se gestiona mediante un sistema de rotación de cultivos, cultivares de raigrás italiano durante el invierno y en verano se planta el cultivar Invador (ciclo FAO 400) de la especie *Zea mays* (maíz). En ambos casos se aplican tratamientos de fertilización para la mejora de la salud y producción de los cultivos.

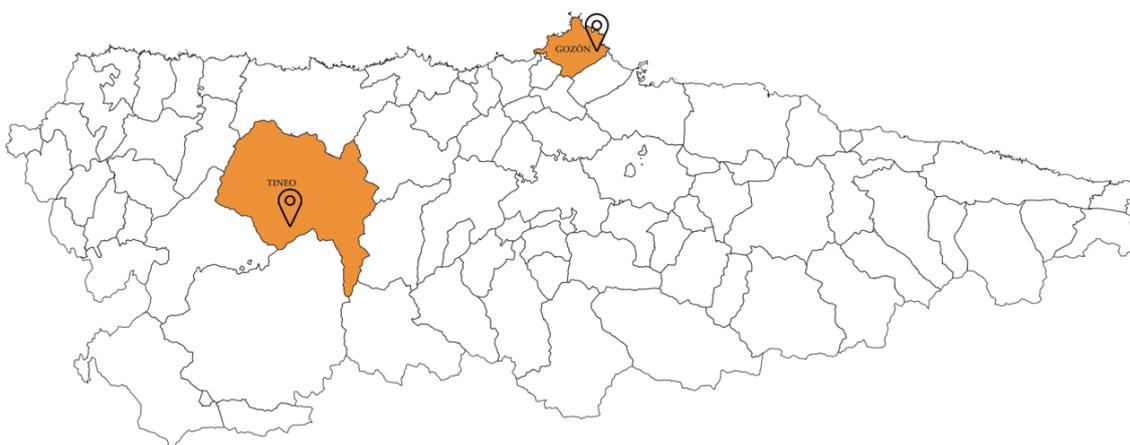


Figura 1. Mapa de localización de las parcelas de estudio: Tineo (43.3315632° N, -6.4442870° E) y Gozón (43.585407° N, -5.798957° E). Se muestran las coordenadas de las parcelas en sistema de referencia WGS 84.

Diseño experimental, muestreos y trabajos de campo

Para planificar los trabajos de campo se han tenido en cuenta las diferentes etapas (fertilización, cortas, siembra) por las que pasa cada parcela, en función del sistema de cultivo que en ella se aplique. De esta forma como se puede ver en la Tabla 1, en el pasto permanente se han realizado dos muestreos distintos. Mientras que en el caso del pasto en rotación fueron cuatro los momentos en los que se llevaron a cabo los análisis. En total se han recogido muestras en 137 puntos. Se realizaron muestreos siguiendo un transecto en zigzag, en cada uno de los puntos se definió una cuadrícula de 1 m² cuyo centro fue posicionado con un receptor GPS GNSS Leica Viva GS14 3.75G Performance (Figura 2.a). Utilizando un medidor espectral N-pen de Photon Systems

Instruments (Figura 2.b) se tomaron 6 mediciones para conocer el valor del contenido de nitrógeno foliar (%) medio de cada uno de los puntos (cuadrículas) muestreo. Además, se recogieron muestras de biomasa, en el caso del raigrás la biomasa de toda la cuadrícula, mientras que en el caso del maíz se recogieron 10 hojas de plantas presentes en la cuadrícula.

Tabla 1. Resumen de los momentos en los que: se han tomado muestras de biomasa, se han realizado mediciones del contenido de nitrógeno, y se han realizados vuelos con drones.

Lugar	Año	Cultivo	Momento	Biomasa	N-pen	Drones
Tineo	2024	Raigrás	Previo 2ª corta del año (mayo)	10	50	2
	2025		Previo 1ª corta del año (marzo)			
Gozón	2024	Maíz	Una vez el cultivo se implantó (julio)	10	87	4
			Máximo desarrollo vegetativo (agosto)			
			Previo a la cosecha (octubre)			
	2025	Raigrás	Previo 1ª corta del año (abril)			

Durante los trabajos de campo se realizaron 6 vuelos de dron. Antes de recoger las muestras de biomasa se utilizó un dron DJI Matrice 300 RTK (Figura 2.c) para capturar imágenes multiespectrales con una cámara Micansense RedEdge-P. Este sensor mide la reflectancia en cinco bandas del espectro electromagnético (Azul; Verde; Rojo; Borde Rojo; e Infrarrojo cercano).

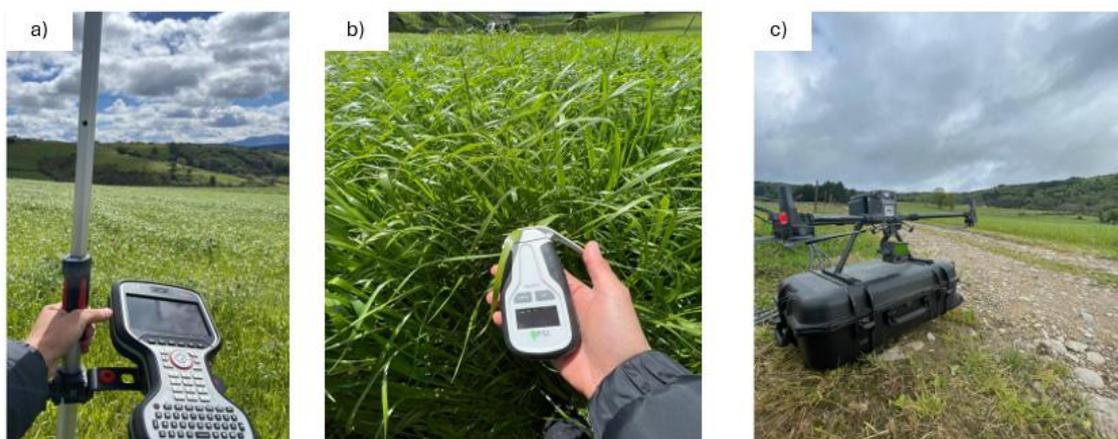


Figura 2. Material de campo utilizado: a. receptor GPS; b. medidor de nitrógeno N-pen; y c. Dron.

Procesado de datos

Las imágenes multiespectrales capturadas se procesaron con un software fotogramétrico (Pix4Dmapper, versión 4.7.5) para generar los mapas de reflectancia de muy alta resolución espacial (10 cm / píxel). A partir de estos mapas, se calcularon los índices de vegetación que aparecen recogidos en la Tabla 2.

Tabla 2. Ecuaciones utilizadas para el cálculo de los índices de vegetación, donde RE es el Borde rojo y NIR es el Infrarrojo cercano.

Índice	Fórmula	Referencia
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$\frac{(NIR - Rojo)}{(NIR + Rojo)}$	Burns et al. (2022), López-Calderón et al. (2020), Salvador-Castillo et al. (2021), Kumarasiri et al. (2024)
DVI (Difference Vegetation Index)	$(NIR - Rojo)$	Kumarasiri et al. (2024)
Normalized Difference Red Edge/Red	$\frac{(RE - Rojo)}{(RE + Rojo)}$	López-Calderón et al. (2020), Kumarasiri et al. (2024)
NDGI (Normalized Difference Greenness Index)	$\frac{(NIR - Verde)}{(NIR + Verde)}$	Burns et al. (2022), López-Calderón et al. (2020)
RVI (Ratio Vegetation Index)	$\frac{NIR}{Rojo}$	López-Calderón et al. (2020), Kumarasiri et al. (2024)
RENDVI (Red Edge Normalized Difference Vegetation Index)	$\frac{(NIR - RE)}{(NIR + RE)}$	Burns et al. (2022)
CIg (Chlorophyll Index Green)	$\frac{NIR}{Verde} - 1$	Burns et al. (2022), López-Calderón et al. (2020), Salvador-Castillo et al. (2021), Kumarasiri et al. (2024)

Modelo predictivo

Antes de generar los modelos predictivos se llevó a cabo una selección de variables, analizando la correlación que cada índice y banda espectral tienen con el contenido de nitrógeno (%). Se optó por un algoritmo no paramétrico como es el Random Forest ya que su uso está generalizado (Jiang et al., 2023; Kumarasiri et al., 2024; Li et al., 2024) y además ha dado buenos resultados en experiencias previas (González Fernández, 2024). Se ajustó un modelo para cada tipo de cultivo (maíz o raigrás), para ello se utilizaron las 137 mediciones realizadas con el sensor N-Pen. Para dar una mayor robustez a los datos, estas mediciones del contenido de nitrógeno (%) fueron ajustadas en función de los resultados de las muestras de biomasa. Las bandas e índices espectrales se utilizaron como variables de entrada de los modelos, concretamente el valor medio asociado a las cuadrículas georreferenciadas de 1 m². La validación cruzada fue el método empleado para evaluar las predicciones, tomando también como

referencia la raíz del error medio cuadrático (RMSE) y el porcentaje de la varianza explicada.

Resultados y discusión

Para llevar a cabo la predicción del contenido de nitrógeno (%) se decidió trabajar con un algoritmo no paramétrico Random Forest tomando como variables los índices y bandas espectrales derivadas de los datos capturados con drones. Como se puede ver en la Tabla 3, la validación cruzada ha mostrado que el porcentaje de la varianza que explica cada modelo es de 0,41 y 0,71 para el cultivo de raigrás y el cultivo de maíz respectivamente. Estos valores del porcentaje de la varianza explicada son similares a los obtenidos por Kumarasiri et al. (2024) al trabajar también con una única base de datos para el entrenamiento y la validación. Estos modelos se utilizaron finalmente para estimar espacialmente el contenido de nitrógeno (%) como se puede ver en la Figura 3. La Figura 3.a muestra el nitrógeno foliar del cultivo de raigrás y en la Figura 3.b se representa la parcela en la que se cultivó maíz. Aunque, los valores máximos y mínimos del contenido de nitrógeno de ambos cultivos no son comparables, sí que se puede decir que visualmente en el caso de la parcela que contiene maíz la distribución espacial del contenido de nitrógeno foliar es mucho más homogénea que en el caso del raigrás.

Tabla 3. Estadísticos de la validación cruzada de cada modelo Random Forest. Siendo R^2 el porcentaje de la varianza explicada.

Tipo de cultivo	R^2	RMSE
Raigrás	0,41	0,62
Maíz	0,71	0,38

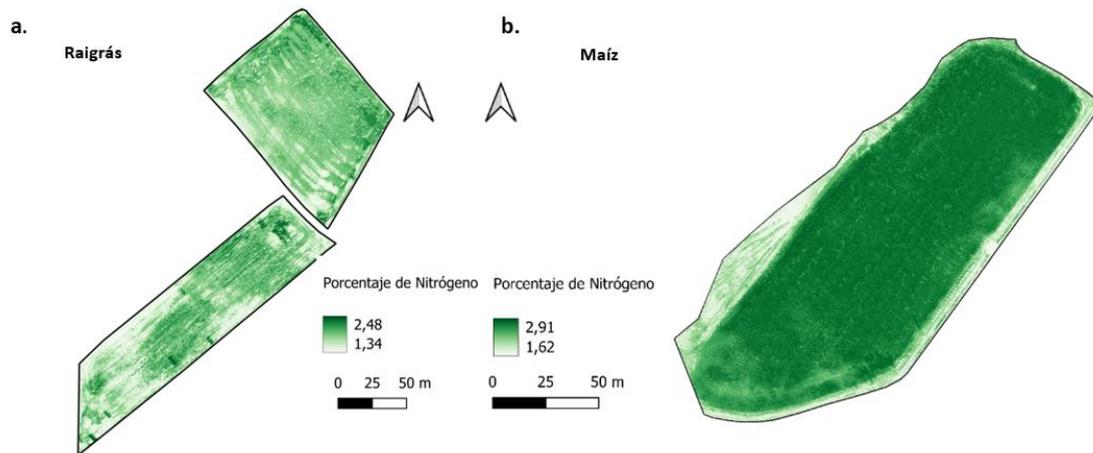


Figura 3. Mapas del contenido de nitrógeno foliar expresado en porcentaje (%). a. Parcela del concejo de Tineo bajo un sistema de pasto permanente; b. Parcela del concejo de Gozón bajo un sistema de pasto en rotación.

Conclusiones

Al analizar la relación de contenido de nitrógeno (%) con los índices y las bandas espectrales, en este estudio se ha comprobado que las que mayor correlación presentan son los derivados de las diferencias entre el infrarrojo cercano (NIR) y la banda del verde, así como el borde rojo (NDGI, CIg y RENDVI), y además son las variables que más peso toman en los modelos. Los modelos Random Forest son una herramienta que permite estimar el contenido de nitrógeno (%) y pueden utilizarse para hacer predicciones a nivel espacial obteniéndose cartografía que es muy útil para aumentar la eficiencia del tratamiento de fertilización. Aunque se han obtenido resultados prometedores, sobre todo para el maíz, dentro del grupo operativo GEPROCAR se continúa trabajando en la mejora esta metodología para poder contribuir a la consecución de un sector carbono neutral en el Principado de Asturias a través del uso de sensores remotos.

Bibliografía

- Burns, B.W., Green, V.S., Hashem, A.A., Massey, J.H., Shew, A.M., Adviento Borbe, M.A.A., Milad, M., 2022. Determining nitrogen deficiencies for maize using various remote sensing indices. *Precision Agriculture*, 23(3), pp. 791-811. doi:10.1007/s11119-021-09861-4.
- Carballal Samalea, A., González García, C., Méndez Miranda, M., Piñeiro Sierra, I., Corral Corrales, M.E., Martínez Fernández, A., 2023. Variedades de maíz. Actualización año 2023 (p. 46). Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario (SERIDA).
- FAO, 2024. Land statistics 2001-2022- Global, regional and country trends (No. 88; FAOSTAT Analytical Brief).
- González Fernández, M., 2024. Estimación de Nitrógeno foliar en pastos temporales a partir de imágenes multiespectrales capturadas por drones. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Oviedo. Escuela Politécnica de Mieres
- Kumarasiri, U.W.L.M., Vitharana, U.W.A., Ariyawansa, T., Kulasekara, B.R., 2024. Use of Drone Imagery to Predict Leaf Nitrogen Content of Sugarcane Cultivated Under Organic Fertilizer Application. *Tropical Agricultural Research*, 35(1), pp. 11-23. doi:10.4038/tar.v35i1.8700.
- 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), p. 451. doi:10.3390/agriculture10100451.
- Marschner, H., Marschner, P., 2012. Marschner's mineral nutrition of higher plants (3rd ed). Academic Press.
- Salvador-Castillo, J.M., Bolaños-González, M.A., Palacios-Vélez, E., Palacios-Sánchez, L.A., López-Pérez, A., Muñoz-Pérez, J.M., 2021. Estimación de la fracción de cobertura vegetal y contenido de nitrógeno del dosel en maíz mediante sensores remotos. *Revista Terra Latinoamericana*, 39. doi.org/10.28940/terra.v39i0.899.
- Xu, G., Fan, X., Miller, A.J., 2012. Plant nitrogen assimilation and use efficiency. *Annual Review of Plant Biology*, 63, 153-182. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105532>.