



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Agrarias
Escuela de Agronomía

RELACIÓN ENTRE NDVI Y CONTENIDO DE NITRÓGENO EN UN CULTIVO DE MAÍZ FORRAJERO EN EL AGROECOSISTEMA DE VALDIVIA

Memoria presentada como parte de los
requisitos para optar al título de
Ingeniero Agrónomo

Dominique Aiken Casassa Bastres

Valdivia – Chile

2019

PROFESOR PATROCINANTE:

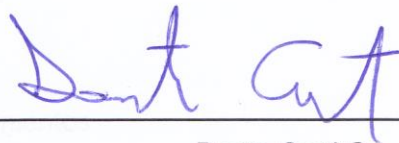


Dante Pinochet T.

Ing. Agr., M. Sc., Ph. D.

Instituto de Ingeniería Agraria y de Suelos

PROFESOR INFORMANTE:

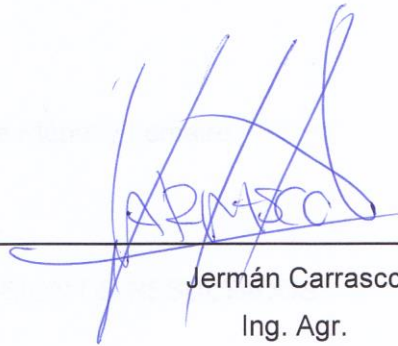


Dante Corti G.

Ing. For., M. Sc., Ph. D.

CONAF

PROFESOR INFORMANTE:



Germán Carrasco

Ing. Agr.

Instituto de Ingeniería Agraria y de Suelos

ÍNDICE DE MATERIAS

Capítulo		Página
	RESUMEN	1
	SUMMARY	2
1	INTRODUCCIÓN	3
2	MATERIAL Y METODOS	6
2.1	Área de estudio	6
2.2	Diseño experimental y tratamientos	8
2.3	Muestreo y obtención de imágenes aéreas	9
2.4	Análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	10
2.5	Análisis de laboratorio	11
2.6	Curva de N crítico (N_c %) de Plénet y Lemaire	12
2.7	Análisis estadístico	13
3	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	14
3.1	Biomasa producida en los distintos estados fenológicos para 6 dosis de N	14
3.2	Nitrógeno total de la planta (%) en función de la biomasa aérea	18
3.3	Nitrógeno total de la planta (%) en función de la biomasa aérea ajustado a la ecuación de Plénet y Lemaire	21

3.4	Uso del índice NDVI para estimar contenido total de Nitrógeno en la planta (%) durante las distintas etapas fenológicas	24
3.5	Índice de NDVI como predictor de biomasa final para maíz forrajero en las distintas etapas de crecimiento	27
4	CONCLUSIONES	29
5	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30
6	ANEXOS	34

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Análisis químico del suelo (0 - 20 cm) en el sitio de ensayo.	7
2	Muestreo por estado fenológico.	10
3	Tabla resumen con el detalle de los vuelos.	10
4	Biomasa producida con error estándar en los distintos estados fenológicos para 6 niveles de fertilización nitrogenada.	15
5	Parámetros de la ecuación sigmoidea de Boltzmann.	16

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Ubicación geográfica de la Estación Experimental Agropecuaria Austral, Valdivia. El cuadro verde indica el área donde fue cultivado el maíz. Adaptado de Google Earth, 2018.	6
2	Temperaturas media, máxima y mínima para la temporada de 2017 – 2018 (Fig. 2a). Precipitación y Evapotranspiración de la temporada de 2017 – 2018 (Fig. 2b). Adaptado de INIA Agromet, 2018.	8
3	Diagrama del ensayo.	9
4	Relación entre la concentración crítica de N ($\%N_c$) y la biomasa aérea (W) en maíz para el periodo entre emergencia y floración + 25 días.	12
5	Biomasa aérea en cosecha (R4) (ton ha^{-1}) en función de las distintas dosis (kg N ha^{-1}). En cada punto se presenta el promedio de la biomasa con su error estándar.	17
6	Nitrógeno total de la planta (%) en función de la biomasa aérea (ton ha^{-1}) para cada una de las dosis de fertilización (kg N ha^{-1}). El N (%) está presentado como el promedio de los 3 bloques con su error estándar.	19
7	Nitrógeno total de la planta (%) en función de la biomasa aérea (ton ha^{-1}) ajustado a la ecuación de Plénet y Lemaire (2000) para las diferentes dosis de nitrógeno (kg N ha^{-1}). Los datos de N de los 3 bloques fueron analizados de forma independiente (108 datos en total).	23
8	Nitrógeno total de la planta (%) en función del índice NDVI para los estados V6, VT y R1. Para cada estado se asocia un mapa de NDVI del cultivo.	25

- 9 Biomasa aérea a cosecha (ton ha^{-1}) en función del índice NDVI para el estado V6 y R1. Los datos de biomasa son un promedio de los 3 bloques con su error estándar. 28

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo		Página
1	Análisis de N mineral (ppm) del suelo post-cosecha para cada parcela.	34
2	Biomasa aérea en función de los días después de la siembra para 6 diferentes dosis de nitrógeno. Se presentan los valores de biomasa con su desviación estándar. Se retiraron los datos de biomasa cuando el coeficiente de variación fue mayor al 20%, dejando 2 repeticiones en esos casos.	34
3	Andeva simple del Top de la MS de las diferentes dosis con su error estándar según la ecuación sigmoidea de Boltzmann y comparación múltiple del test de Tukey al 5%. Los valores de biomasa con un coeficiente de variación menor al 20% fueron eliminados, con un total de 97 datos analizados.	35
4	Andeva multifactorial de la biomasa en MS en los distintos estados fenológicos, con los factores dosis N y bloque (90 datos analizados).	36
5	Andeva multifactorial del N de la planta en los distintos tratamientos con los factores bloque y estado fenológico (108 datos analizados).	36
6	Andeva multifactorial del N de la planta en los diferentes estados fenológicos con los factores bloque y dosis de N (108 datos analizados).	37
7	Análisis residual de N obtenido con el N crítico de la ecuación de Plénet y Lemaire (2000).	38
8	Andeva multifactorial para NDVI en V6, VT y R1 con los factores dosis, bloque (54 datos analizados).	39

RESUMEN

Monitorear los cultivos a través de índices de vegetación puede ayudar a desarrollar un manejo más eficiente de la fertilización nitrogenada, y también a predecir el rendimiento a cosecha. En este estudio, el objetivo fue determinar la eficiencia del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en estimar la concentración de nitrógeno (N) en estados fenológicos tempranos y predecir la biomasa final producida en el cultivo de maíz forrajero en el agroecosistema de Valdivia. Además, se midió el contenido de N del maíz y se comparó con la curva de dilución de N crítico para el crecimiento del maíz de Plénet y Lemaire (2000), para distinguir si la fertilización N aplicada al cultivo fue óptima, excesiva o deficitaria. Se estableció un ensayo experimental de maíz forrajero con 3 repeticiones y 6 diferentes tratamientos de N (0, 50, 100, 200, 300, 500 kg N ha⁻¹), donde 1/3 de la dosis de N fue aplicada en la siembra y 2/3 en estado de 8 hojas (V8). Los muestreos de las plantas fueron recolectados en los estados fenológicos V4, V6, V8, VT y R1, y en cosecha, R4 y los valores de NDVI se obtuvieron en los estados V6, VT y R1. Según la curva de Plénet y Lemaire, la dosis mínima óptima que produce la máxima biomasa del maíz forrajero fue de 200 kg N ha⁻¹, cercano a la dosis óptima calculada en este ensayo al 90% del máximo del rendimiento, la cual fue de 160 kg N ha⁻¹. Esto sugiere que la curva de N crítica fue adecuada para predecir el crecimiento del maíz forrajero en el sur de Chile. El estado reproductivo R1 fue la etapa más efectiva para estimar una concentración de N (%) a través del NDVI ($R^2 = 0.80$), sin embargo, falló en estimar el N (%) en el estado VT y V6, lo cual es crítico para la segunda aplicación parcializada de N. El NDVI también fue un buen predictor de biomasa a cosecha en el estado V6 ($R^2 = 0.93$) y R1 ($R^2 = 0.84$), lo que permite conocer anticipadamente la productividad y estimar la demanda final de N.

SUMMARY

Monitoring crops using vegetation indices can help to develop a more efficient management of nitrogen fertilization and can also predict crop yields. In this study, the objective was to evaluate the efficiency of the Normalized Vegetation Difference Index (NDVI) in estimating nitrogen (N) in early phenological stages and to predict final biomass produced in forage maize in Valdivia's agroecosystem. In addition, the N content of maize was measured and compared to the critical N dilution curve for maize growth proposed by Plénet and Lemaire (2000), to discriminate between optimal, sub-optimal and supra-optimal N fertilization. A field experiment of forage maize was established with 3 replications and 6 N rates (0, 50, 100, 200, 300, 500 kg N ha⁻¹), whereas 1/3 of N fertilization was applied at sowing time and the remaining 2/3 at the 8-leaf stage (V8). The plant samples were collected at V4, V6, V8, VT and R1 stages and at harvest, R4. NDVI values were obtained at V6, VT and R1 stages. According to Plénet and Lemaire, the minimum N treatments that produces maximum aboveground biomass of forage maize was 200 kg N ha⁻¹, closely related to the optimal N treatments calculated on this experiment at 90% of the maximum yield, with 160 kg N ha⁻¹. This suggests that the critical N curve is appropriate to predict forage maize growth in southern Chile. The reproductive period R1 was the more effective stage to estimate N concentration (%) using NDVI ($R^2 = 0.80$). However, it failed to estimate N (%) at VT and V6 stages, which is critical for the second partialized N application. NDVI was also a good predictor of biomass yield at V6 stage ($R^2 = 0.93$) and R1 stage ($R^2 = 0.84$), which allows in advance to assess the productivity and estimate the final N requirement.

1 INTRODUCCIÓN

El Maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos de mayor producción y superficie sembrada en Chile, el cual se produce en varios agroecosistemas a lo largo del país, cultivándose para grano, semilla, para consumo fresco y forraje animal (ODEPA, 2019). La productividad del maíz fluctúa entre las distintas regiones, donde su rendimiento no solo se ve influenciado por las condiciones edafoclimáticas, sino que también por la aplicación de nutrientes, especialmente nitrógeno (N). El N es usualmente deficitario en agroecosistemas de alta producción, por ello su fertilización es requerida en casi todos los cultivos de alto rendimiento. Además, el N es determinante para el crecimiento de la biomasa, siendo indispensable de muchos compuestos orgánicos, como proteínas, pigmentos (clorofila), aminoácidos, ácidos nucleicos, enzimas, entre otros, teniendo relevancia estructural y funcional (Havlin *et al.*, 2013).

Cuando el N es aplicado a los cultivos en forma desmedida y en niveles superiores a los demandados por la planta, se generan excesos de N en el suelo, lo que conduce a contaminación del medio ambiente, agua y aire, principalmente por lixiviación de nitratos y desnitrificación. Por el contrario, fertilizar con dosis nitrogenadas muy bajas a los cultivos de alta demanda de N, como en el caso del maíz, produce un bajo rendimiento y afecta la calidad de grano a cosecha (Randall y Goss, 2008). Para evitar los excesos y déficits de la fertilización nitrogenada, Plénet y Lemaire (2000), desarrollaron una curva de N crítico en maíz, la cual indica la concentración mínima de N (%) requerida en la parte aérea para producir la máxima biomasa en un tiempo dado. Esta curva de dilución de N ha sido utilizada ampliamente como herramienta de diagnóstico del nivel de N del cultivo, discriminando entre niveles sub-óptimos y supra-óptimos de la concentración de N en la planta (Sadras y Lemaire, 2018).

Los crecientes costos de producción de los cultivos, la preocupación por la contaminación del medio ambiente, y la menor superficie de suelo destinada a la producción de cultivos, han incentivado a desarrollar un manejo más eficiente de la fertilización de N. Sin embargo, muestrear directamente en campo y analizar la concentración de N en el laboratorio es un proceso prolongado y costoso. Por ello, se

han desarrollado sistemas de estimación que son eficientes y rápidos, permitiendo obtener resultados en horas de que se realiza la estimación.

En este contexto, los índices de vegetación han sido mundialmente utilizados para optimizar la cantidad de los insumos agrícolas en la producción de cultivos, localizando las diferentes zonas dentro de la superficie cultivada con sus necesidades nutricionales específicas y realizar un manejo diferencial para cada sector (Stanley, 2008; Fernández, 2007).

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), desarrollado por Rouse *et al.* (1974), es el primer índice de vegetación creado y uno de los más utilizados para estimar la biomasa producida (Hayes and Decker, 1996; Prasad *et al.*, 2006), y más recientemente el nivel de nitrógeno en los cultivos (Miller *et al.*, 2017). El NDVI se obtiene de análisis aplicados a imágenes aéreas, las cuales permiten conocer y monitorear el estado vegetal de grandes áreas de manera más asequible, mediante vehículos aéreos no tripulados, y con ello obtener una estimación rápida del contenido de N de las plantas (Tagarakis and Ketterings, 2017). El NDVI relaciona las bandas rojo (R) e infrarrojo cercano (IR) del espectro de la luz. Una planta sana, con mayor contenido de clorofila en sus hojas, absorbe más R y refleja más IR que una planta enferma. Puesto que el contenido de clorofila es mayormente determinado por la disponibilidad de N (Havlin *et al.*, 2013), esta relación ha sido usada para monitorear la concentración de N de la planta (Amaral *et al.*, 2014).

Para evitar pérdidas por altas concentraciones de N en el suelo, este se aplica de forma parcializada en maíz y de esta forma se ajusta a las necesidades del cultivo y así se minimizan los impactos al medio ambiente. Debido a esto, estimar un contenido de N en etapas tempranas del cultivo resulta útil para adecuar la fertilización nitrogenada a la productividad del cultivo. Algunos estudios han mostrado que el NDVI se relaciona con la concentración de N y la biomasa producida en estados vegetativos tempranos (Islam *et al.*, 2011). Estos autores evaluaron en Australia el uso de NDVI para estimar el rendimiento y contenido de nitrógeno en maíz forrajero, concluyendo que el maíz en el estado fenológico V8 (8 hojas) fue la etapa más efectiva para predecir N (%) ($R^2=0.92$) y biomasa a cosecha ($R^2 = 0.81$); Por su parte en Estados Unidos, Martin (2002),

también determinó que la mayor relación del NDVI para estimar rendimiento en maíz fue en el estado V8 ($R^2 = 0.66$). Otros investigadores han sido más cautos al respecto, mostrando que solo el maíz se relaciona mejor en etapas reproductivas, como Bagheri *et al.* (2013), quien menciona que el NDVI estuvo altamente correlacionado al N de la canopia del maíz en la etapa V13 (R^2 de 0.72), pero no tanto en estados más tempranos.

Aplicar una dosis óptima de N a los cultivos es una decisión relevante que enfrentan los agricultores; por esto, conocer la demanda de N e incrementar su eficiencia de fertilización es clave para alcanzar el máximo rendimiento, con la menor contaminación. Sin embargo, en Chile existe una escasez de estudios en torno a los índices de vegetación, particularmente en la zona centro sur, dominada por suelos volcánicos, donde se hace necesario evaluar la validez que presenta el NDVI como estimador de la concentración crítica de N. La hipótesis de este estudio es:

- El índice NDVI está correlacionado con el contenido de Nitrógeno del cultivo en todos los estados fenológicos del maíz forrajero, además de permitir predecir la biomasa final, desde mediciones de NDVI en estados fenológicos tempranos del cultivo.

En ese contexto, el objetivo general es:

- Determinar la relación entre el contenido de N del maíz forrajero en distintos estados fenológicos y el valor de NDVI desde imágenes aéreas en el agroecosistema de Valdivia.

Los objetivos específicos son:

- Evaluar la concentración de N en función de la biomasa producida en maíz forrajero y compararla con la ecuación propuesta para el nivel de Nitrógeno crítico propuesto por Plénet y Lemaire.
- Relacionar la concentración de nitrógeno en las plantas con el valor del índice de NDVI tomado por imágenes aéreas en diferentes etapas del crecimiento del maíz.
- Evaluar la utilidad del NDVI como predictor temprano de biomasa final en el cultivo de maíz forrajero.

2 MATERIAL Y MÉTODO

2.1 Área de estudio

El experimento de campo se localizó en la Estación Experimental Agropecuaria Austral (EEAA), perteneciente a la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Austral de Chile (UACH), ubicada en la XIV Región de Los Ríos 39°47'20.09" S y 73°14'6.34" O, a 6 km de la ciudad de Valdivia (Figura 1).



FIGURA 1. Ubicación geográfica de la Estación Experimental Agropecuaria Austral, Valdivia. El cuadro verde indica el área donde fue cultivado el maíz. Adaptado de Google Earth, 2018.

El suelo empleado fue un Andisol de la Serie Valdivia (Duric Hapludand). Este suelo se desarrolló a partir de cenizas volcánicas, con un buen drenaje y una textura superficial franco limosa y en profundidad areno-francosa. Presenta una densidad aparente de 0.82 Mg m^{-3} y una porosidad total del 65% (CIREN, 2008; IREN, CORFO y UACH, 1978). El suelo no presentó limitaciones físicas evidentes para el crecimiento del maíz. Se realizó un análisis de suelo de 0-20 cm previo a la siembra y de post-cosecha (Anexo 1), de acuerdo con las metodologías usadas en el laboratorio de Química de Suelos del Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos de la UACH. Las características químicas del análisis inicial se muestran en el Cuadro 1.

CUADRO 1. Análisis químico del suelo (0 - 20 cm) en el sitio de ensayo.

Parámetro	Sitio de ensayo 20 noviembre 2017
pH (1:2.5) H ₂ O	5.8
pH (1:2.5) CaCl ₂ 0.01 M	5.0
Nitrógeno mineral (mg kg ⁻¹)	23.8
Fósforo disponible (mg kg ⁻¹ P-Olsen)	31.7
Calcio intercambiable (cmolc kg ⁻¹)	3.58
Magnesio intercambiable (cmolc kg ⁻¹)	0.28
Sodio intercambiable (cmolc kg ⁻¹)	0.07
Potasio intercambiable (cmolc kg ⁻¹)	0.31
Suma de bases intercambiables (cmolc kg ⁻¹)	4.24
Aluminio intercambiable (cmolc kg ⁻¹)	0.18
Saturación de aluminio (%)	4.1
Zinc extractable (mg kg ⁻¹)	0.38

En la temporada del ensayo del maíz entre noviembre de 2017 y marzo de 2018 se tuvo una temperatura media de 15.1 °C, con una máxima de 27.6 °C y una mínima de 3.4 °C (INIA Agromet, Figura 2a). Además, en la Figura 2b, se muestra que las precipitaciones en esta temporada fueron 417.2 mm, siendo mayores en marzo (227.0 mm) y menores en el mes de febrero (7.5 mm). En los meses donde la evapotranspiración fue mayor que la precipitación, se utilizó riego mediante un sistema de aspersión considerando un 60 – 80% de eficiencia en su aplicación y fue monitoreado mediante 6 sensores de humedad FDR (Frequency Domain Reflectometry) a 3 distintas profundidades.

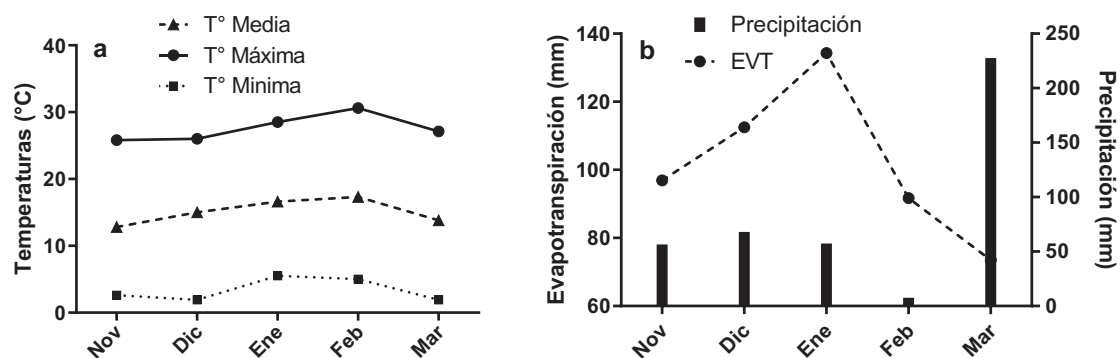


FIGURA 2. Temperaturas media, máxima y mínima para la temporada de 2017 – 2018 (Fig. 2a). Precipitación y Evapotranspiración de la temporada de 2017 – 2018 (Fig. 2b). Adaptado de INIA Agromet, 2018.

2.2 Diseño experimental y tratamientos

Se utilizó la variedad de maíz híbrido Pioneer P7524 FAO 220. Para describir el desarrollo del maíz se utilizó la escala de Ritchie y Hanway (1982), donde la etapa vegetativa se indica con una V y el subíndice es señalado con el número de la última hoja completamente expandida. Cuando ya han aparecido todas las hojas empieza el desarrollo de la panoja indicado por las letras VT, y luego la antesis con el llenado de granos denominado R. La aparición de estigmas es señalada como R1 y cuando el grano está en estado pastoso es R4.

Se sembró el 23 de noviembre de 2017 y la cosecha fue el 27 de marzo de 2018 en el estado R4. El marco de plantación fue de 0.5 m entre hilera y 0.18 m sobre hilera, teniendo 111.111 plantas ha⁻¹. El ensayo fue diseñado en bloques completos al azar con 18 parcelas en total, de 24.5 m² cada una (Figura 3).

Previo a la siembra se hizo una preparación de suelo y, a partir del análisis inicial del suelo (Cuadro 1), se aplicaron 2 ton ha⁻¹ de enmienda calcárea (CaCO₃), 1100 kg ha⁻¹ de superfosfato triple (46% P₂O₅), 200 kg ha⁻¹ de KCl (60% K₂O) y 44 kg ha⁻¹ de sulfato de zinc (ZnSO₄ 7H₂O).

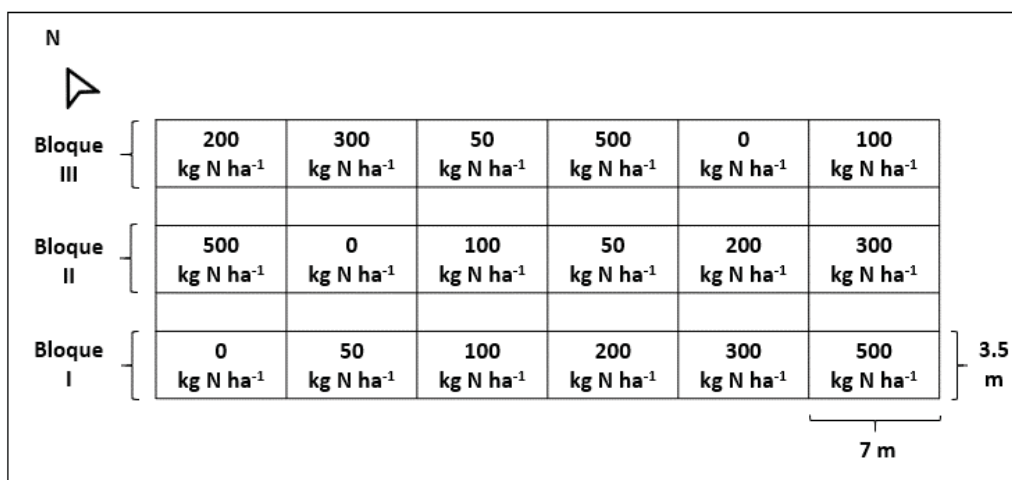


FIGURA 3. Diagrama del ensayo.

Los tratamientos consistieron en 6 dosis de fertilización nitrogenada: 0, 50, 100, 200, 300 y 500 kg N ha⁻¹, aplicados como urea (46% CO(NH₂)₂) de forma parcializada en cada una de las parcelas con sus repeticiones. La primera aplicación fue de 1/3 del total de N un día previo a la siembra y la segunda fue 2/3 del restante de N en el estado V8, el 30 de enero 2018.

2.3 Muestreo y obtención de imágenes aéreas

La biomasa aérea de maíz forrajero de cada parcela fue muestreada en los estados fenológicos V4, V6, V8, VT, R1 y R4. Para ello se tomaron plantas completas en cada estado, cortando a 2.5 cm del suelo. El número de plantas muestreadas fueron variando en cada etapa y se indican en el Cuadro 2. Inmediatamente anterior a cada muestreo de la biomasa, se tomó una imagen aérea del ensayo. Las imágenes fueron tomadas por drones, equipados con una cámara multispectral Parrot Sequoia (RGB 16 MPIX), la cual entrega información de cuatro bandas del espectro: azul, verde, roja (R), e infrarroja cercana (IR). Problemas durante el muestreo causaron que 3 imágenes (V6, VT y R1), de un total de 6 realizados, fueron viables.

CUADRO 2: Muestreo por estado fenológico.

Estado Fenológico	V4	V6	V8	VT	R1	R4
Fecha	22.12.17	13.01.18	28.01.18	14.02.18	28.02.18	27.03.18
Nº de plantas cosechadas	6	6	6	4	3	15
Área cosechada (m ²)	0.54	0.54	0.54	0.36	0.27	1.35
Días después de la siembra	29	51	66	83	97	124
Imagen aérea	No viable	Viable	No viable	Viable	Viable	No viable

En el Cuadro 3 se resumen los vuelos que fueron viables de los drones por fecha y estado fenológico, detallando el tipo de dron usado, tipo de cámara, resolución de la imagen con su altura de vuelo y píxel, la hora, y las condiciones climáticas del día de la toma de imagen: la radiación solar y la precipitación (Pp) del día de vuelo.

CUADRO 3: Tabla resumen con el detalle de los vuelos.

Estado fenológico	Fecha	Dron	Cámara	Píxel	Altura de vuelo	Hora	Radiación solar	Pp
V6	13.01.18	Avión	Sequoia	7.5 cm	100 m	12:00	29.2 Mj m ²	0 mm
VT	14.02.18	Phantom 4	Sequoia	7.5 cm	80 m	15:30	25.6 Mj m ²	0 mm
R1	28.02.18	Phantom 4	Sequoia	7.5 cm	80 m	15:30	22.7 Mj m ²	0 mm

2.4 Análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El NDVI, desarrollado por Rouse *et al.* (1974), se calculó mediante la ecuación:

$$NDVI = \frac{(IR-R)}{(IR+R)} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde IR = Infrarrojo cercano; y R = Rojo

El índice relaciona la banda roja (R) (0.6 a 0.7 μm) y la infrarroja cercana (IR) (0.7 a 1.3 μm) mediante un cociente simple, dando resultados entre los valores -1 y +1. La banda roja es absorbida por la clorofila de las plantas, por lo tanto, las plantas sanas absorben más luz en la banda R y reflejan mayor cantidad de luz en la banda IR, en comparación con las plantas enfermas. Una vegetación verde y sana, normalmente tiene los valores más altos de NDVI, mientras que superficies sin vegetación, como suelo descubierto, rocas, hielo, nieve o nubes, tienen usualmente valores de NDVI cercanos a cero o levemente negativos.

Para el análisis del índice NDVI se hizo un procesamiento digital a las imágenes capturadas por los drones. Se georreferenciaron las imágenes mediante las coordenadas del mapa y se calculó el índice NDVI (ecuación 1) mediante la calculadora ráster del software de sistemas de información geográficas (SIG) QGIS. Una vez hecha la matriz de la imagen con los valores de NDVI, se confeccionaron polígonos en el área de los muestreos y se les extrajo el valor promedio del NDVI con su desviación estándar. De esta manera, se obtuvo un valor de NDVI para cada parcela y en cada una de las etapas fenológicas fotografiadas.

2.5 Análisis de laboratorio

En cada muestreo la planta se separó en órganos, ya sea en panoja, mazorcas, granos, corontas, envolturas, tallos y hojas, según su estado fenológico. Cada parte de la planta se pesó en fresco, luego se colocó al horno a 70°C durante 4 – 5 días y una vez que las muestras estaban secas, se volvieron a pesar. De esta manera se calculó el porcentaje de materia seca (%), el peso de las plantas completas y el peso de cada uno de los órganos por separado (kg ha^{-1} o ton ha^{-1}). Luego, las muestras se molieron y se analizó el N mediante el método Kjeldahl. Este método tiene 3 fases: digestión de las muestras, destilación y por último determinación del N mediante titulación. De esta manera se obtuvo la concentración de N (%) para cada una de las partes de la planta, y para cada estado fenológico muestreado.

2.6 Curva de N crítico (N_c %) de Plénet y Lemaire

Los datos de la concentración de N (%) obtenidos en este ensayo fueron comparados con la curva de N_c de Plénet y Lemaire (2000) creado para maíz. Plénet y Lemaire postulan que la concentración de N en los cultivos decae a medida que la biomasa del cultivo se incrementa (Figura 4) y describen esta disminución mediante una función de potencia negativa:

$$\%N_c = 3.40 (W)^{-0.37} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde 3.40 representa la concentración de N cuando la biomasa aérea (W) es $W \leq 1$ ton ha^{-1} y -0.37 el coeficiente entre la disminución relativa en la planta N% y la tasa de crecimiento relativo del maíz. El modelo es solo aplicable en el desarrollo del maíz entre emergencia y floración + 25 días y cuando W es mayor a 1 ton ha^{-1} y menor a 22 ton ha^{-1} .

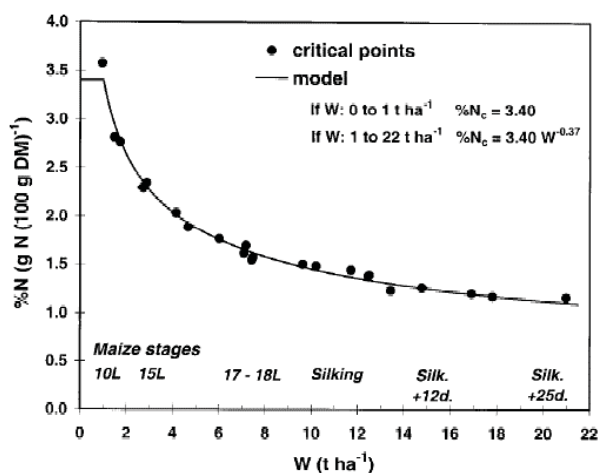


FIGURA 4. Relación entre la concentración crítica de N ($\%N_c$) y la biomasa aérea (W) en maíz para el periodo entre emergencia y floración + 25 días.

La concentración del nitrógeno crítico ($\% N_c$) indica el mínimo de N (%) en los tallos requerido para producir la máxima biomasa aérea en un tiempo dado. Esta curva fue

inventada y validada a través de múltiples experimentos en maíz como herramienta de diagnóstico del nivel de N en el cultivo.

2.7 Análisis estadístico

Los resultados de la biomasa (MS), la concentración de N (%) y los valores de NDVI obtenidos por parcela, fueron analizados a través de los softwares GraphPad Prism 8.0.2 y Statgraphics Centurion XVI. II. En general, luego de cumplir el supuesto de homogeneidad de varianzas, aleatoriedad y normalidad, se les hizo un análisis de varianza (Andeva) y las medias fueron separadas usando el test de tukey.

Se realizó una descripción de las curvas de regresión no lineal sigmoidea utilizando el tiempo como variable independiente y la producción de biomasa como dependiente. Se utilizó un Andeva y un test de tukey para evaluar estadísticamente los parámetros de la ecuación ajustada.

Además, se ajustó una curva cuadrática, a través de regresión no lineal, para describir la relación entre la dosis de N y la productividad de biomasa, en el estado R4. Todas las ecuaciones fueron descritas con su coeficiente de determinación y su error estándar. Las regresiones lineales utilizadas, para describir los ajustes entre NDVI y el porcentaje de N, o entre NDVI y biomasa producida, fueron descritas además usando el valor de P para indicar su significancia.

Para evaluar los ajustes de las curvas de Plénet y Lemaire a los datos obtenidos en este estudio, se realizó un análisis de residuales entre los valores estimados por la curva y los valores medidos en cada dosis de N, a través de la biomasa producida. Los valores de residuales se expresaron como la suma total de residuales.

3 PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Biomasa producida en los distintos estados fenológicos para 6 dosis de N

En el Cuadro 5 se muestran los valores de la biomasa del maíz forrajero expresados en materia seca (MS) en la temporada del cultivo. A medida que el cultivo fue creciendo la biomasa medida en MS incrementó en forma sigmoidea (Anexo 2).

La producción de MS a cosecha (estado R4) varió desde 18.7 a 21.9 ton MS ha⁻¹ (Cuadro 4). Los valores de MS en R4 presentaron diferencias significativas solo entre las dosis 0 y 500 kg N ha⁻¹, los demás tratamientos (50, 100, 200, y 300 kg N ha⁻¹) no fueron significativos, quedando en una situación intermedia (Anexo 3). La biomasa producida en los demás estados fenológicos (V4, V6, V8, VT y R1) no presentaron diferencias significativas entre las distintas dosis (Anexo 4).

La falta de respuesta a la fertilización N del cultivo puede explicarse debido a que (i) en las primeras etapas del cultivo, como V4 o V6, al presentar una biomasa reducida, el cultivo no absorbe grandes cantidades de N, mostrando que la biomasa inicialmente no dependió del aporte de la fertilización nitrogenada; (ii) el aporte inicial de N-mineral en el suelo fue de 24 ppm (Cuadro 1), lo cual fue suficiente para satisfacer la demanda del cultivo y la fertilización solo incrementa el nivel de N más allá de lo requerido, y (iii) el pool de N-orgánico mineralizado en la temporada de crecimiento incrementó los niveles de N del suelo, siendo un aporte que satisface la demanda del cultivo hasta una producción de 18.7 ton MS ha⁻¹, tal como lo muestran los valores de biomasa alcanzados en el tratamiento sin adición de N.

Es usual que en los suelos volcánicos exista una alta mineralización de N, dependiendo del ingreso de residuos de los años anteriores (Rodríguez *et al.*, 2001; Pinochet *et al.*, 2014). Esta mineralización puede llegar hasta niveles de aporte de 90 kg N ha⁻¹, dependiendo del ingreso de residuos y el tiempo de mineralización durante el

cultivo. Esta mineralización se suma al N mineral ya presente en el suelo, lo que puede llevar a un alto suministro de N nativo del suelo haciendo que los requerimientos de fertilización N sean innecesarios o muy bajos en dosis de fertilizante a aplicar (Rodríguez *et al.*, 2001).

CUADRO 4: Biomasa producida con error estándar en los distintos estados fenológicos para 6 niveles de fertilización nitrogenada.

Dosis N (kg ha ⁻¹)	Materia Seca (kg ha ⁻¹)					
	V4	V6	V8	VT	R1	R4
0	34.6 ± 9.6	550.0 ± 45.3	2,804.0 ± 168.7	7,254.4 ± 859.2	13,432.8 ± 913.8	18,730.7 ± 998.0
50	35.7 ± 8.6	572.5 ± 165.8	3,793.6 ± 382.2	8,721.0 ± 310.2	12,448.4 ± 359.1	19,179.8 ± 884.4
100	36.1 ± 8.3	733.1 ± 31.1	3,154.3 ± 217.8	7,485.8 ± 839.9	14,668.1 ± 534.8	20,074.4 ± 1222.4
200	31.0 ± 2.7	348.2 ± 68.8	2,543.7 ± 259.2	8,512.1 ± 1738.3	12,971.9 ± 1161.4	20,548.1 ± 995.2
300	32.4 ± 3.8	554.0 ± 127.5	3,226.5 ± 719.9	7,764.8 ± 1139.2	12,887.4 ± 540.4	20,629.2 ± 746.3
500	38.5 ± 8.3	466.9 ± 70.7	3,123.6 ± 345.4	7,280.1 ± 240.8	13,273.7 ± 550.8	21,952.3 ± 399.5

Los valores de biomasa en cosecha (estado R4) se ajustaron a la ecuación sigmoidea de Boltzmann:

$$Y = \frac{Y_{\text{máx}}}{1 + \exp\left(\frac{V_{50} - x}{\text{pendiente}}\right)} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde $Y_{\text{máx}}$ = valor máximo ajustado de acuerdo con la ecuación; V_{50} = valor de x al 50% de $Y_{\text{máx}}$;
Pendiente = valor constante de la expresión exponencial de la ecuación

Se obtuvo una curva para cada tratamiento de N a través del tiempo (Anexo 2), donde la biomasa se ajustó con un coeficiente de determinación alto a la ecuación de Boltzmann ($R^2 > 0.97$ para los 6 tratamientos). Los parámetros de la ecuación se muestran en el Cuadro 5.

CUADRO 5. Parámetros de la ecuación sigmoidea de Boltzmann.

Dosis (kg N ha ⁻¹)	Parámetros de la ecuación sigmoidea de Boltzmann				
	$Y_{\text{máx}}$	V50	pendiente	R^2	Sy.x
0	19644 a	88.51	11.56	0.980	1082.0
50	21031 ab	89.86	15.09	0.985	934.9
100	20979 ab	87.37	11.71	0.988	943.5
200	21901 ab	89.68	13.41	0.971	934.9
300	23005 ab	92.11	15.11	0.988	921.8
500	24573 b	94.74	13.79	0.995	612.9

Sy.x = error estándar de la ecuación ajustada

El valor de $Y_{\text{máx}}$ de la curva ajustada mostró diferencias significativas entre la dosis 0 de N y la dosis máxima aplicada, estando las dosis intermedias entre ambos valores. Por su parte, el valor del V50 y de la pendiente de la ecuación fueron similares estadísticamente en todos los casos evaluados.

Se ajustaron las distintas dosis de N con la biomasa final a cosecha mediante una función cuadrática. En la Figura 5 se observa que la curva presenta un coeficiente de determinación alto ($R^2 = 0.94$). Durante la cosecha final el material vegetal cosechado fue de 15 plantas en una superficie de 1.35 m². Esta cosecha fue mucho más representativa que los muestreos de los estados iniciales, pudiendo estimar de mejor manera el rendimiento final producido. De esta forma se muestra que a medida que la dosis de N aumentó, la biomasa incrementó, mostrando un valor relativamente estable hacia las dosis más altas. Como era esperado el N promovió el crecimiento vegetal, lo que permite suponer que el índice de área foliar (IAF) aumentó, interceptando las plantas una mayor radiación (Paliwal *et al.*, 2001).

Se calculó la dosis óptima (DO_{Y90}) del ensayo al 90% del valor máximo del rendimiento cuando se produce la Dosis óptima física (DOF); para esto, los rendimientos en cosecha (R4) se ajustaron a una ecuación de segundo grado: $y = -0.00000543x^2 + 0.0087x + 18.9$, donde y es la biomasa en ton ha⁻¹ y x es la dosis de N en kg ha⁻¹ (Figura 5). La DO_{Y90} de N para producir el 90% del máximo rendimiento en maíz forrajero bajo las condiciones de estudio fue de 160 kg N ha⁻¹.

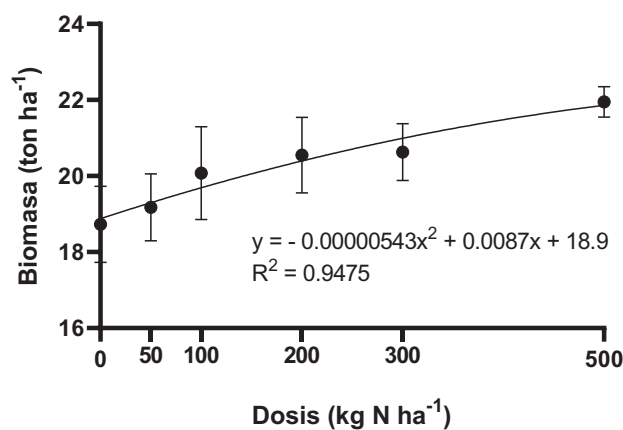


FIGURA 5: Biomasa aérea en cosecha (R4) (ton ha⁻¹) en función de las distintas dosis (kg N ha⁻¹). En cada punto se presenta el promedio de la biomasa con su error estándar.

Cuando existe una mayor disponibilidad de N en el suelo, las plantas de un cultivo tienden a acumular N más allá de lo mínimo requerido para su crecimiento, lo que se conoce como consumo de lujo (Havlin *et al.*, 2013). De esta forma se espera que los distintos niveles de N aplicados por la fertilización muestren diferencias en el contenido de N de la planta, lo cual se constituye en un índice de su nutrición N.

3.2 Nitrógeno total de la planta (%) en función de la biomasa aérea

La Figura 6 muestra que en la medida que la biomasa incrementó para cada tratamiento de fertilización N, la concentración de N en la biomasa fue disminuyendo significativamente (los valores completos se muestran en el Anexo 5). Este comportamiento general se explica en función de la movilidad del N y de la menor producción de proteínas, con relación a la producción de carbohidratos estructurales de la planta, a través del tiempo de desarrollo. De esta forma se observa que el N se va diluyendo a medida que hay una mayor producción de biomasa. La concentración de N en la planta varió entre 0.8% y 3.7%, lo que es concordante con lo señalado por Pearson y Hall (1984), quienes indican que es usual que el N en las plantas varíe entre 1 y 4%.

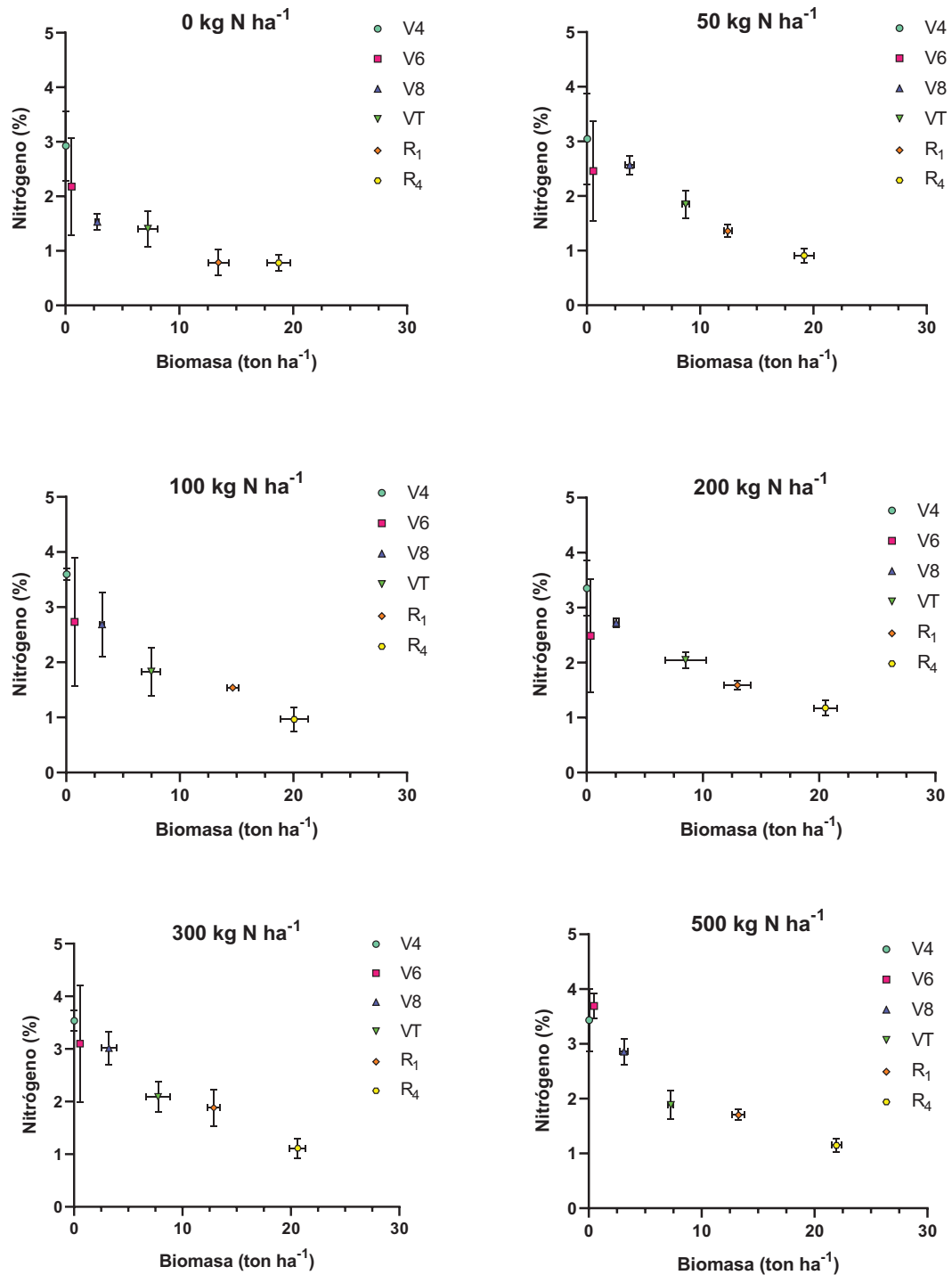


FIGURA 6: Nitrógeno total de la planta (%) en función de la biomasa aérea (ton ha⁻¹) para cada una de las dosis de fertilización (kg N ha⁻¹). El N (%) está presentado como el promedio de los 3 bloques con su error estándar.

Las dos dosis más bajas de N (0 y 50 kg ha⁻¹) produjeron las menores concentraciones de N al comienzo del ciclo del cultivo (V4 y V6). Estas concentraciones variaron entre 2% a 3% y siempre estuvieron por debajo de las concentraciones determinadas en las dosis mayores, quienes estuvieron siempre por sobre 3%. Debido al esquema de parcialización utilizado en este estudio, solo el control sin aplicación de N (0 kg N ha⁻¹) no recibió un aporte adicional en V8. Esto se hace evidente en la concentración de N de las plantas del testigo, las cuales mostraron un valor promedio de 1.5%, siendo siempre el valor significativamente inferior (Anexo 6), comparado con los valores de los demás tratamientos, que superaron el 2.5% de N. Esta menor concentración en el testigo muestra un valor deficiente de N en la planta que explicando la disminución en la MS final, que fue más baja en comparación a los demás tratamientos (Cuadro 4).

En las dosis 100, 200, 300 y 500 kg N ha⁻¹ las concentraciones de N en la etapa VT tuvieron un valor promedio de 2%, valor que fue cerca de la mitad del valor de la concentración de N medido en V4. El cultivo al entrar en la etapa VT está en su punto máximo de crecimiento vegetativo, y en su máxima tasa de absorción de agua y absorción y movilización de nutrientes, especialmente nitrógeno, y determinando su crecimiento reproductivo, desarrollando la panoja y comienza la aparición de estigmas y la producción de polen (Aldrich *et al.*, 1976).

En la etapa R1, el N total de la planta presentó valores entre el 1% y 2%, disminuyendo hasta llegar a concentraciones cerca del 1% en cosecha (R4). En esta etapa el nitrógeno se va removilizando desde los tejidos vegetativos hacia la mazorca y comienza el proceso de llenado de granos, bajando la concentración del N al final de la temporada del cultivo. En esta etapa es posible remover de un 20% a un 60% del N absorbido previo a la antesis a los granos (Paliwal *et al.*, 2001). Este descenso fue independiente de la dosis aplicada y es probable que ya el rendimiento esté completamente determinado en función del N absorbido, mostrando que las plantas solo movilizan N en sus estados finales y se ajustan en rendimiento a la concentración de N presente principalmente en los granos (Benech *et al.*, 2003).

En general, las dosis 100, 200, 300 y 500 kg N ha⁻¹ presentaron concentraciones de N muy similares sin diferencias significativas entre tratamientos (véase Anexo 6), lo que se ratificó en rendimientos a cosecha semejantes que variaron desde 20.1 a 21.9 ton MS ha⁻¹ (Cuadro 4).

Esta escasa diferencia entre los tratamientos no permite conocer cuál es la concentración de nitrógeno crítica, de acuerdo con el concepto de Lemaire (Sadras y Lemaire, 2018). En estas concentraciones de N (%) y la biomasa producida en cada tratamiento, se puede determinar si los niveles de N fueron óptimos para la planta ($N = N_{opt}$), utilizándose un índice que diagnostique si el cultivo presentó deficiencias ($N < N_{opt}$) o excesos de nitrógeno ($N > N_{opt}$).

3.3 Nitrógeno total de la planta (%) en función de la biomasa aérea ajustado a la ecuación de Plénet y Lemaire

Todos los datos fueron ajustados a la ecuación de Plénet y Lemaire (2000) (descrita en el capítulo 3.6) con el fin de diagnosticar el estado de N del cultivo. Se comparó los valores de la concentración de N a las diferentes dosis de N aplicadas con los valores predichos por dicha ecuación, y se realizó un análisis residual entre valores medidos y estimados por la ecuación (detallado en el Anexo 7).

Se observó que los valores del tratamiento de 200 kg N ha⁻¹ produjeron un mejor ajuste a la curva de disolución, ya que la suma de sus residuales fue la menor y la más cercana a cero; seguido del ajuste con los valores del tratamiento de 100 kg N ha⁻¹ y el menor ajuste se obtuvo a la curva producida por las dosis extremas utilizadas de 0 y 500 kg N ha⁻¹.

Como se muestra en la Figura 7, los valores de N (%) del tratamiento de 0 kg N ha⁻¹ se mostraron en su mayoría por debajo de la curva de Plénet y Lemaire, lo cual indicó que la concentración de N en el testigo fue menor al valor óptimo, señalando una deficiencia ($N < N_{opt}$). Por el contrario, el N en los tratamientos de 300 y 500 kg N ha⁻¹ se situaron en su mayoría por sobre la curva, señalando un exceso ($N > N_{opt}$). Los valores más cercanos a la curva, como el caso de los tratamientos de 100 y 200 kg N

ha⁻¹ indicaron que el N fue suficiente, siendo el nivel de N óptimo para el desarrollo del cultivo ($N = N_{opt}$).

Plénet y Lemaire (2000) investigaron que durante el periodo de crecimiento la expansión del área foliar juega un rol importante en la absorción de N, mostrando entre ambos una relación lineal. El IAF máximo se alcanza una semana antes de la reproducción femenina (R1) y a partir de este momento la absorción de N deja de tener relación con el IAF. En su investigación postulan que, en los tratamientos con un déficit leve de N, la relación lineal entre la absorción de N e IAF se mantiene similar a la relación cuando el N era el óptimo, en cambio, cuando hubo mayor déficit de N, la relación descendía. En este ensayo el testigo tuvo un déficit leve de N, sin embargo, no mostró consecuencias significativas en el valor de MS final al compararlo con los otros tratamientos (a excepción del tratamiento de 500 kg N ha⁻¹), corroborando lo señalado por Plénet y Lemaire (2000).

Bajo estas condiciones, la dosis mínima óptima que produce la máxima biomasa del maíz forrajero fue de 200 kg N ha⁻¹. Estos resultados sugieren que la curva de disolución de N de Plénet y Lemaire fue una buena referencia para estimar un nivel de N de la planta y para desarrollar un plan de fertilización adecuado. Además, estos resultados son cercanos a la DOY₉₀ determinada en la ecuación cuadrática ajustada que fue de 160 kg N ha⁻¹.

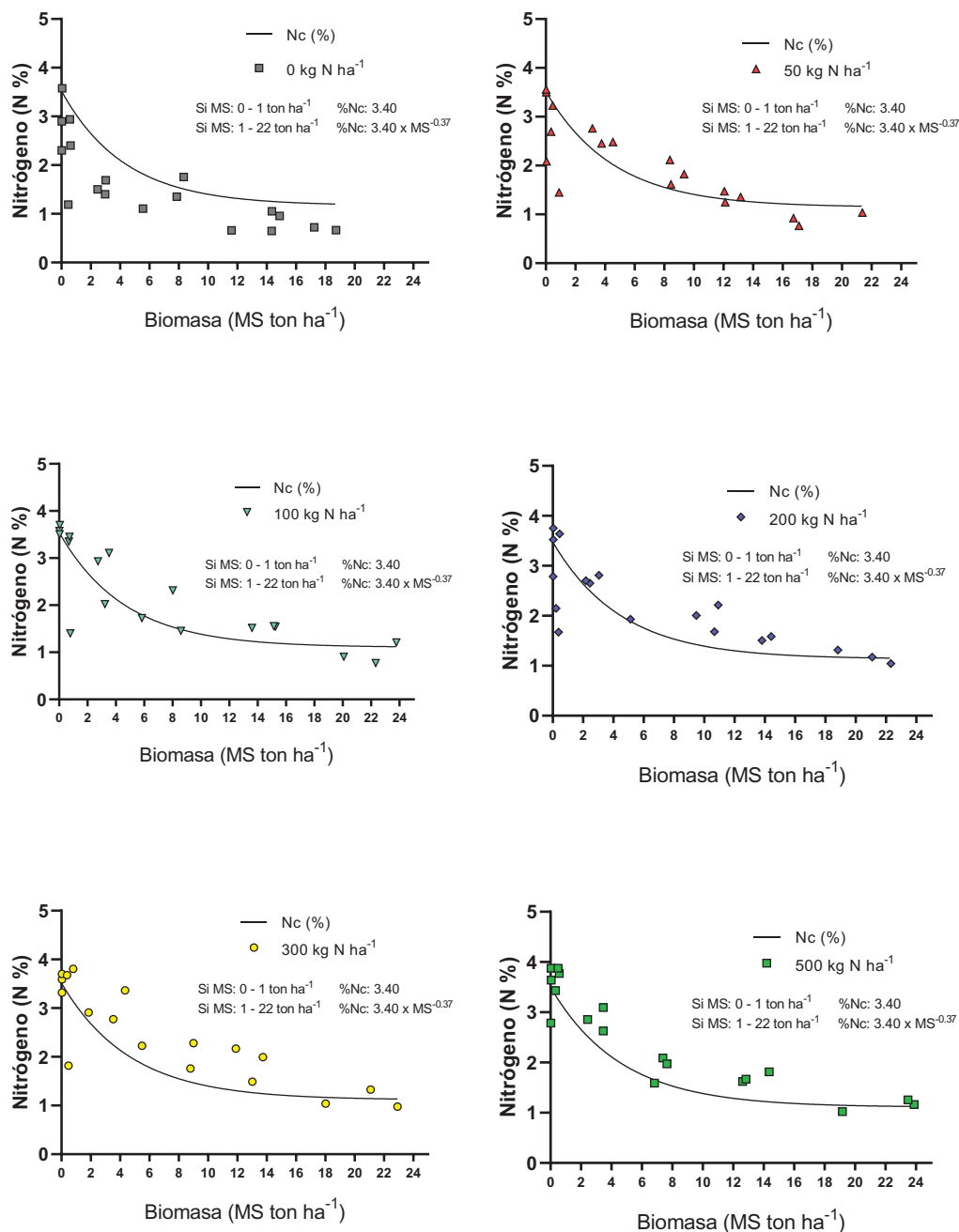


FIGURA 7: Nitrógeno total de la planta (%) en función de la biomasa aérea (ton ha⁻¹) ajustado a la ecuación de Plénet y Lemaire (2000) para las diferentes dosis de nitrógeno (kg N ha⁻¹). Los datos de N de los 3 bloques fueron analizados de forma independiente (108 datos en total).

El efecto de los tratamientos de fertilización N sobre las concentraciones de N del cultivo de maíz se realizó con la finalidad de evaluar si el índice NDVI es un estimador de la diferencia entre las concentraciones de N. Esto con la finalidad agronómica de tener un índice que pueda estimar un contenido de N, sin la necesidad de medirlo en laboratorio.

3.4 Uso del índice NDVI para estimar contenido total de Nitrógeno en la planta (%) durante las distintas etapas fenológicas

En la Figura 8 se muestra la relación del NDVI con el N total del maíz para los estados fenológicos V6, VT y R1, asociado a un mapa de NDVI del cultivo. Este mapa presenta en su leyenda una tabla con un rango de colores que van del rojo al verde. El color rojo indica valores más bajos de NDVI, por lo tanto, menor N y, en el otro extremo, el color verde, indica valores más altos de NDVI con mayores contenidos de nitrógeno.

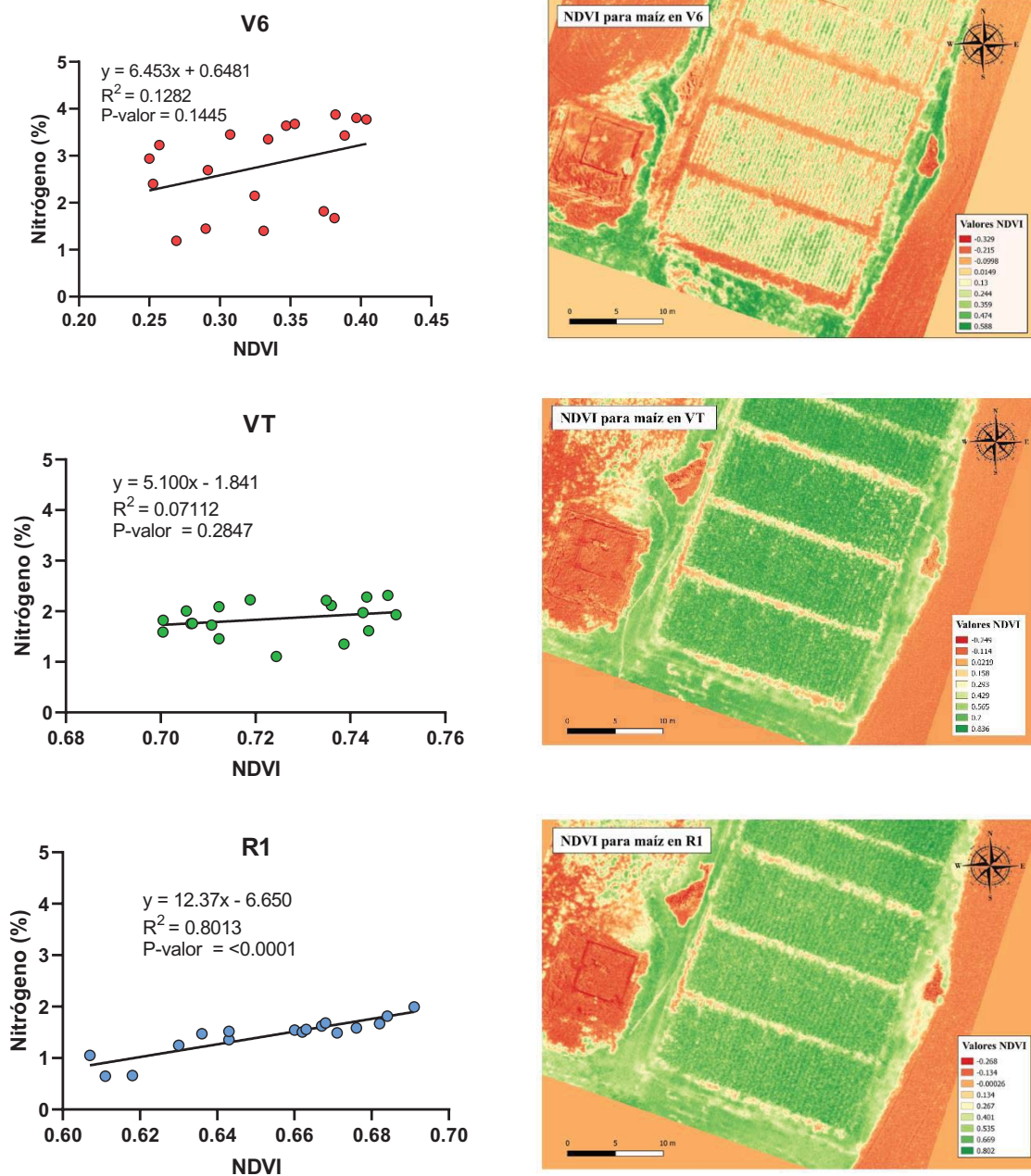


FIGURA 8: Nitrógeno total de la planta (%) en función del índice NDVI para los estados V6, VT y R1. Para cada estado se asocia un mapa de NDVI del cultivo.

Se observa que en V6 el NDVI tomó valores entre 0.25 y 0.40; luego, en la medida que la biomasa incrementó, el cultivo llegó al punto máximo de su crecimiento y requerimiento de N en VT, con valores de NDVI de 0.70 a 0.75. Después comenzó la

floración femenina en R1 y se observó que el valor de NDVI bajó, con valores de 0.60 a 0.69. Se consideró que el valor sigue descendiendo, ya que el cultivo empezará a senescer y por lo tanto mostrará menos contenido de color verde. Los valores determinados en este estudio son concordantes con los determinados por Escobar (2015), en el cultivo de banano, quien señala que el rango común para el índice NDVI es de 0.20 a 0.70, cuando la vegetación está activa.

Para el estado R1, el índice NDVI presentó un coeficiente de determinación alto (R^2 de 0.801, p -valor = <0.0001), indicando que el índice NDVI en esta etapa fue el más apropiado para estimar un valor de N. Por el contrario, en las etapas V6 y VT, el NDVI presentó una relación muy baja (V6 $R^2 = 0.128$, p -valor = 0.144; VT $R^2 = 0.07$, p -valor = 0.284), lo que significa que fue inadecuado para explicar el contenido de N, en esos estados fenológicos. Esta discrepancia de ajuste entre los índices de NDVI y la concentración de N podrían estar relacionadas a una serie de factores como las condiciones climáticas, el aporte de N mineralizado del suelo, la movilización del N en el maíz, o algún otro estrés que pudo afectar el crecimiento del cultivo y que no fue detectado durante el experimento. Todos ellos pudieron haber causado una disminución en el color verde afectando la producción de clorofila además del contenido de N de las plantas.

Como el aporte de N del suelo fue considerable y más notorio en los primeros estados fenológicos, tanto en V6 como en VT, las plantas mostraron valores de N similares bajo los diferentes tratamientos de fertilización N, por lo que no hubo un rango suficiente de concentraciones que permitieran distinguir diferentes valores de NDVI. No obstante, en R1 los nutrientes, especialmente N, se translocan desde las hojas hacia los granos, observándose una disminución del contenido de N y también de clorofila, dando un mayor rango de concentraciones producido por los tratamientos y, por lo tanto, aunque el valor de NDVI es menor, hubo una mayor correlación entre este índice y los valores medidos (Anexo 8). Los valores menores de NDVI evitan la saturación que presenta el índice NDVI, logrando estimar el N de mejor manera en esta etapa fenológica, en comparación a la etapa VT donde el N está en su punto máximo y los valores del NDVI

están sobre los valores de 0.70. Estos resultados concordaron con los obtenidos por Chaoyang *et al.* (2008), donde demostró que el NDVI es un buen indicador de N en maíz, cuando no se superan los niveles óptimos de este nutriente. Para el caso de V6 esta baja relación se asocia a que, las plantas de maíz fueron de menor tamaño, existiendo una mayor proporción de suelo descubierto. Esto produce un efecto en el NDVI, ya que las propiedades de reflectancia del suelo influyen negativamente al índice (Chuvienco, 1995).

A pesar de que en el estado R1 del cultivo el NDVI presentó una alta correlación con la concentración de N, estos datos no ayudan al objetivo agronómico de encontrar un estimador con propósitos de corregir de ser necesaria la segunda dosis de N, ya que resulta poco práctico estimar N en etapas tardías del cultivo, cuando ya no es posible corregir las aplicaciones de fertilizantes, porque estas ya han sido realizadas.

3.5 Índice de NDVI como predictor de biomasa final para maíz forrajero en las distintas etapas de crecimiento

El NDVI es también usado mundialmente para estimar la producción de biomasa de los cultivos (Mika *et al.*, 2002; Mkhabela *et al.*, 2004). En la Figura 9 se puede observar que la relación biomasa - NDVI fue directa y positiva, ya que en la medida que la biomasa fue incrementando, la magnitud del NDVI también aumentó.

El índice NDVI en las etapas V6 y R1 se determinó una alta correlación con la biomasa final (V6 $R^2 = 0.927$, p-valor = 0.002; R1 $R^2 = 0.835$, p-valor = 0.011), lo que muestra que el NDVI fue un buen predictor de biomasa a cosecha. Estos resultados son concordantes con los presentados por Tagarakis y Ketterings (2017), quienes determinaron que las predicciones más acertadas para la biomasa final en maíz fueron a partir del estado V6, en un estudio realizado en Estados Unidos. Por el contrario, en este estudio la biomasa final no se relacionó con el índice NDVI en la etapa VT, y los valores del NDVI, en este estado, no presentaron diferencias significativas entre los distintos tratamientos de N (Anexo 8); siendo el índice NDVI incapaz de predecir los distintos valores de biomasa a cosecha.

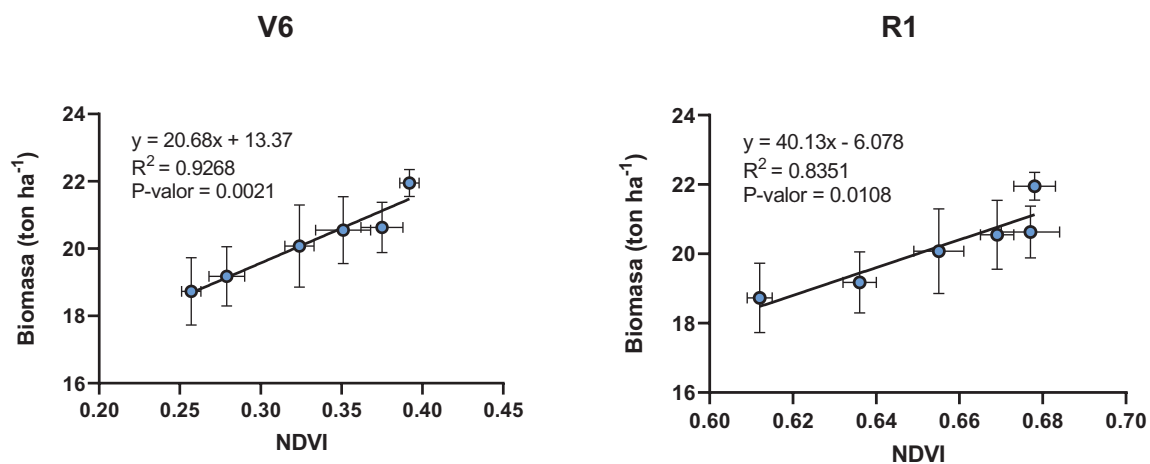


FIGURA 9: Biomasa aérea a cosecha (ton ha⁻¹) en función del índice NDVI para el estado V6 y R1. Los datos de biomasa son un promedio de los 3 bloques con su error estándar.

Debido a que el NDVI y la biomasa presentan una buena correlación, V6 sería agrónomicamente el estado fenológico en maíz más conveniente para elaborar una estimación del rendimiento potencial, ya que a diferencia del estado R1, se podría estimar una biomasa final en etapas tempranas del cultivo. Esta información sería útil y de gran interés para los productores agrícolas, permitiendo estimar probables rendimientos del cultivo. Cabe destacar, que esto solo sería válido si el cultivo a través de su crecimiento no sufre otro estrés, ya sea por algún daño físico, déficit hídrico, enfermedades, falta de otros nutrientes, que por cierto afectarán el rendimiento final.

4 CONCLUSIONES

- La concentración promedio ponderada de N se correlaciona con la biomasa total producida de maíz a través del tiempo fenológico del cultivo. Esto es, a menor tiempo fenológico transcurrido, menor biomasa producida y mayor concentración promedio ponderada de N. Este comportamiento general fue independiente de la fertilización de N aplicado.
- La ecuación propuesta por Plénet y Lemaire (2000) para el nivel de N crítico para el crecimiento de maíz fue adecuada para predecir el crecimiento del maíz forrajero en el sur de Chile. Comparando los datos predichos por la ecuación con lo medidos para la concentración de N, el menor valor de residuales se obtuvo con la dosis de 200 kg N ha⁻¹, considerada la dosis experimental óptima. Este valor fue cercano a la dosis óptima calculada para este ensayo al 90% del máximo del rendimiento, que fue de 160 kg N ha⁻¹.
- Existe escasa correlación entre los valores de NDVI con los valores de la concentración de N, siendo correlacionados solo en el estado R1. Este resultado sugiere que el NDVI no sería la mejor herramienta para estimar una predicción nutricional de N en estadios tempranos del cultivo, especialmente en V6 y V8 que son críticos para la dosificación. Sin embargo, este ensayo debe volver a repetirse para disminuir su variabilidad y realizarlo en condiciones donde se muestre una clara respuesta a la fertilización N.
- El NDVI mostró una buena relación como predictor de la biomasa final a cosecha en los estados fenológicos V6 y R1, lo que permite conocer anticipadamente la productividad y estimar la demanda final de N.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aldrich, S.; Scott, W. y Leng, E. 1976. Modern Corn Production. Second Edition. A & L publications. Printed in the United States of America. Library of Congress. Number 75-13504.
- Amaral, L.; Molin, J.; Portz, G.; Finazzi, F. y Cortinove, L. 2014. Comparison of crop canopy reflectance sensors used to identify sugarcane biomass and nitrogen status. *Precision Agric.* 16: 15-28.
- Bagheri, N.; Ahmadi, H.; Kazem, S. y Omid, M. 2013. Multispectral remote sensing for site-specific nitrogen fertilizer management. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília 48 (10): 1394-1401.
- Benech, R.; De la Fuente, E.; Miralles, D.; Otegui, M.; Satorre, E.; Savin, R. y Slafer, A. 2003. Producción de Granos. Bases funcionales para su manejo. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires, Argentina. 784 p.
- Chaoyang, W.; Zheng, N.; Quan, T. y Wenjiang, H. 2008. Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation. *Agricultural and Forest Meteorology* 148: 1230-1241.
- Chuvieco, E. 1995. Fundamentos de Teledetección Espacial. Segunda Edición. Ediciones RIALP, S.A. Alcalá, Madrid. 449 p.
- CIREN. 2003. Estudio Agroecológico X Región. Descripciones de Suelos. Materiales y Símbolos. Santiago de Chile. Publicación N° 123. 374 p.
- Escobar, O. 2015. Respuestas espectrales a la fertilización con nitrógeno y potasio en el cultivo del banano (*Musa AAA simmonds*), caso municipio zona bananera. Tesis Magister en Geomática. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela de Posgrados. Bogotá, Colombia. 99 p.
- Fernández, D.; Cichón, L.; Garrido, S. y Álvarez, H. 2007. Agricultura de precisión. Fruticultura & Diversificación. Boletín INTA N°53. 34 p.

- Havlin, J.; Tisdale, S.; Nelson, W. y Beaton, J. 2013. Soil Fertility and Fertilizers. An introduction to nutrient management. Eighth edition. Prentice Hall. New Jersey, USA. 528 p.
- Hayes, M. y Decker, W. 1996. Using NOAA AVHRR data to estimate maize production in the United States Corn Belt. *International Journal of Remote Sensing* 17 (16): 3189-3200.
- Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). 2019. Agromet, Red Agrometeorológica (On line). <<http://agromet.inia.cl/estaciones.php>>. (2 abril 2019).
- IREN CORFO UACH. 1978. Suelos de la provincia de Valdivia. Santiago, Chile. 178p.
- Islam, M.; García, S. y Henry, D. 2011. Use of normalised difference vegetation index, nitrogen concentration, and total nitrogen content of whole maize plant and plant fractions to estimate yield and nutritive value of hybrid forage maize. *Crop and Pasture Science* 62: 374-382.
- Martin, K. 2002. Expression of spatial variability in corn (*Zea Mays* L.) as influenced by growth stage using optical sensor measurements. Thesis of Master of Science. Oklahoma State University. 41 p.
- Miller, E.; Bushong, M.; Raun, W.; Abit, J. y Arnakk, B. 2017. Predicting Early Season Nitrogen Rates of Corn Using Indicator Crops. *Agronomy Journal* 109 (6): 2863-2870.
- Mkhabela, M.; Mkhabela, M. y Mashinini, N. 2004. Early maize yield forecasting in the four agro-ecological regions of Swaziland using NDVI data derived from NOAA's-AVHRR. *Agricultural and Forest Meteorology* 129: 1-9.
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). 2019. Estadísticas de cultivos. Información nacional de superficie sembrada, producción y rendimientos anuales, Chile (On line). <<https://www.odepa.gob.cl/estadisticas-del-sector/estadisticas-productivas>>. (2 Julio 2019).

- Paliwal, R.; Granados, G.; Lafitte, H. y Violic, A. 2001. El Maíz en los trópicos: Mejoramiento y producción. Dirección de producción y protección vegetal de la Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación FAO (On line). <<http://www.fao.org/3/X7650S/x7650s00.htm>>. (10 junio 2019).
- Pearson, C. y Hall, A. 1984. Maize and pearl millet. Control of Crop Productivity: 141-158.
- Pinochet, D.; Artacho, P. y Maraboli, A. 2014. Manual de fertilización de arándanos cultivados en el sur de Chile. Imprenta América. Valdivia, Chile. 71 p.
- Plénet, D. y Lemaire, G. 2000. Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. Determination of critical N concentration. Plant and Soil 216: 65-82.
- Prasad, A.; Chai, L.; Singh, R. y Kafatos, M. 2006. Crop yield estimation model for Iowa using remote sensing and surface parameters. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 8: 26-33.
- Randall, G.W. y Goss, M.J. 2008. Chapter 6. Nitrate Losses to Surface Water Through Subsurface, Tile Drainage. Nitrogen in the Environment: Sources, Problems, and Management. J.L. Hatfield and R.F. Follett (Eds): 145-175.
- Ritchie, S.; y Hanway, J. 1982. How a Corn Plant Develops. Special Report N° 48. Iowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service. 17 p.
- Rodriguez, J.; Pinochet, D. y Matus, F. 2001. Fertilización de los cultivos. Primera edición. LOM Ediciones. Santiago, Chile. 171 p.
- Rouse J.; Haas R.; Schell J. y Deering, D. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Remote Sensing Center, Texas A&M University, College Station, Texas (On line). <<https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=197400226142019-07-3T05:39:07+00:00Z>>. (15 abril 2019).
- Sadras, V.; Lemaire, G.; Gastal, F. y Kunrath, T. 2018. Water use efficiency in perennial forage species: Interactions between nitrogen nutrition and water deficit. Field Crops Research 222: 1-11.

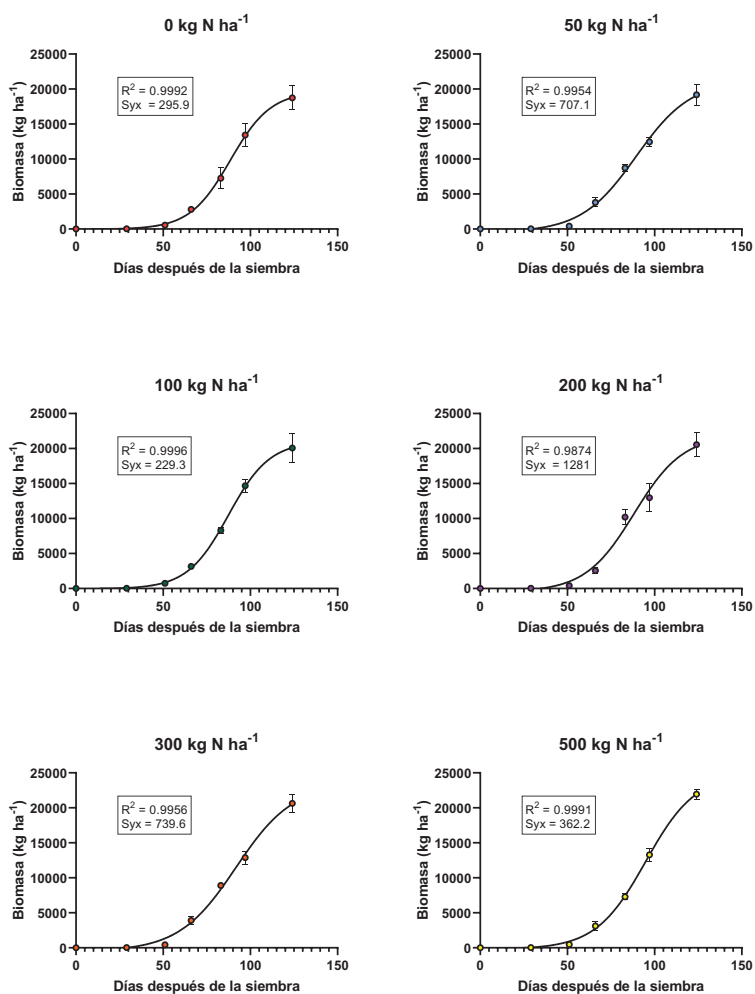
- Stanley, B. 2008. Tecnologías aplicables en Agricultura de Precisión. Uso de tecnología de precisión en evaluación, diagnóstico y solución de problemas productivos. Fundación para la innovación Agraria (FIA). Plataforma silvoagropecuaria. Serie FIA 03. 98 p.
- Tagarakis, A. y Ketterings, Q. 2017. In-Season Estimation of Corn Yield Potential Using Proximal Sensing. *Agronomy Journal* 109 (4): 1323-1330.
- Tagarakis, A. y Ketterings, Q. 2017. Proximal senso-based algorithm for variable rate nitrogen application in maize in northeast U.S.A. *Computers and Electronics in Agriculture* 145: 373-378.

6 ANEXOS

ANEXO 1. Análisis de N mineral (ppm) del suelo post-cosecha para cada parcela.

Bloque		Parcelas con dosis de N (kg ha ⁻¹)					
		0	50	100	200	300	500
1	N min	19.6	10.5	14.0	9.8	14.7	15.4
2	(ppm)	13.3	7.7	11.2	5.6	15.4	8.4
3		10.5	20.3	9.1	13.3	11.9	14.0

ANEXO 2. Biomasa aérea en función de los días después de la siembra para 6 diferentes dosis de nitrógeno. Se presentan los valores de biomasa con su desviación estándar. Se retiraron los datos de biomasa cuando el coeficiente de variación fue mayor al 20%, dejando 2 repeticiones en esos casos.



ANEXO 3. Andeva simple del Top de la MS de las diferentes dosis con su error estándar según la ecuación sigmoidea de Boltzmann y comparación múltiple del test de Tukey al 5%. Los valores de biomasa con un coeficiente de variación menor al 20% fueron eliminados, con un total de 97 datos analizados.

Test de Tukey comparación múltiple	p-valor	Significancia
0 kg N ha ⁻¹ vs. 50 kg N ha ⁻¹	0.9429	n.s.
0 kg N ha ⁻¹ vs. 100 kg N ha ⁻¹	0.9512	n.s.
0 kg N ha ⁻¹ vs. 200 kg N ha ⁻¹	0.6768	n.s.
0 kg N ha ⁻¹ vs. 300 kg N ha ⁻¹	0.2623	n.s.
0 kg N ha ⁻¹ vs. 500 kg N ha ⁻¹	0.0176	*
50 kg N ha ⁻¹ vs. 100 kg N ha ⁻¹	>0.9999	n.s.
50 kg N ha ⁻¹ vs. 200 kg N ha ⁻¹	0.9932	n.s.
50 kg N ha ⁻¹ vs. 300 kg N ha ⁻¹	0.8079	n.s.
50 kg N ha ⁻¹ vs. 500 kg N ha ⁻¹	0.1949	n.s.
100 kg N ha ⁻¹ vs. 200 kg N ha ⁻¹	0.9911	n.s.
100 kg N ha ⁻¹ vs. 300 kg N ha ⁻¹	0.7904	n.s.
100 kg N ha ⁻¹ vs. 500 kg N ha ⁻¹	0.1819	n.s.
200 kg N ha ⁻¹ vs. 300 kg N ha ⁻¹	0.9812	n.s.
200 kg N ha ⁻¹ vs. 500 kg N ha ⁻¹	0.5004	n.s.
300 kg N ha ⁻¹ vs. 500 kg N ha ⁻¹	0.9128	n.s.

ANEXO 4. Andeva multifactorial de la biomasa en MS en los distintos estados fenológicos, con los factores dosis N y bloque (90 datos analizados).

Estado fenológico	Dosis p-valor	Significancia	Bloque p-valor	Significancia
V4	0.9767	n.s	0.2415	n.s.
V6	0.0894	n.s	0.0462	*
V8	0.3286	n.s	0.2080	n.s.
VT	0.8693	n.s	0.8420	n.s.
R1	0.2621	n.s	0.0701	n.s.

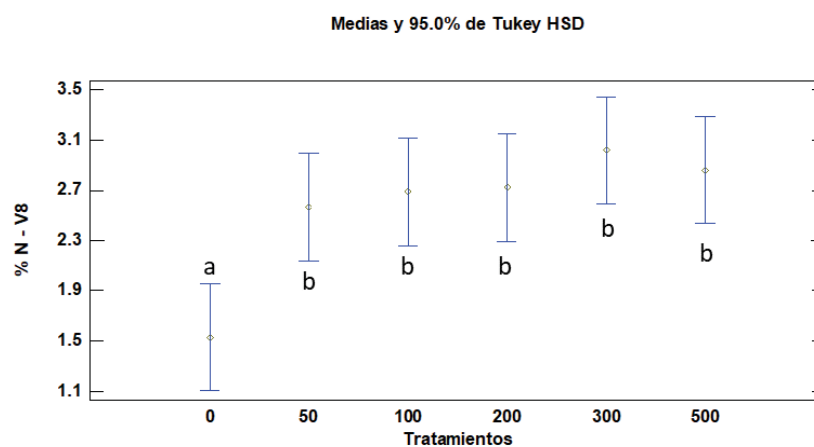
ANEXO 5. Andeva multifactorial del N de la planta en los distintos tratamientos con los factores bloque y estado fenológico (108 datos analizados).

Dosis (kg N ha ⁻¹)	Estadio p-valor	Significancia	Bloque p-valor	Significancia
0	0.0025	**	0.5362	n.s.
50	0.0019	**	0.1306	n.s.
100	0.0020	**	0.3389	n.s.
200	0.0012	**	0.1458	n.s.
300	0.0009	**	0.1920	n.s.
500	0.0000	**	0.8914	n.s.

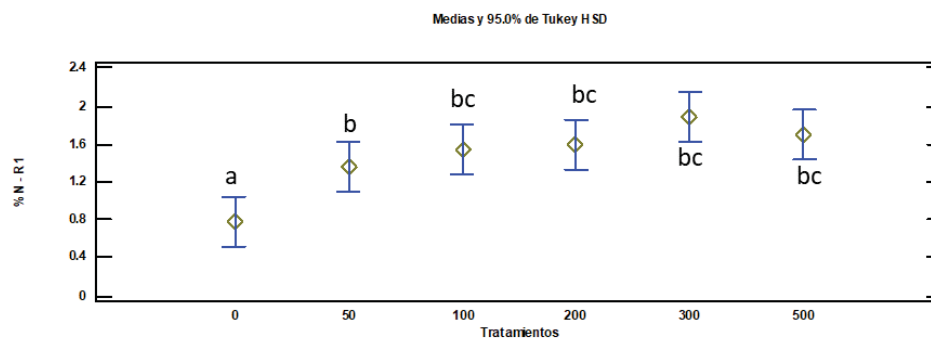
ANEXO 6. Andeva multifactorial del N de la planta en los diferentes estados fenológicos con los factores bloque y dosis de N (108 datos analizados).

Estadio	Dosis p-valor	Significancia	Bloque p-valor	Significancia
V4	0.5476	n.s.	0.2389	n.s.
V6	0.5186	n.s.	0.7293	n.s.
V8	0.0017	**	0.3936	n.s.
VT	0.2002	n.s.	0.6690	n.s.
R1	0.0005	**	0.3789	n.s.
R4	0.1184	n.s.	0.9317	n.s.

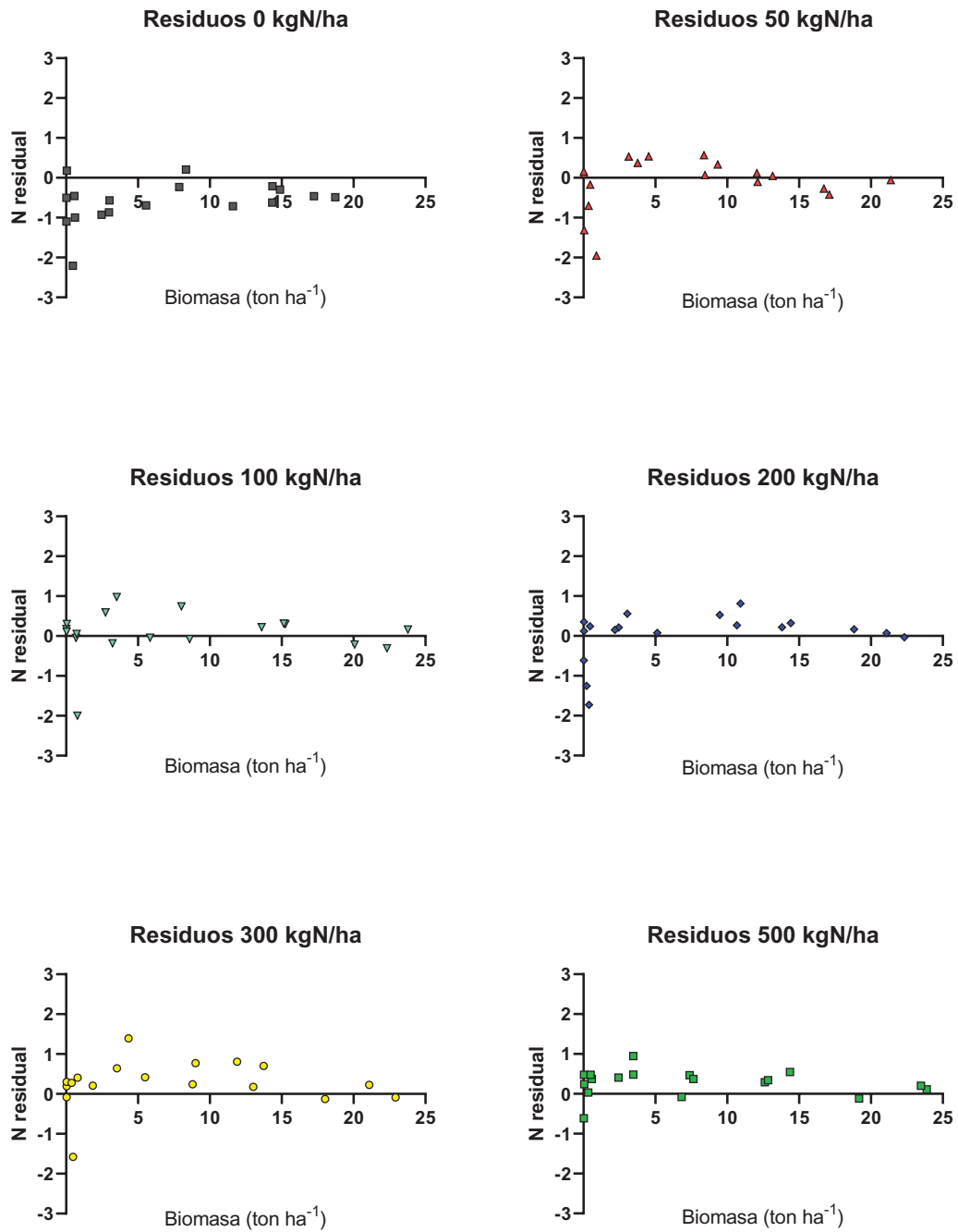
Test de Tukey de dosis en V8:



Test de Tukey de dosis en R1:



ANEXO 7. Análisis residual de N obtenido con el N crítico de la ecuación de Plénet y Lemaire (2000).



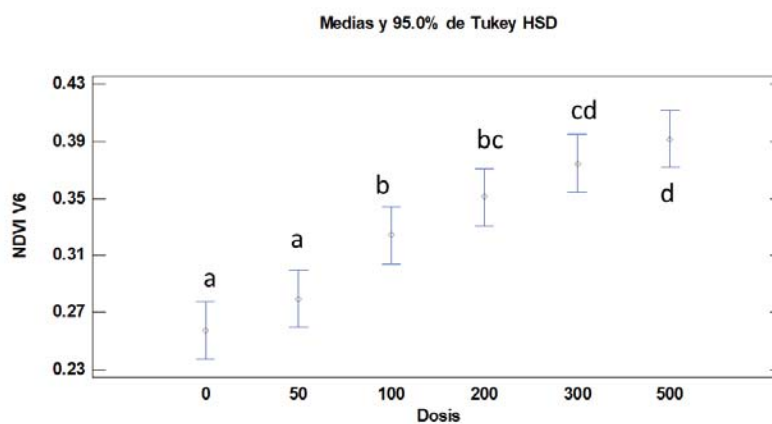
Valores extraídos del Análisis residual de N crítico de la ecuación de Plénet y Lemaire:

Análisis Residual	Dosis de N (kg ha ⁻¹)					
	0	50	100	200	300	500
n	18	18	18	18	18	18
Suma total	-10.974	-2.165	1.076	0.466	4.880	4.961
Promedio	-0.610	-0.120	0.060	0.026	0.271	0.276
Desviación Estándar	0.536	0.654	0.612	0.627	0.595	0.334

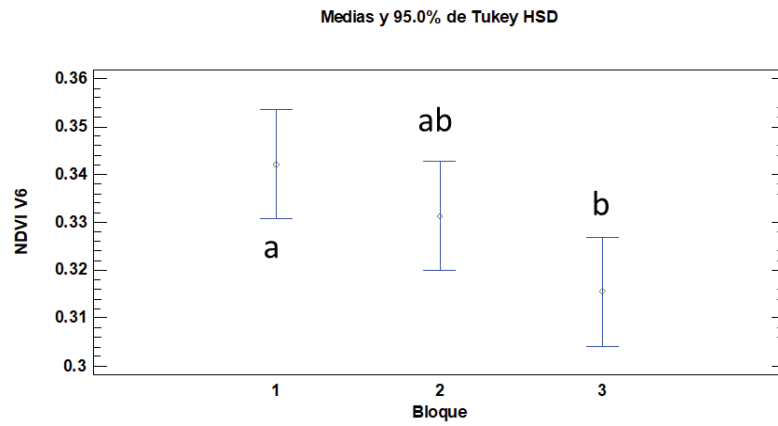
ANEXO 8. Andeva multifactorial para NDVI en V6, VT y R1 con los factores dosis, bloque (54 datos analizados).

NDVI	Dosis p-valor	Significancia	Bloque p-valor	Significancia
V6	0.0000	**	0.0274	*
VT	0.9482	n.s.	0.0118	*
R1	0.0000	**	0.7531	n.s.

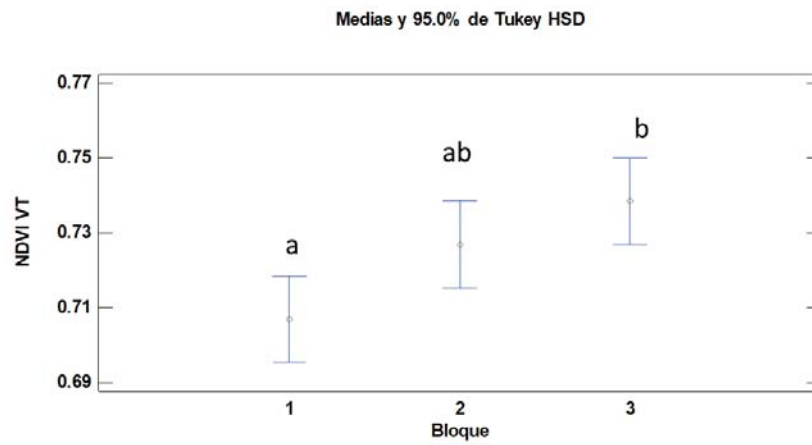
Test de Tukey de dosis en V6:



Test de Tukey de bloques en V6:



Test de Tukey de bloques en VT:



Test de Tukey de dosis en R1:

