

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

EVALUACIÓN DEL USO DE SENSORES REMOTOS PARA PREDECIR EL
POTENCIAL DE RENDIMIENTO Y LA RESPUESTA A LA
REFERTILIZACIÓN NITROGENADA DE MAÍZ

por

Carlos Javier BADIN VIDAL
Juan José BONOMO FRANCO
Lucas SOSA BAROLÍN

TESIS presentada como uno de
los requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo.

MONTEVIDEO
URUGUAY
2017

Tesis aprobada por:

Director:

Ing. Agr. (MSc., PhD.) Andrés G. Berger

Ing. Agr. (PhD.) Mario Pérez Bidegain

Ing. Agr. (PhD.) Mónica M. Barbazán

Fecha:

18 de septiembre de 2017

Autores:

Carlos Javier Badin Vidal

Juan José Bonomo Franco

Lucas Sosa Barolín

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestro tutor Andrés Berger, por su aporte y acompañamiento para la realización de este trabajo.

A Federico Rodríguez y Ximena Morales así como a todo el equipo de INIA por su disposición para brindarnos su ayuda con todas las actividades realizadas.

A los productores, Juan Pablo Zanoni, Julio Gottero y ADP, como también a sus respectivos asesores por su predisposición en el aporte de sus campos e información para la realización de este trabajo.

A su vez, a nuestras familias y amigos por su incondicional apoyo en el cumplimiento de esta etapa tan importante.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1 NITRÓGENO Y SU ROL EN LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ.....	3
2.1.1 <u>Aspectos generales</u>	3
2.1.2 <u>Necesidades y dinámica del nutriente en el cultivo</u>	3
2.1.3 <u>Manejo de la fertilización nitrogenada y su evaluación</u>	5
2.2 SENSORAMIENTO REMOTO.....	9
2.3 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).....	10
2.4 HIPÓTESIS.....	15
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	17
3.1 UBICACIÓN DEL EXPERIMENTO.....	17
3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS SITIOS EXPERIMENTALES.....	17
3.3 DISEÑO EXPERIMENTAL.....	19
3.3.1 <u>Análisis estadístico</u>	20
3.4 FERTILIZACIÓN N.....	21
3.5 COSECHA.....	22
3.6 MEDIDAS REALIZADAS.....	22
3.6.1 <u>NDVI</u>	22
3.6.2 <u>Índice de área foliar</u>	23
3.6.3 <u>Peso de plantas</u>	23
3.6.4 <u>Nitrógeno en planta</u>	23
3.6.4.1 Nitrógeno total.....	23
3.6.4.2 Prueba de deficiencia base de tallo.....	24
3.7 CARACTERIZACIÓN AGROCLIMÁTICA.....	24
3.7.1 <u>Sitios de Colonia</u>	24

3.7.2 <u>Sitios de Soriano</u>	25
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	27
4.1 EVALUACIÓN DE NDVI A V10 CON CROP SENSOR Y LANDSAT 8.....	27
4.1.1 <u>Análisis relación NDVI Landsat 8 y monitor de rendimiento</u>	31
4.2 CARACTERÍSTICAS DE PLANTA EN RELACIÓN A NDVI MEDIDOS EN LOS SITIOS EXPERIMENTALES	33
4.2.1 <u>Análisis de la relación entre NDVI y la absorción de N a V10</u>	35
4.2.2 <u>Evaluación del estado nutricional a través de la medida de base del tallo</u>	36
4.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	37
4.3.1 <u>Análisis general</u>	37
4.3.2 <u>Análisis por chacra</u>	39
4.3.3 <u>Análisis de regresión lineal (NDVI-rendimiento)</u>	46
4.3.4 <u>Análisis de la relación NDVI Landsat 8 y rendimiento con ambientes predefinidos</u>	49
5. <u>CONCLUSIONES</u>	52
6. <u>RESUMEN</u>	53
7. <u>SUMMARY</u>	54
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	55
9. <u>ANEXOS</u>	60

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Ejemplos de principios científicos y prácticas asociadas al manejo de nutrientes en el cultivo de maíz.....	5
2. Categorías para la evaluación de concentración de N-NO ₃ en base de tallo (ppm).....	8
3. Manejo del cultivo por chacra.....	18
4. Dosis de N aplicada en las chacras y parcelas.....	19
5. Análisis estadístico general.....	37
6. ANAVA para la variable rendimiento en grano del sitio Curupí.....	39
7. ANAVA para la variable rendimiento en grano del sitio Gottero.....	40
8. ANAVA para la variable rendimiento en grano del sitio San Fernando.....	40
9. ANAVA para la variable rendimiento en grano del sitio Zanoni.....	41
10. Regresión lineal para la variable rendimiento en grano.....	46
11. Regresión lineal para la variable rendimiento en grano.....	47
12. Comparación de medias de rendimiento (kg/ha) según test de Tukey.....	50
13. Comparación de medias de rendimiento (kg/ha) según test de Tukey.....	50
14. Comparación de medias de NDVI según test de Tukey.....	51
15. Comparación de medias de NDVI según test de Tukey.....	51

Figura No.

1. Acumulación de materia seca por encima del suelo y absorción de N para un rendimiento de 13 ton/ha de grano	4
2. Relación entre concentración de N en la base del tallo y rendimiento relativo en maíz.....	7
3. Espectros de absorción de hojas de maíz con distintos contenidos de clorofila por unidad de superficie	11
4. Relación entre NDVI y rendimiento de medidas realizadas en V8 por 4 años y 17 ubicaciones.	12
5. Relación entre IAF y NDVI para soja y maíz.....	13
6. Sensibilidad de distintos índices a cambios en el IAF verde de maíz y soja.	14
7. Efecto de la simulación de una atmósfera continental templada sin nubes y dos cargas contrastantes de aerosol sobre NDVI	15
8. Respuesta teórica del rendimiento al agregado de N según NDVI.	16
9. Fertilización de parcelas.	21
10. Temperatura media y amplitud térmica.....	24
11. Precipitaciones serie histórica 1965-2011, mensuales y del año de ejercicio, Colonia	25
12. Precipitaciones serie histórica 1965-2011, mensuales y del año de ejercicio, Dolores.	26
13. Mapa NDVI de San Fernando en V10.	27
14. Mapa de NDVI Gottero en V10.	28
15. Mapa NDVI de Curupí en V10.	28
16. Mapa NDVI de Zanoni en V10.	29
17. Histogramas de NDVI según Landsat 8 para cada sitio.....	30
18. Relación entre NDVI Crop Sensor y NDVI Landsat 8.	31

19. Rendimiento (monitor de cosecha) en función del NDVI observado (L8) para el sitio San Fernando.....	32
20. Rendimiento (monitor de cosecha) en función del NDVI observado (L8) para el sitio Gottero.....	32
21. Rendimiento (monitor de cosecha) en función del NDVI observado (L8) para el sitio Curupí.....	33
22. NDVI medido con Crop Sensor en relación peso de plantas en V10 para todos los sitios.....	34
23. NDVI medido con Crop Sensor en función del IAF en V10 para todos los sitios.....	34
24. Nitrógeno absorbido a V10 en función del NDVI medido con Crop Sensor.....	35
25. Concentración de N-NO3 en la base del tallo (ppm) por tratamiento y chacra.....	36
26. Rendimientos absolutos de los tratamientos testigos y fertilizados.....	42
27. Rendimientos de tratamientos fertilizados y testigos estimados en base a los observados para cada sitio..	44
28. Rendimientos relativos testigos y fertilizados.....	45
29. Rendimiento según NDVI (CU).....	48
30. Rendimiento según NDVI (GO).....	48
31. Rendimiento según NDVI (SF).....	49
32. Rendimiento según NDVI (ZA).....	49

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se producen unas 1006 millones de toneladas de maíz, de las cuales sólo se intercambian (exportan) 140 millones de toneladas (14% del total, AMIS, 2017), participando nuestro país con un mínimo porcentaje.

En Uruguay el cultivo de maíz ocupa aproximadamente 83 mil hectáreas, produciéndose 487 mil toneladas totales, lo cual determina un rendimiento promedio de 5867 kg/ha (MGAP. DIEA, 2016). Debido a la consecuente implementación de los planes de uso y manejo de suelos, se espera que dicha área se incremente para lograr sostener las rotaciones agrícolas.

La alta variabilidad interanual en el rendimiento en grano de maíz (MGAP. DIEA, 2016), se puede asociar a las condiciones climáticas de cada año en particular.

Frente a un escenario de total dependencia exterior en materia de precios, con su variabilidad inherente asociada a los niveles productivos de los grandes exportadores, alta variabilidad interanual en lo que respecta a las precipitaciones y aumento de los costos productivos, la búsqueda de un incremento en la eficiencia de uso de los distintos insumos en consecuentes aumentos de rendimientos, es clave para subsistir a nivel productivo.

Frente a coyunturas apremiantes en rentabilidad de las distintas opciones productivas, se hace necesario intensificar la producción y lograr un mayor rédito por unidad de superficie.

Tomando en cuenta lo anterior se planteó este trabajo exploratorio, buscando incorporar a la realidad productiva alguna de las herramientas disponibles para evaluar la respuesta a la refertilización nitrogenada y validarlas en nuestras condiciones.

1.1 OBJETIVOS

1-Evaluar la capacidad del sensoramiento remoto (sensores activos) de estimar la existencia de respuesta a refertilización nitrogenada

2-Evaluar la capacidad del sensoramiento remoto (sensores activos e imágenes Landsat) de estimar el potencial de rendimiento

3-Realizar una evaluación exploratoria de los cambios en la respuesta a la refertilización nitrogenada según ambientes de producción predefinidos

4-Evaluar en forma exploratoria el nivel de coincidencia entre los ambientes de producción predefinidos y el estado del cultivo observado mediante sensoramiento remoto, y su relación con el nivel de respuesta en rendimiento a la refertilización del cultivo.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 NITRÓGENO Y SU ROL EN LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ

2.1.1 Aspectos generales

Entre los elementos minerales esenciales, el nitrógeno (N) es el que con más frecuencia limita el crecimiento y el rendimiento del maíz. Esta condición ocurre porque las plantas requieren cantidades relativamente grandes de N (de 1,5 a 3,5% de peso seco de la planta) y porque la mayoría de los suelos no tienen suficiente N en forma disponible para mantener los niveles deseados de producción (Below, 2002).

Según Melgar y Torres (2016), el requerimiento de N por cada tonelada de grano producida está alrededor de 20 a 25 kg/ha, lo que resalta el hecho de que para la obtención de altos rendimientos en grano hacen falta considerables cantidades de N, pero también conocer la manera de aplicarlas y la estrategia más eficiente posible.

Según Perdomo y Barbazán (2000); el N proveniente de la fijación simbiótica entre especies de leguminosas y bacterias fijadoras de N es particularmente importante en la producción agropecuaria de nuestro país, cuando se realizan rotaciones de cultivos con praderas mezclas de leguminosas y gramíneas, las cuales generalmente permanecen en producción por tres o cuatro años. En la actualidad, sin embargo, se ha registrado una reducción del área de rotación de la agricultura con pasturas (MGAP. DIEA, 2016).

Lo que reafirma la necesidad en la coyuntura actual de una mayor utilización de fertilización nitrogenada.

Los productores de maíz reconocen que son necesarias concentraciones adecuadas de N en la planta para obtener altos rendimientos; sin embargo, el dilema está en conocer qué cantidades aplicar para lograr estas concentraciones (Below, 2002).

2.1.2 Necesidades y dinámica del nutriente en el cultivo

Los fertilizantes deben ser aplicados en los niveles requeridos para el mejor crecimiento posible del cultivo en vista de las consideraciones agroclimáticas y requerimientos del cultivo (Niaz et al., 2015).

La figura 1 muestra que para la obtención de altos rendimientos, el cultivo debería absorber unos 310 kg/ha de N.

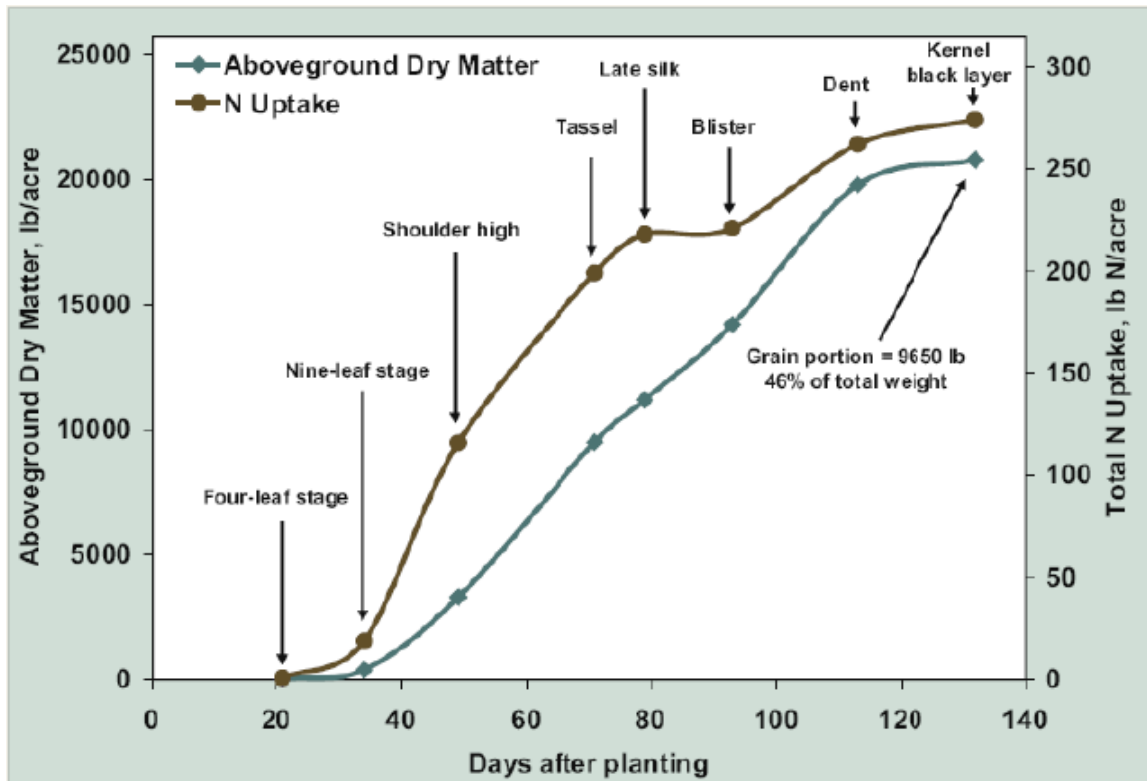


Figura 1. Acumulación de materia seca por encima del suelo y absorción de N para un rendimiento de 13 ton/ha de grano (Fuente: Mengel, 1995).

La figura anterior también resalta la evolución de la absorción del N por parte del maíz y cómo difiere en las distintas etapas del cultivo. Según Oyarzun (2010) la absorción de N por la planta de maíz se realiza de forma muy variable según las diferentes fases del desarrollo en la que se encuentre. En los primeros momentos, tras la germinación, la absorción de N es muy lenta y relativamente pequeña.

A partir de la emergencia y hasta un mes aproximadamente antes de la floración, el consumo de N no es muy importante (15% del total) y se hace de forma gradual. A partir de este momento y hasta la floración (alargamiento de las sedas) el consumo de nitrógeno crece de manera importante y en poco más de un mes, se consume del orden del 45% del N total que necesita la planta. El 35% restante se consume de forma gradual hasta que se completa la madurez del grano. En esta última fase existe una importante removilización de N desde las hojas y tallo hacia la mazorca y el grano, alcanzándose en ellos la máxima concentración de N (Oyarzun, 2010).

Se estima que el maíz utiliza el 75% aproximadamente del total del N absorbido desde el suelo en la formación de sus órganos reproductores. Si en

el periodo comprendido entre una a tres semanas antes de la aparición de los estilos y una a dos semanas después de dicho periodo la planta sufre carencia de N, la producción de grano se verá perjudicada de forma grave e irreversible (Oyarzun, 2010).

2.1.3 Manejo de la fertilización nitrogenada y su evaluación

En el cuadro 1 se presentan los conceptos y prácticas a tener en cuenta para realizar el manejo de cualquier nutriente al momento de fertilizar un cultivo.

Cuadro 1. Ejemplos de principios científicos y prácticas asociadas al manejo de nutrientes en el cultivo de maíz.

Maíz	Los cuatro requisitos (4R)			
	Fuente	Dosis	Momento	Forma
Principios científicos	-Evaluar costo y oferta de nutrientes -Adaptarse a las propiedades del suelo -Evaluar riesgos de pérdidas	-Evaluar la oferta de nutrientes del suelo -Evaluar la demanda del cultivo	-Evaluar las dinámicas de absorción del cultivo y de abastecimiento del suelo -Determinar momentos de riesgo de pérdidas	-Reconocer los patrones de distribución de raíces -Evaluar la variabilidad espacial
Elección de prácticas	-Fertilizantes sólidos o líquidos, mezclas o compuestos -Productos protectores -Abonos	-Análisis del suelo -Realizar cálculos económicos -Balancear la remoción del cultivo	-Previo a la siembra -A la siembra -En V4-6 -Aplicaciones divididas	-Al voleo -Incorporado -En bandas -Chorreado, inyectado -Foliar -Con la semilla -Dosis variable

Fuente: García y Correndo (2014)

En nuestro país, una de las herramientas más utilizadas para determinar las cantidades de N a fertilizar, es evaluar el contenido de nitratos en suelo.

Para esto, se han establecido niveles críticos en distintos momentos de aplicación de N, como por ejemplo, 25 ppm de N-NO₃ en la siembra y 16-20 ppm de N-NO₃ en V6 (Quincke et al., 2008) a la profundidad de 0-20 cm.

La estrategia de fraccionar las dosis y generar indicadores en distintos estadios apunta a aumentar la eficiencia en la utilización del fertilizante, aplicándolos cuando el cultivo expresa la demanda del nutriente, para así sincronizar la oferta con la demanda y evitar las pérdidas hacia el ambiente.

Se ha observado que, dosis totales de 250 kg/ha de N determinan aumentos de rendimiento, más allá del estatus hídrico del cultivo (Haghjoo et al., 2013). A su vez, Cazaban y Rubio (2014) determinaron dosis óptimas físicas de entre 89,7 y 142,6 kg/ha de N, variando la respuesta según el sitio.

La aplicación repartida (1/2 y 1/2) de la dosis total de N en dos momentos del cultivo (siembra y V6), resultó siempre superior a la fertilización en la siembra, como único momento, utilizando una dosis de 120 kg/ha de N sin importar la fuente (Kaleem et al., 2013). Estos autores utilizaron cantidades inferiores a las registradas por otros, por lo cual surge la inquietud de si utilizando mayores cantidades se mantiene dicha respuesta.

En otros trabajos al evaluar distintas estrategias para el manejo de la fertilización nitrogenada, la mejor alternativa sería la aplicación repartida del N, en distintas etapas del cultivo. El tratamiento que resultó con los mayores rendimientos, distribuía el N en tres etapas; a la siembra (60% N, aplicado al voleo), a mitad de ciclo (39% N, aplicado con fertirriego) y a floración (1% N, aplicado en forma foliar). La fuente de N utilizada en este trabajo, realizado en Pakistán, fue urea y la dosis total de N fue de 250 kg/ha (Iqbal et al., 2014).

Otra experiencia de aplicación de N es la planteada por Niaz et al. (2015, Pakistán), donde se compararon distintas estrategias: 100% del N previo a siembra (S1), 75% N previo a siembra + 25% N en V9 (S2), 50% N previo a la siembra + 50% N en V9 (S3), 25% N previo a siembra + 75% N en V9 (S4) y 100% N en V9 (S5). Dichos tratamientos fueron evaluados con cuatro dosis de N (N1=125, N2=150, N3=175 y N4=200 kg/ha). La combinación que determinó el mayor rendimiento (7,49 t/ha) fue, 200 kg N/ha con la repartición de 50/50, aunque, estadísticamente no difirió de N4-S4 y N3-S4. Se entiende que estas diferencias no significativas entre tratamientos pueden deberse a las características de suelo, franco arenoso arcilloso con un contenido de materia orgánica de 0.61% y un N total de 0.02%.

Se debe remarcar que, la respuesta del maíz a la adición de N es afectada por factores ambientales, culturales y de suelo. En un suelo fértil con alto contenido de N, la aplicación de fertilizantes nitrogenados puede tener baja respuesta o aún puede reducir los rendimientos. Existen también otros factores

aparte del N, como la falta de humedad en el suelo o la deficiencia de otros nutrientes, que pueden limitar la respuesta a las aplicaciones de N y no aumentan el crecimiento o el rendimiento aun cuando el contenido de N en el suelo sea bajo (Below, 2002).

Por ejemplo, se han encontrado resultados (Abraham y Falco, 2012) de que, habiendo condiciones hídricas favorables para el crecimiento del cultivo, no habrá diferencias significativas entre las distintas estrategias de fertilización practicadas, con aplicaciones en diferentes momentos. Sin embargo, estos autores resaltan el estado hídrico como un aspecto para tener en cuenta al definir si diferir o no la fertilización nitrogenada, para evitar pérdidas por lixiviación.

Así como saber cuánto y cómo aplicar el nutriente, es necesario saber cómo diagnosticar si realmente existieron deficiencias o si algún otro aspecto limitó el rendimiento y la respuesta a la aplicación. Para la evaluación de la fertilización nitrogenada, un indicador ampliamente utilizado es la medición de la concentración de N en la base del tallo. En la figura 2 se puede apreciar la relación entre la concentración de N-NO₃ en la base del tallo y el rendimiento relativo de maíz según Blackmer y Mallarino (1996).

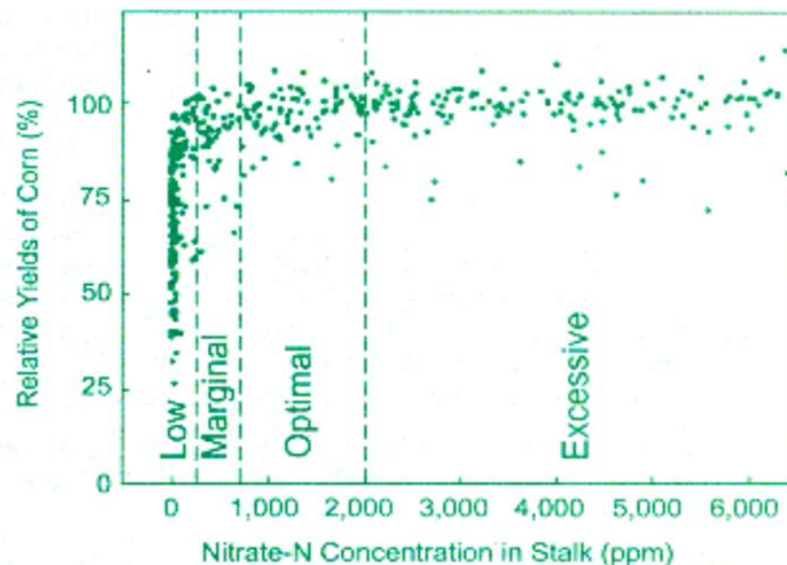


Figura 2. Relación entre concentración de N en la base del tallo y rendimiento relativo en maíz (Fuente: Blackmer y Mallarino, 1996).

Se ha comprobado que al momento de llenado de grano si el cultivo sufre deficiencias de N, removiliza el mismo desde las partes inferiores del tallo hacia

los granos, así como si hay suficiencia de N para la obtención de altos rendimientos, se acumula en dicha zona.

Los autores a su vez proponen valores de referencia para caracterizar el estado nutritivo del cultivo con esta medida. En el cuadro 2 se presentan dichos valores.

Cuadro 2. Categorías para la evaluación de concentración de N-NO₃ en base de tallo (ppm).

Deficiente	Bajo	Medio	Alto-excesivo
<250	250-700	700-2000	>2000

Fuente: Blackmer y Mallarino (1996)

Considerando las prácticas actuales de manejo de N, se ha observado que existe una alta ineficiencia en la utilización de N por los cultivos, ya que las estrategias no atienden a la variabilidad que existe entre sitios y dentro de los sitios (Scharf et al., 2011).

Según Yule y Pullanagari (2009), las razones de una baja eficiencia en el uso del N en las prácticas comúnmente utilizadas a nivel productivo, se puede explicar por los siguientes factores:

- 1) Baja sincronización entre las prácticas de manejo del N en suelo y la demanda del cultivo.
- 2) Aplicación uniforme de N en un paisaje variable que produce requerimientos de N diferenciales.
- 3) Fallas al aplicar el fertilizante determinando que no se alcancen los objetivos de la aplicación, resultando en un sub-óptimo uso del fertilizante.
- 4) No tomar en cuenta las variabilidades ambientales “dentro y fuera de temporada” que afectan la disponibilidad de N en el suelo y la demanda del cultivo.

A su vez, estos mismos autores (Yule y Pullanagari, 2009) entienden qué, para lograr una óptima aplicación de N, se deben de tener en consideración los siguientes elementos:

- 1) Un método confiable en tiempo real para la determinación del crecimiento del cultivo.
- 2) Un plan de acción para maximizar la utilización del fertilizante basado en el aspecto anterior y en el ambiente del cultivo.

- 3) Un método seguro de estimar precisamente la cantidad correcta de fertilizante a agregar en cualquier punto de la chacra.
- 4) El sistema debe de ser económicamente viable.

El N del fertilizante que no es aprovechado produce, además de perjuicio económico por pérdida de rendimiento y costos excesivos de sobre aplicación, un daño ambiental por pérdida del nutriente a capas inferiores del perfil del suelo.

Con el creciente interés de la opinión pública en la calidad ambiental aumentan también las presiones sobre los agricultores en mejorar el manejo del N (Below, 2002). A pesar de esto, en el escenario actual agrícola uruguayo, en general, las dosis utilizadas son relativamente bajas respecto a las necesidades del cultivo, por lo que las cantidades de N no utilizado por el cultivo tienden a ser bajas.

2.2 SENSORAMIENTO REMOTO

El sensoramiento remoto es la ciencia (y en alguna extensión, un arte) de adquirir información sobre la superficie de la Tierra sin entrar en contacto con ella. Esto es hecho mediante el sensoramiento y el registro de la energía reflejada o emitida y procesando, analizando y aplicando esa información (Nandibewoor et al., 2015). El empleo de sensores remotos puede ayudar a mejorar en la eficiencia del uso de N (Yule y Pullanagari, 2009).

El mayor desafío para los investigadores del sensoramiento remoto es alcanzar al máximo el potencial de esta herramienta como una fuente de información útil para la toma de decisiones agronómicas (Hatfield et al., 2008).

Los métodos para aplicar técnicas de sensoramiento remoto de parámetros agronómicos incluyen (entre otros): (i) empíricos (parámetros estáticos) correlaciones entre medidas a campo de distintos parámetros e índices de vegetación (IVs); (ii) inversión del parámetro agronómico desde modelos físicos basados en la reflectancia de la canopia y (iii) estimación usando una red neural (Hatfield et al., 2008).

En cuanto a la utilidad de esta herramienta, como cualquier otra, existen limitantes. Por un lado, los resultados sugieren que las dosis ajustadas por los sensores remotos compensan mejor las pérdidas de N debido a condiciones del clima que las dosis elegidas por los productores (Scharf et al., 2011). Pero, a su vez, los mismos autores son cautelosos al afirmar que, se encontró poca evidencia de que las dosis aplicadas según el sensoramiento remoto puedan

aumentar el rendimiento frente a aquellas utilizadas por el productor (Scharf et al., 2011).

Bragagnolo et al. (2013) hallaron que al realizar fertilizaciones variables determinadas por sensoramiento remoto, obtuvieron incrementos en las eficiencias de utilización de N del 26.3%.

Por lo tanto, hace falta determinar hasta qué extensión las herramientas que empiezan a estar disponibles, a niveles masivos en el sector, son de verdadera utilidad en la resolución de la creciente necesidad de aumentar las eficiencias en la utilización de insumos.

2.3 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

Un índice de vegetación puede definirse como derivado de la reflectancia con respecto a una longitud de onda (espectro electromagnético), el cual es indicador de la abundancia y actividad de los absorbentes en la canopia (Viñas, 2004).

Según Hatfield et al. (2008) la instrumentación y desarrollo de relaciones entre la reflectancia y respuestas en planta han expandido nuestra habilidad de cuantificar parámetros agronómicos.

Las herramientas de sensoramiento remoto se han construido en el principio que el contenido de pigmentos afecta significativamente el espectro absorbido por las hojas (Hatfield et al., 2008).

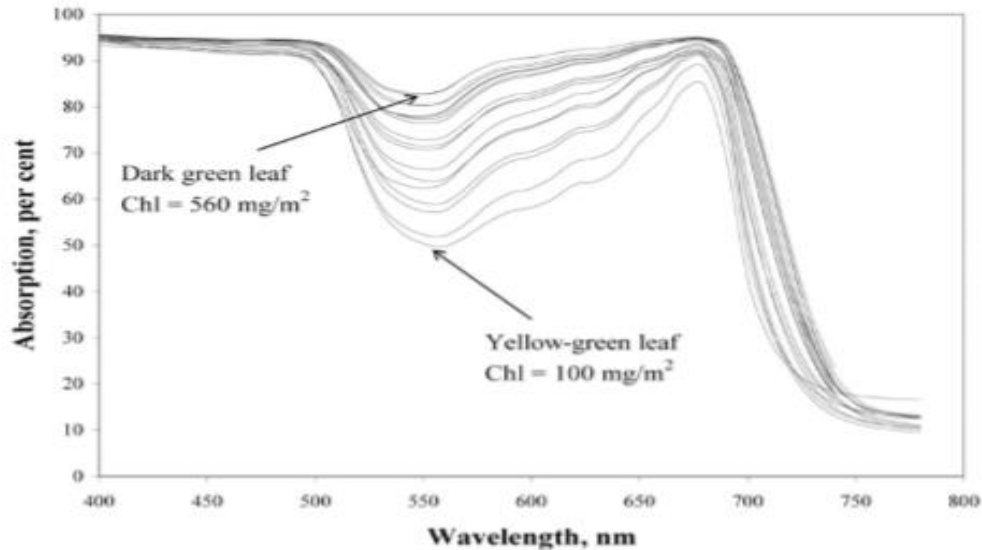
Para el caso del NDVI, el mismo se obtiene a través de la reflectancia con las longitudes de onda infrarrojo cercano (IRC, 0,85-0,88µm) y rojo (R, 0,64-0,67 µm).

$$NDVI = \frac{(IRC-R)}{(IRC+R)}$$

Las características espectrales de la canopia son afectadas principalmente por cuatro componentes: biomasa verde fotosintéticamente activa, biomasa seca, suelo y sombras (Viñas, 2004).

A su vez, la transferencia de información de la reflectancia de la hoja a la de toda la canopia no es lineal. Esto se debe a distintos aspectos que en su efecto acumulado hacen que ambas medidas se distancien. Aquellos factores que se podrían mencionar son la arquitectura de la planta, índice de área foliar (IAF), distribución angular de las hojas, condiciones de iluminación, la cantidad de radiación directa como aquella que llega difusa y los distintos ángulos de posición del sol (Hatfield et al., 2008).

La figura 3 muestra los aspectos mencionados anteriormente, así como el estado de la planta puede resultar en variaciones de la reflectancia.



*Ch1: niveles de clorofila

Figura 3. Espectros de absorción de hojas de maíz con distintos contenidos de clorofila por unidad de superficie (Fuente: Hatfield et al., 2008).

En lo que refiere a la asociación de este índice con respecto al rendimiento en grano de maíz, se halló que las medidas de NDVI lograron predecir con mayor certeza el rendimiento cuando fueron tomadas en V10-VT, con un $r^2=0.6-0.8$ (Shanahan et al., 2001). Solari et al. (2008) concluyeron que el NDVI tuvo una alta capacidad de predecir diferencias en rendimiento ($y=0.722 + 0.225x$; $r^2=0.762$) cuando se tomaron medidas del índice al cultivo en los estados V11 y V15 siendo aplicados distintos tratamientos de N. Sin embargo, con mediciones más tempranas en el ciclo, no se obtendría una buena capacidad de predicción. Por ejemplo Teal, Tubana et al. (2006) utilizando un sensor activo, encontraron una mayor correlación en V8 que en V6-V7.

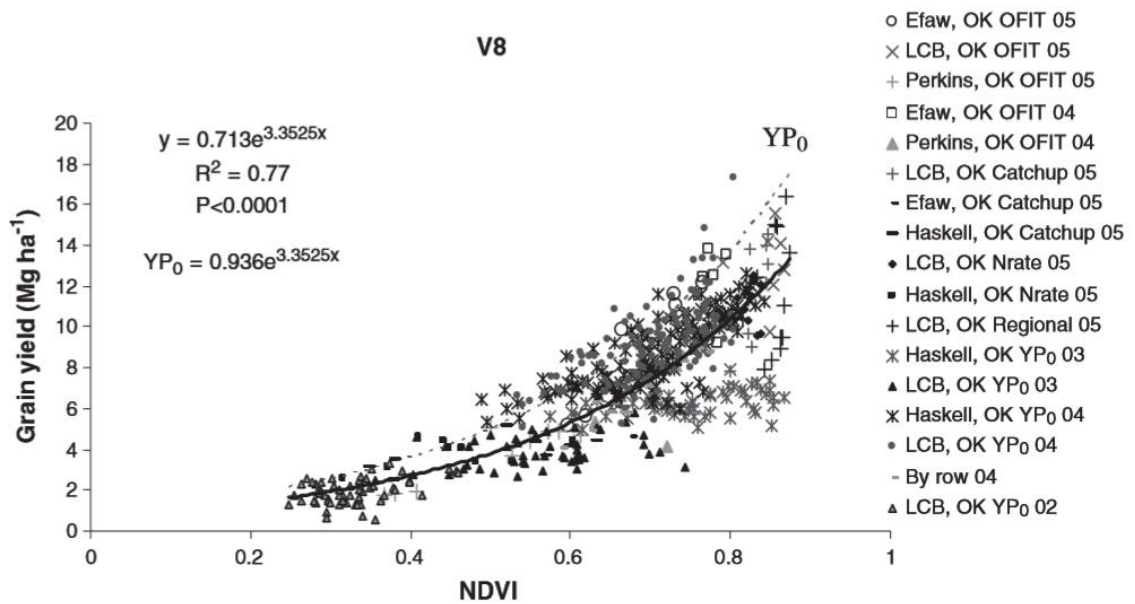
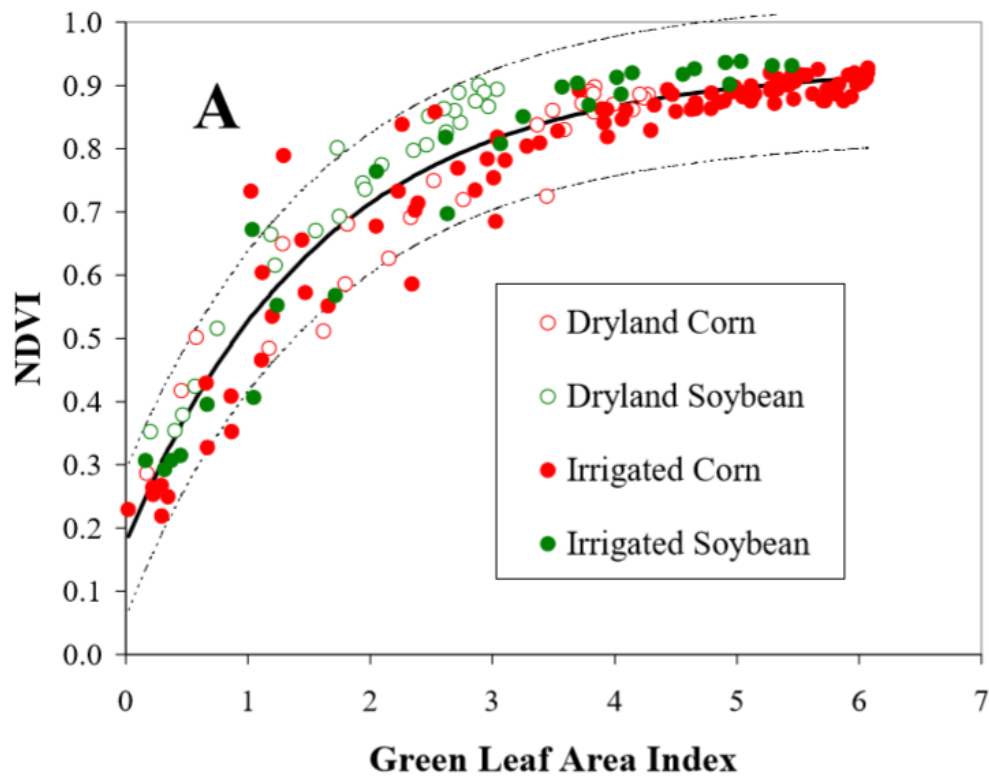


Figura 4. Relación entre NDVI y rendimiento de medidas realizadas en V8 por 4 años y 17 ubicaciones (Fuente: Teal et al., 2006).

Se destaca la alta correlación de este índice con la biomasa aérea total de cultivo (Raun et al., 2002) la que se complementa con la capacidad de predicción de rendimiento.

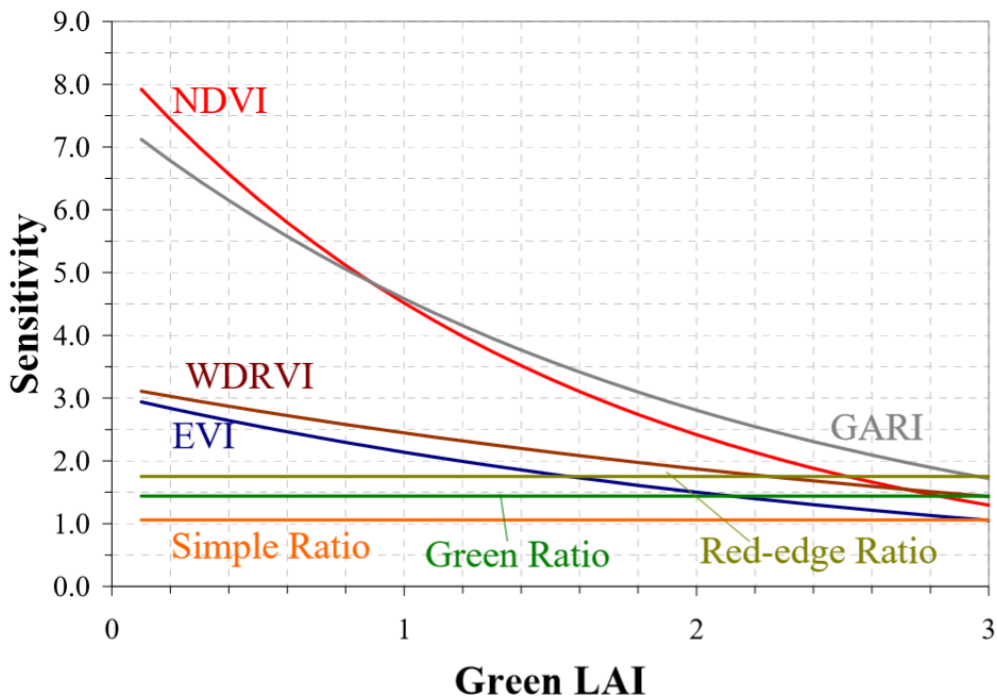
A su vez, el NDVI presenta limitaciones, una de ellas es que se satura por encima de valores de IAF de 2, dependiendo del tipo de vegetación (Viñas, 2004). El anterior aspecto determina que la medición del índice a valores superiores de IAF no es sensible a los cambios en dicha medida, por lo que pierde capacidad de decisión en base al registro.



*Líneas punteadas en la gráfica representan los intervalos de confianza al 95%

Figura 5. Relación entre IAF y NDVI para soja y maíz (Fuente: Viñas, 2004).

A pesar de la limitante resaltada anteriormente, NDVI es el mejor índice para detectar cambios en la vegetación a bajos valores (menores a 2) de IAF verde (Viñas, 2004). Para ejemplificar lo anterior la figura 6 muestra la evaluación de la sensibilidad de distintos índices de vegetación frente a los cambios en el área foliar del cultivo.



*NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), WDRVI (Wide Dynamic Range Vegetation Index), EVI (Enhanced Vegetation Index), GARI (Green Atmospherically Resistant Vegetation Index)

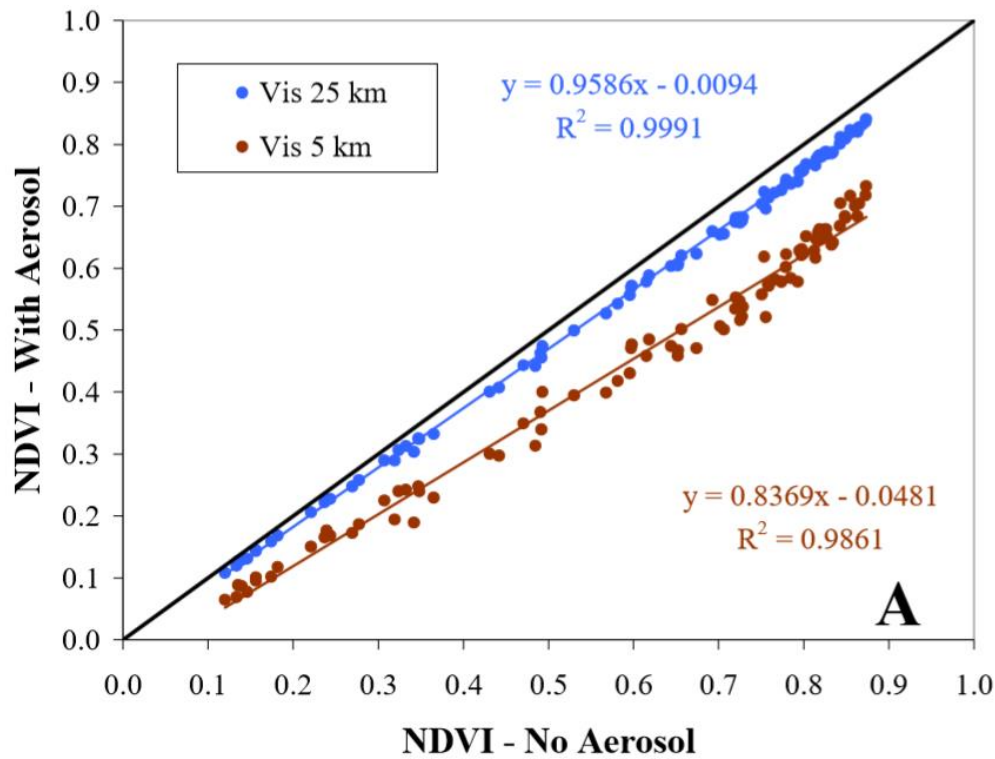
Figura 6. Sensibilidad de distintos índices a cambios en el IAF verde de maíz y soja (Fuente: Viñas, 2004).

La sensibilidad de los distintos índices se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Sensibilidad} = \frac{\delta \text{VI} / \delta X}{\text{RMSE}}$$

Donde VI- índice de vegetación, X- característica de interés, RMSE- cuadrado medio del error.

En cuanto a la confianza de la medida de este índice a nivel satelital, según Viñas (2004); el NDVI no es afectado en gran magnitud por la presencia de partículas en la atmósfera, pero sí por la presencia de nubes. Lo anterior resalta la confiabilidad que se puede tener en la medida satelital del índice en cuestión, pero también muestra una limitante donde en días nublados las imágenes no son de utilidad. Por lo mencionado, es primordial contar con sensores que permitan obtener imágenes continuamente, ya que así se puede evitar el problema de la nubosidad.



*Vis.: visibilidad

Figura 7. Efecto de la simulación de una atmósfera continental templada sin nubes y dos cargas contrastantes de aerosol sobre NDVI (Fuente: Viñas, 2004).

La línea negra representa una atmósfera sin contenido de aerosol, las dos cargas son visibilidades de 25 km y 5 km. Lo que se busca con esto es medir la robustez del índice frente a la difusión de la radiación que puede haber en la atmósfera (Viñas, 2004).

2.4 HIPÓTESIS

- 1- Al aplicar una dosis no limitante de N no se espera respuesta en zonas con NDVI alto o bajo, pero sí en zonas con NDVI intermedio. A su vez, a valores menores de NDVI no se puede alcanzar el máximo rendimiento aunque se apliquen dosis no limitantes de N. A continuación, se presenta de manera gráfica y esquemática este punto.

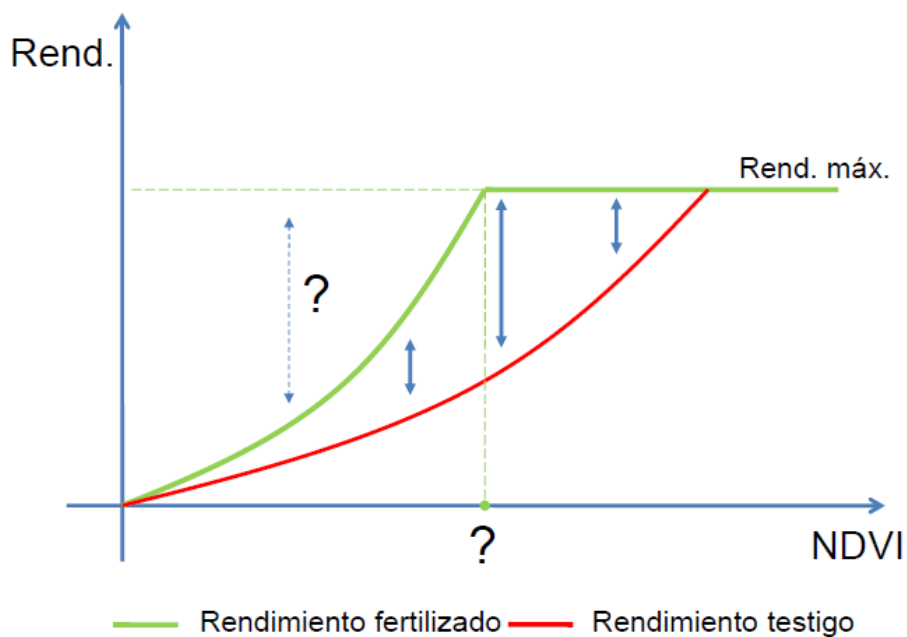


Figura 8. Respuesta teórica del rendimiento al agregado de N según NDVI.

- 2- El Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) tiene la capacidad de estimar el potencial de rendimiento del cultivo.
- 3- Existe una relación entre los niveles de NDVI medidos por Landsat 8 y Crop Sensor (sensor activo de mano).
- 4- Se espera que coincidan los ambientes predefinidos como “altos” con los niveles de NDVI superiores y así mismo con los mayores rendimientos, mientras que los ambientes “bajos” se correspondan con los valores inferiores de NDVI y por consiguiente con los menores rendimientos.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN DEL EXPERIMENTO

El trabajo experimental se realizó en cuatro predios comerciales ubicados en los departamentos de Colonia y Soriano en la zafra 2015/2016.

Los predios ubicados en Colonia, ambos en la zona de Piedras de los Indios, predio de Gottero (GO) 73 ha ($34^{\circ}23'22.97''$ S, $57^{\circ}47'0.17''$ O) y de Zanoni (ZA) 83 ha ($34^{\circ}21'54.59''$ S, $57^{\circ}48'15.18''$ O). Los restantes puntos en el departamento de Soriano, se ubican en la cercanía de Villa Soriano, Curupí (CU) 59 ha ($33^{\circ}30'44.71''$ S, $58^{\circ}19'56.79''$ O) y San Fernando (SF) 173 ha ($33^{\circ}25'51''$ S, $58^{\circ}16'21.18''$ O).

Todos los sitios son campos predominantemente agrícolas, manejados con siembra directa.

El grupo de suelos CONEAT dominante en el predio CU es 11.2, seguido por los grupos 03.51 y 03.2; estando dentro de las unidades de suelo VS-2 y Bq 4 de la carta de Colonia y Soriano 1:200.000 (MAP, 1967). Compuesto en su mayoría por Brunosoles Éutricos Típicos.

El predio SF está comprendido en los grupos 03.51 y 03.52; y la unidad de suelo VS-2 (MAP, 1967). La mayor parte del área del mismo está ocupada por Brunosoles Éutricos Lúvicos.

En el caso de GO está dentro de los grupos 11.9, 10.6a y 5.02b; así como dentro de la unidad EP-LB2 (MAP, 1967). Brunosoles Éutricos y Subéutricos Típicos son los suelos de mayor presencia.

El predio de ZA está circunscripto dentro de los grupos 11.9 y 5.02b; en cuanto a las unidades de suelo, está dentro de EP-LB2 y SGG4 (MAP, 1967). Los suelos predominantes son Brunosoles Éutricos y Subéutricos Típicos.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS SITIOS EXPERIMENTALES

En el cuadro 3 se presentan aspectos del manejo realizado en los predios.

Cuadro 3. Manejo del cultivo por chacra.

a)					
Predio	Fecha de siembra	Varieta d	Población (pl/ha)	Dist. hileras (m)	Antecesor
Gottero	4-oct.	DK 7210	66550	0,7	soja
Zanoni	3-set.	s/d	68000	0,7	soja
Curupí	15-set.	DK 692	65000	0,7	s/d
San Fernando	19-set.	DM 2738	63550	0,7	soja
b)					
Predio	Siembra	V2	V4	V6	V8
Gottero	18-46-0 (150 kg/ha)		28-0-0-5 (130 kg)	28-0-0-5 (200 kg)	
Zanoni	18-46-0 (150 kg/ha)	urea (120 kg/ha)		solmix (100 l/ha)	
Curupí	18-46-0 (100 kg/ha)		sulfamac (180 kg/ha)		sulfamac (180 kg/ha)
San Fernando	solmix 27 (100 l/ha)		solmix 27 (100 l/ha)		solmix 27 (125 l/ha)
c)					
Predio	Pre-siembra		V4		
Gottero	glifosato (3 l/ha) + 2,4 D amina (1 l/ha)		acetoclor (2 l/ha) + atrazina (1,2 l/ha) + tordón (120 cm ³ /ha) + ultramax (2 kg /ha)		
Zanoni	glifosato (3 l/ha) + 2,4 D amina (1 l/ha) + tordón (200 cc/ha) + atrazol plus (2 kg/ha)		glifosato (2 l/ha) + invicto (1,5 l/ha)		
Curupí	s/d		s/d		
San Fernando	s/d		s/d		

*a) Manejo general, b) Fertilización, c) Aplicaciones sanitarias

En el cuadro 4 se presentan las cantidades de N aplicadas en cada tratamiento, en primer lugar la dosis aplicada en cada sitio por el productor (testigo) y la dosis aplicada resultante del agregado de N en las parcelas (fertilizado).

Cuadro 4. Dosis de N aplicada en las chacras y parcelas.

Predio	N testigo (kg/ha)	N fertilizado (kg/ha)
Gottero	119	242
Zanoni	117	239
Curupí	162	285
San Fernando	116	238

Todas las chacras correspondieron a sistemas de producción agrícolas. En el caso de Zanoni había pradera antes del cultivo de soja que se plantea como antecesor en el cuadro 3. En todos los casos el maíz es de primera, presentando como antecesor a la soja.

Con respecto al manejo sanitario, no se encontraron importantes interferencias de malezas, lo cual es muy importante ya que de otra forma hubiera afectado significativamente a la lectura del NDVI y el rendimiento. Tampoco se registraron importantes daños por parte de plagas.

3.3 DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño que se implementó fue de bloques completos al azar, con una repetición por tratamiento. Los tratamientos fueron, manejo de la fertilización nitrogenada realizada por el productor (testigo) y aplicación de N no limitante en V10. En el cuadro 4 se puede observar la dosis de fertilizante utilizada en cada tratamiento.

Las parcelas instaladas en los distintos campos comerciales tenían 10 m de largo y 3,5 m de ancho lo que se corresponde con 5 entresurcos.

Las parcelas se ubicaron dentro de la chacra en sitios preseleccionados según medidas previas de NDVI (Landsat 8), corroborando en el campo que fueran zonas contrastantes en este parámetro. Se buscó que las diferencias en el parámetro estuvieran dadas solamente por diferencias en el estado del cultivo y no por otros factores que pudieran perturbar este índice (p.ej. falta de plantas). El momento de toma del índice NDVI por la herramienta mencionada fue entre los estadios V8-V10.

El número de parcelas por campo se estableció según la heterogeneidad que presentara el cultivo en la medida de NDVI para que las mismas representen la situación del cultivo. En cada punto establecido se delimitó una parcela testigo y otra fertilizada, ambas de iguales características en cuanto a NDVI.

3.3.1 Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó en dos partes. En primera instancia se analizó el conjunto de resultados para todos los sitios (análisis general) y posteriormente se analizó por separado en cada chacra. Para el caso del análisis general se procedió utilizando como variables clasificatorias los tratamientos aplicados (fertilizado y testigo) y el NDVI medido en cada punto, las chacras se tomaron como efecto aleatorio, siendo la variable de respuesta rendimiento en grano. Para el caso del análisis particionado los criterios fueron iguales salvo el efecto de chacra que no está presente.

El modelo para el análisis general sería el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \delta_i + \alpha + \tau_j + \alpha\tau_j + \varepsilon_{ij}$$

i: 1, 2, 3, 4

j: 1, 2

Dónde,

- Y_{ij} : variable de respuesta (rendimiento kg/ha)
- μ : media general
- δ_i : efecto aleatorio de la i-ésima chacra
- α : efecto de la variable NDVI
- τ_j : efecto del j-ésimo tratamiento; fertilización no limitante y testigo
- $\alpha\tau_j$: efecto de la interacción tratamiento-NDVI
- ε_{ij} : error experimental asociado a cada observación

El modelo para el análisis por chacra sería el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

i: 1, 2

j: 1, 2, 3, ...10

Dónde,

- Y_{ij} : variable de respuesta (rendimiento kg/ha)
- μ : media general
- T_i : efecto del i-ésimo tratamiento; fertilización no limitante y testigo
- β_j : efecto del j-ésimo bloque; NDVI determinado por L8
- ε_{ij} : error experimental asociado a cada observación

3.4 FERTILIZACIÓN N

Al momento de instalar las parcelas se realizó la fertilización con urea granulada (46-0-0) en una dosis de 122,6 kg N/ha adicional a las aplicaciones del productor. Esta dosis fue seleccionada para, como de N no limitante para el cultivo. En el caso de la parcela testigo, la misma recibió únicamente el aporte realizado por el productor.

La aplicación fue a mano intentando lograr una distribución homogénea.



Figura 9. Fertilización de parcelas.

3.5 COSECHA

La cosecha fue realizada a mano el 15 y 24 de febrero de 2016 en San Fernando y Curupí, y Gottero y Zanoni, respectivamente. Se cosecharon 5 metros lineales de las dos hileras del centro de la parcela.

El desgrane se realizó manualmente, con una desgranadora de espigas. La humedad y peso de granos fueron obtenidos inmediatamente luego de desgranados.

La corrección por humedad se estandarizó a 14%.

3.6 MEDIDAS REALIZADAS

3.6.1 NDVI

En este trabajo se empleó el sensoramiento remoto para lograr una asociación entre un índice de vegetación como lo es el Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) y las medidas realizadas a campo.

Este parámetro fue medido con dos sensores. En una primera instancia como se mencionó anteriormente se utilizó Landsat 8 (L8) previo a la visita al campo. Específicamente el sensor del satélite con el cual se obtienen las medidas térmicas de la superficie de la tierra, es el sensor Operational Land Imager (OLI). Este sensor entrega una imagen con píxeles de 30m x 30m, por lo que la reflectancia y los índices derivados representan un valor promedio para dicha área.

Las imágenes correspondientes a los predios de San Fernando y Curupí fueron tomas por el satélite el día 20 de noviembre 2015 (60 días post -siembra) mientras que en Gottero y Zanoni el 6 de diciembre del 2015 (60 y 90 días post-siembra respectivamente). Ambas corresponden a la columna 225 y fila 84 de la grilla de adquisición, siendo estas las más cercanas a las mediciones que se realizaron luego con el sensor activo, las cuales fueron realizadas el 24-25 de noviembre para los predios del departamento de Soriano y 10-11 de diciembre para los de Colonia.

Las medidas de NDVI obtenidas a partir de Landsat 8 se relacionaron con los mapas de rendimiento obtenidos en los distintos sitios.

A nivel de campo se utilizó el RapidSCAN CS-45 HANDHELD CROP SENSOR™ (SC), sensor activo para la medición del índice. Dicha herramienta se caracteriza por medir la reflectancia simultáneamente por tres anchos de banda, 670, 730y 780 nm. A su vez presenta la particularidad de que puede

realizar las medidas de reflectancia independientes de la altura como también independientemente de la luminosidad del ambiente.

Con el mismo se realizaron cuatro medidas por parcela estableciendo un promedio de ellas. Los registros de NDVI en este sensor representan un área de 0,1 m² cuando la medida es tomada a 1,5 m de altura.

Estas medidas fueron tomadas cuando los cultivos se encontraban entre los estadios V8-V10 (24-25 de noviembre de 2015 para los predios del departamento de Soriano y 10-11 de diciembre de 2015 para los de Colonia).

Además de analizar la relación entre el NDVI y rendimiento absoluto, se procedió a estudiar la relación de este índice con los rendimientos relativos. Estos rendimientos se calcularon utilizando el rendimiento obtenido en el máximo NDVI registrado en el campo contra el resto. Lo anterior se realizó por separado en cada chacra.

3.6.2 Índice de área foliar

Para obtener esta medida se utilizó un ceptómetro modelo Accupar LP-80 realizándose ocho medidas por parcela. La medida de este índice se llevó a cabo el 24-25 de noviembre y 10-11 de diciembre de 2015 en los predios de Soriano y Colonia respectivamente (estadios V8-V10).

3.6.3 Peso de plantas

Para obtener este parámetro al momento de instalarse las parcelas, se extrajeron dos metros lineales de plantas, los cuales corresponden a un número de plantas que oscila entre las 8 y 12. Al igual que los dos índices anteriores, el peso de plantas fue tomado cuando el cultivo se encontraba en el estadio V8-V10 (24-25 de noviembre y 10-11 de diciembre de 2015 para los predios de Soriano y Colonia respectivamente).

3.6.4 Nitrógeno en planta

3.6.4.1 Nitrógeno total

Se midió la concentración de N-NO₃ en la totalidad de la planta en V8-V10.

3.6.4.2 Prueba de deficiencia base de tallo

Se midió en cosecha, la concentración de N-NO₃ en el corte de los primeros dos entrenudos desde la base del tallo para determinar si existieron deficiencias de N durante el llenado de grano.

3.7 CARACTERIZACIÓN AGROCLIMÁTICA

3.7.1 Sitios de Colonia

Para la caracterización de los predios de Gottero y Zanoni se utilizaron los datos proporcionados por INIA La Estanzuela, ya que ambos predios están aproximadamente a unos 5 km de la estación meteorológica.

La figura 10 muestra que el año analizado se encontró con condiciones similares en relación a la serie del 2001-2015, por lo que se determina como un año promedio en cuanto a la temperatura media y su amplitud térmica.

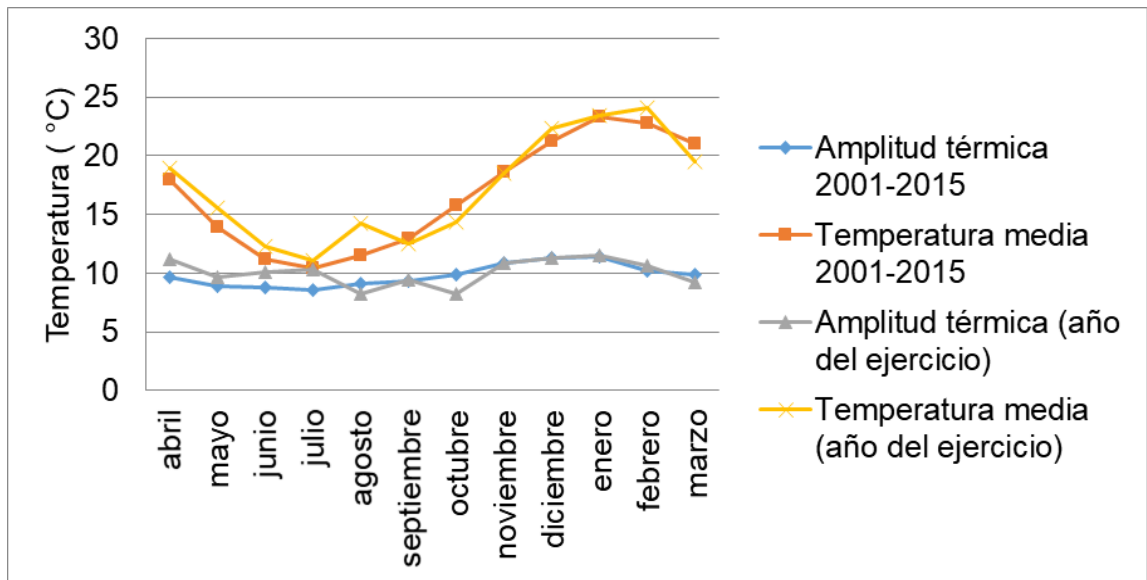


Figura 10. Temperatura media y amplitud térmica (Fuente: INIA, 2016).

En cuanto a las precipitaciones, refiriéndose al período de cultivo, no difiere en gran medida de los registros promedios, aunque en enero se observó una diferencia importante que pudo haber afectado el llenado de grano del cultivo. En el período agosto 2015-febrero 2016 se registraron precipitaciones de 741,5 mm. La figura 11 presenta lo planteado anteriormente, así como también las precipitaciones diarias y mensuales en el período correspondiente a

este trabajo y la comparación de esta última con las precipitaciones correspondientes a la serie histórica 1965-2011.

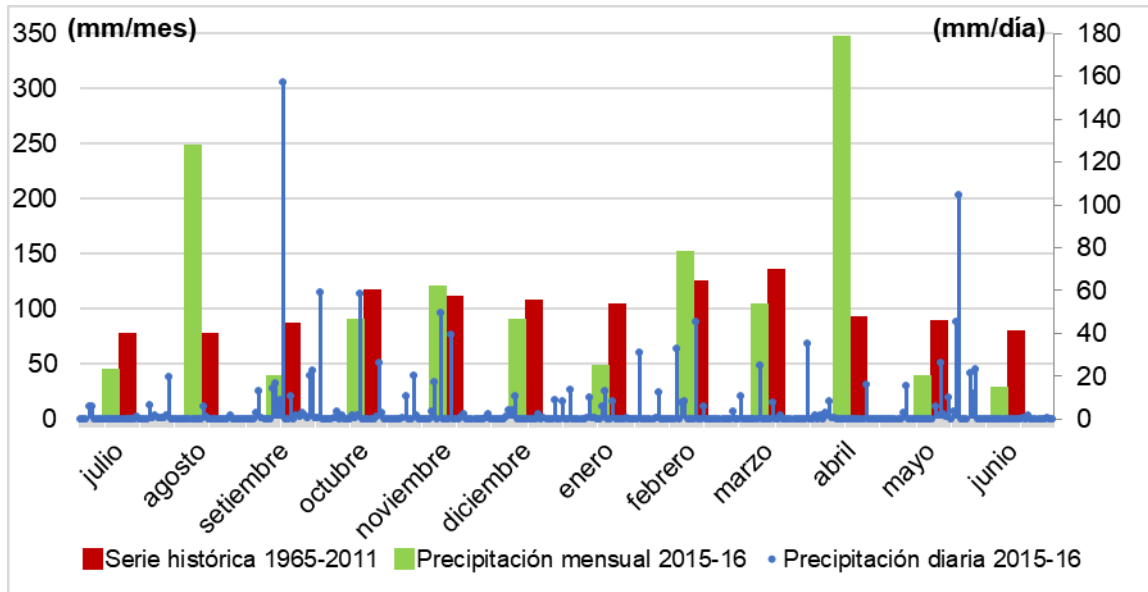


Figura 11. Precipitaciones serie histórica 1965-2011, mensuales y del año de ejercicio, Colonia (Fuente: INIA, 2016).

3.7.2 Sitios de Soriano

Los datos recabados para la caracterización de estos predios fueron tomados de la estación meteorológica del INUMET ubicada en Villa Soriano. Para la serie histórica se tomaron los datos de la estación de INIA LE, ya que se contaba con una base de datos con suficientes registros como para realizar una comparación fiable. La figura 12 presenta dichos datos en forma gráfica.

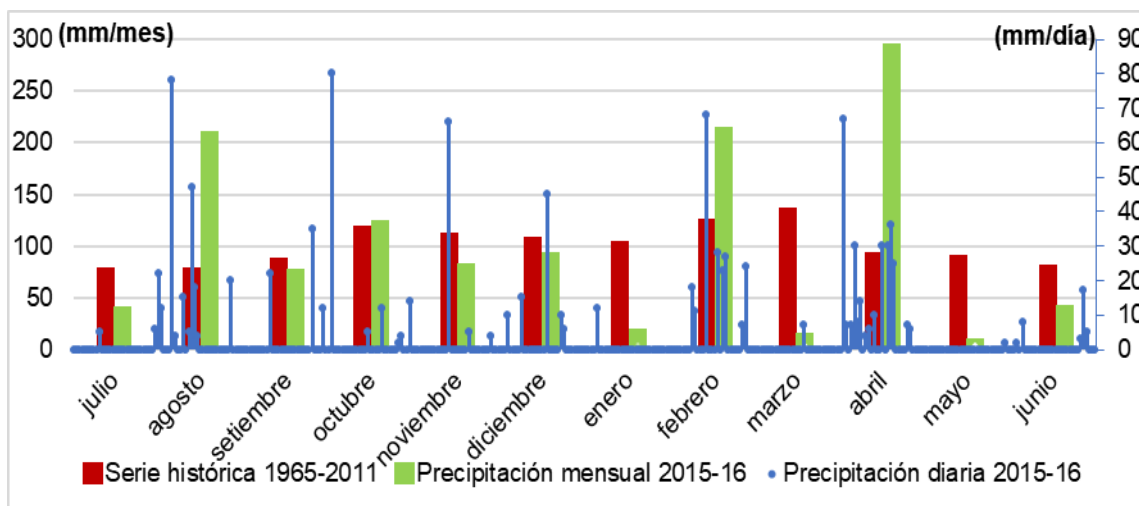


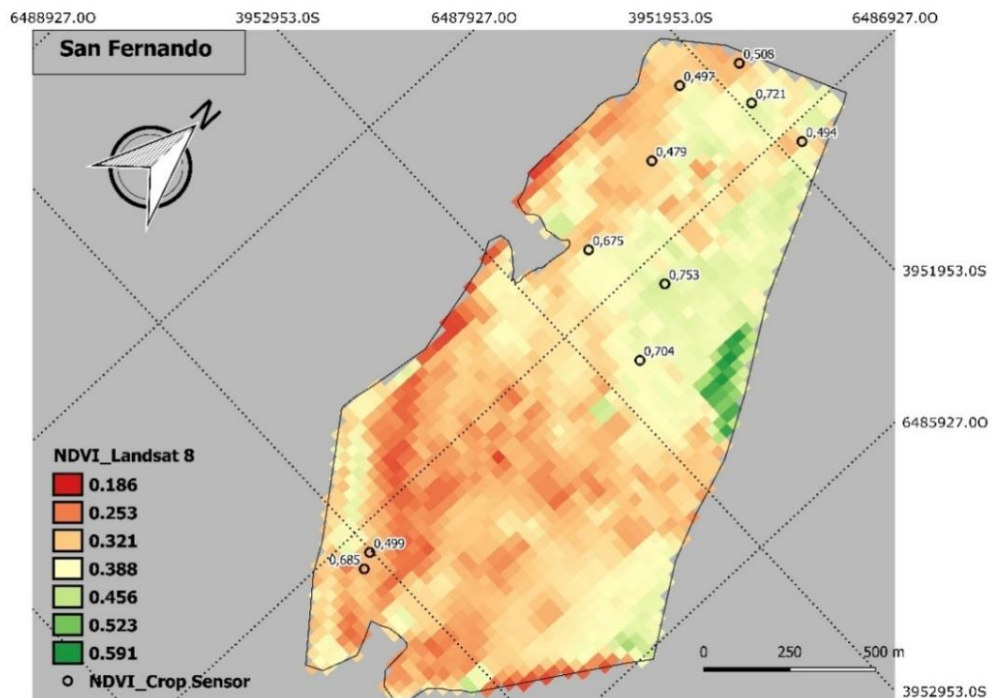
Figura 12. Precipitaciones serie histórica 1965-2011, mensuales y del año de ejercicio, Dolores (Fuente: INUMET 2016, INIA 2016).

El análisis a realizar es el mismo que en el caso de Colonia, registrándose precipitaciones menores en el mes de enero. En este caso, en el período correspondiente a agosto 2015-febrero 2016 se registraron 699 mm de precipitaciones.

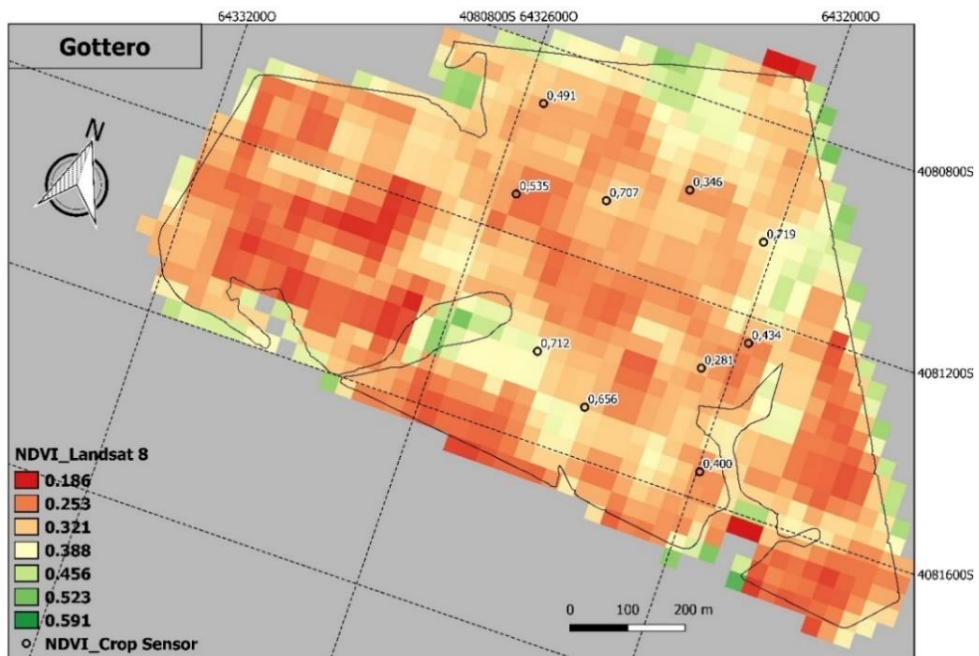
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 EVALUACIÓN DE NDVI A V10 CON CROP SENSOR Y LANDSAT 8

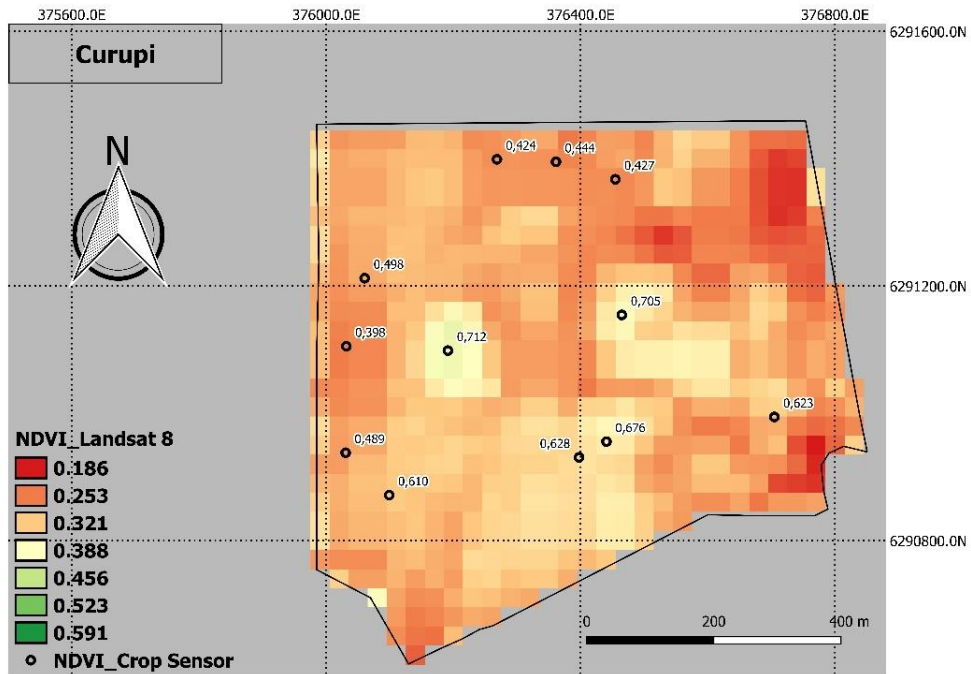
Las figuras 13 a 16 muestran los mapas de NDVI obtenidos de las imágenes satelitales Landsat 8 (NDVI-L8) y las medidas de NDVI tomadas con el Crop Sensor (NDVI-CS) en cada parcela (promedio tratamiento fertilizado y testigo).



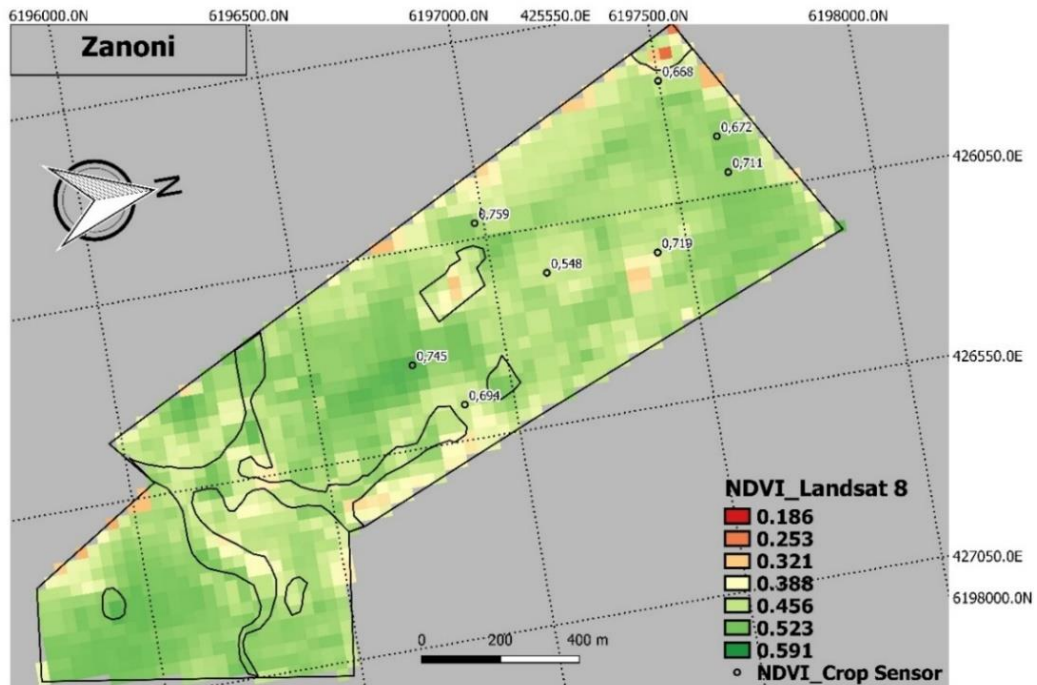
*Imagen correspondiente al 20 de noviembre 2015 (60 días post -siembra)
Figura 13. Mapa NDVI de San Fernando en V10.



*Imagen correspondiente al 6 de diciembre 2015 (60 días post -siembra)
 Figura 14. Mapa de NDVI Gottero en V10.



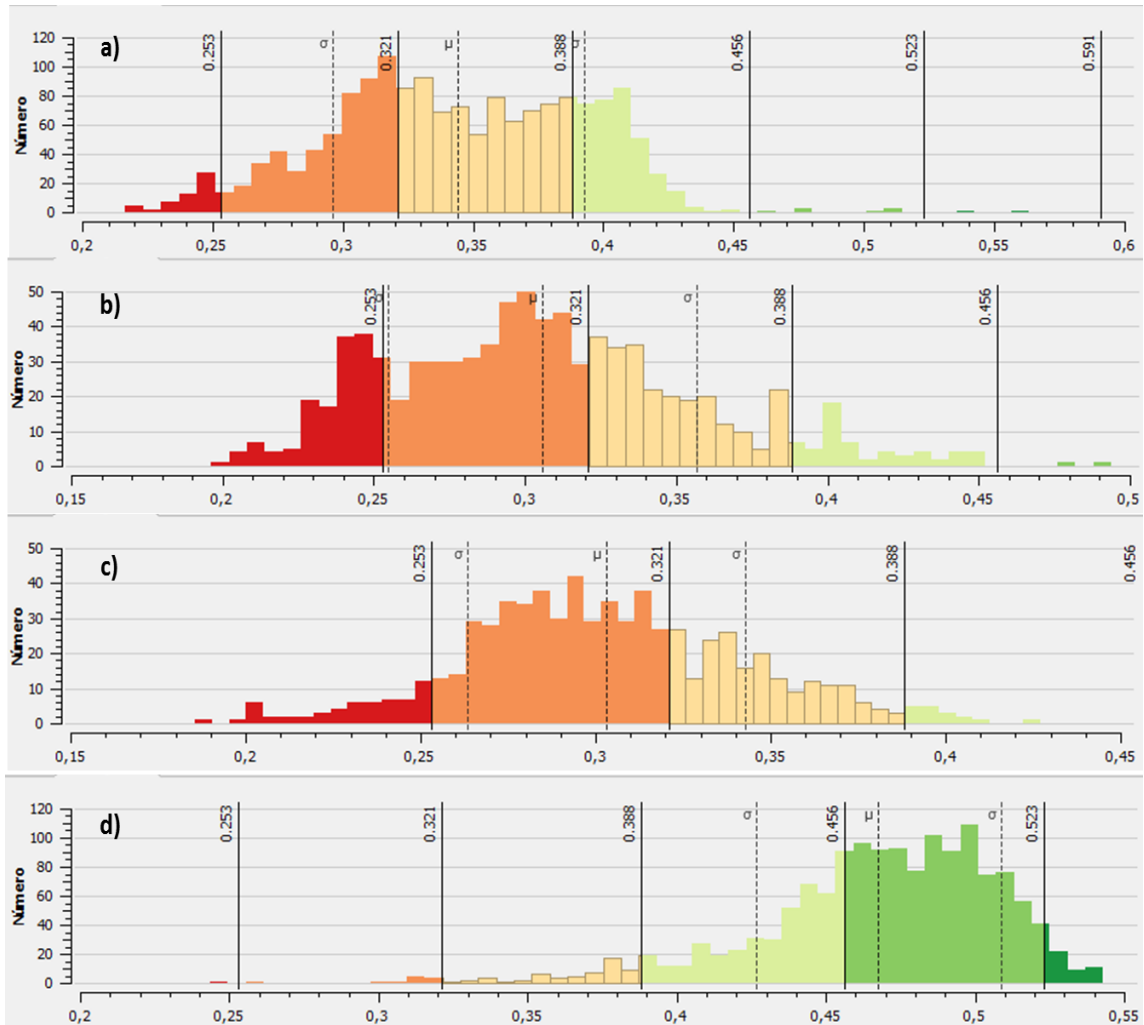
*Imagen correspondiente al 20 de noviembre 2015 (60 días post -siembra)
 Figura 15. Mapa NDVI de Curupí en V10.



*Imagen correspondiente al 6 de diciembre 2015 (90 días post -siembra)
 Figura 16. Mapa NDVI de Zanoni en V10.

Se observa una gran variabilidad entre chacras en cuanto a los rangos de NDVI medidos. Hay casos en que se presentan valores consistentemente altos, como Zanoni, con valores variables pero concentrados a niveles bajos, como Curupí, así como también chacras con valores de NDVI más variables como es el caso de Gottero y San Fernando.

La figura 17 ilustra mejor lo anteriormente descrito, en ella se mantienen los rangos utilizados en los mapas para que su interpretación sea aún más ilustrativa.



*a) San Fernando, b) Gottero, c) Curupí, d) Zanoni

Figura 17. Histogramas de NDVI según Landsat 8 para cada sitio.

El hecho de que Zanoni presente valores de NDVI consistentemente altos podría estar explicado por la presencia de una pastura hasta un año antes de la siembra del maíz, lo que probablemente implicó mejores condiciones desde el punto de vista de las propiedades físicas del suelo y disponibilidad de N.

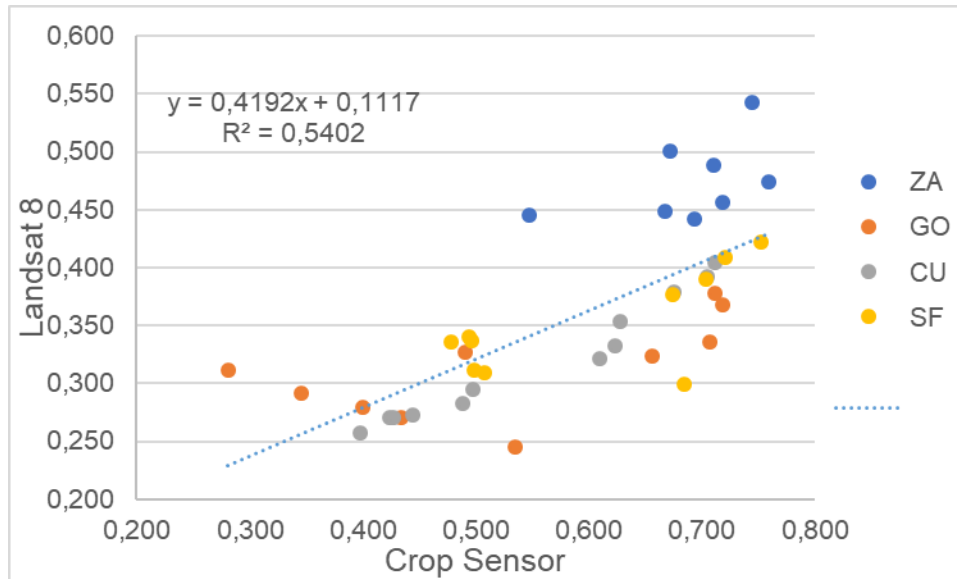


Figura 18. Relación entre NDVI Crop Sensor y NDVI Landsat 8.

Los valores medidos por ambas herramientas, L8 y Crop Sensor, no son iguales, lo cual se debe en gran medida a que el L8 considera pixeles de 30 m x 30 m, por lo que promedia el NDVI de un área importante, mientras que las medidas tomadas por CS corresponden a 0,1 m² aproximadamente. Igualmente se observa una correlación positiva entre ambas variables ($r^2=0.54$) al considerar todas las chacras.

4.1.1 Análisis relación NDVI Landsat 8 y monitor de rendimiento

Enmarcado dentro de otro de los objetivos de este trabajo, se procede a analizar la relación entre la medida de NDVI obtenida a partir de las imágenes satelitales y la medida de rendimiento del monitor de cosechadora.

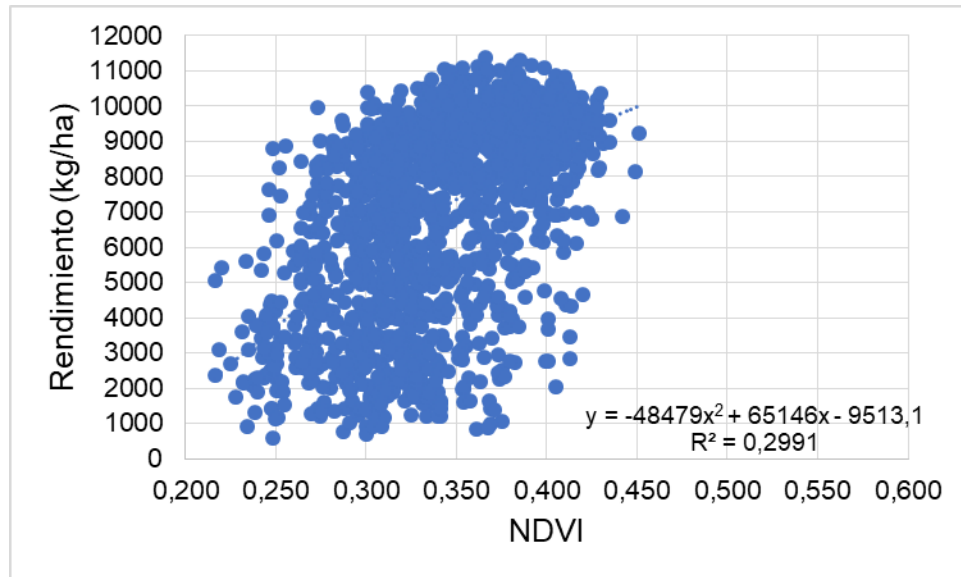


Figura 19. Rendimiento (monitor de cosecha) en función del NDVI observado (L8) para el sitio San Fernando.

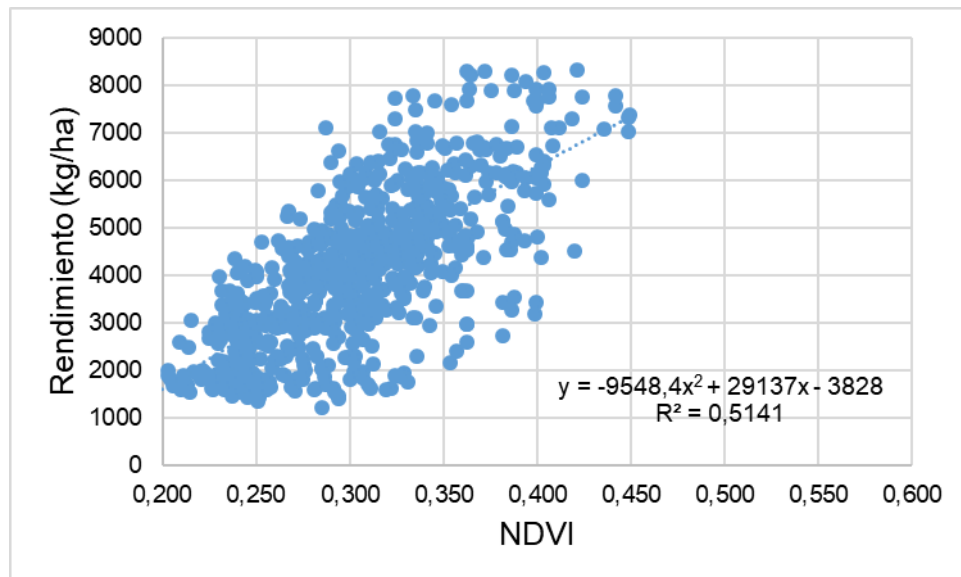


Figura 20. Rendimiento (monitor de cosecha) en función del NDVI observado (L8) para el sitio Gottero.

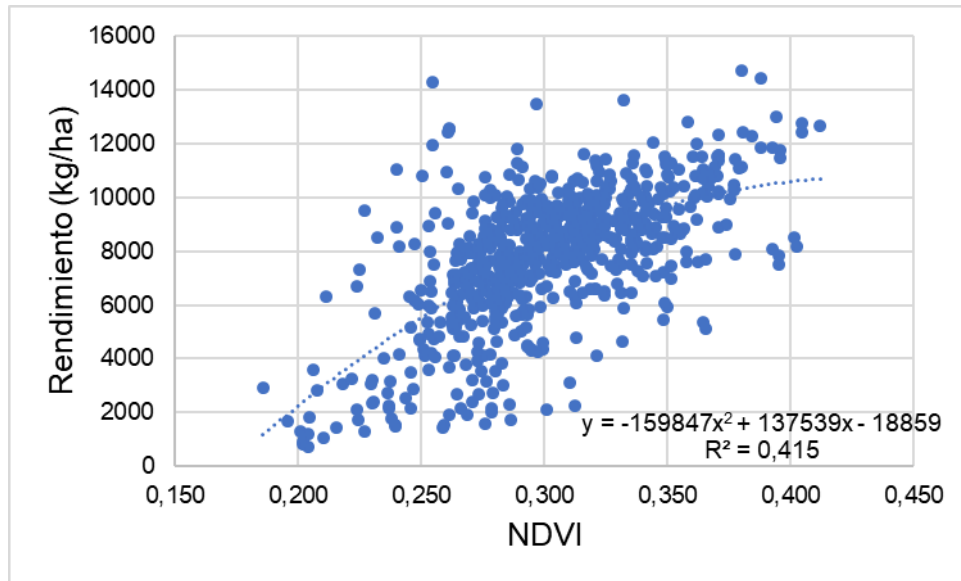


Figura 21. Rendimiento (monitor de cosecha) en función del NDVI observado (L8) para el sitio Curupí.

Al analizar los rendimientos obtenidos según el monitor de rendimiento en los sitios en las cuales se contaba con este dato, se observa una gran variabilidad de rendimientos entre los mismos, así como dentro de estos. Los rangos observados para cada sitio: San Fernando 1000 a 11000 kg/ha, Gottero 1000 a 8000 kg/ha y Curupí 1000 a 14000 kg/ha.

Más allá de estas las diferencias entre chacras, en los casos presentados se detectó que en términos generales, mayores niveles de NDVI se corresponden con mayores rendimientos, así como los niveles bajos de NDVI se corresponden con menores rendimientos.

A partir de estas figuras se puede concluir que el poder predictivo del rendimiento (monitor de cosecha) a través del NDVI determinado por L8 es relativamente bajo, ya que presenta una dispersión de datos que no permite lograr una asociación directa entre ambas variables que permita en forma remota pronosticar el rendimiento para un determinado sitio.

4.2 CARACTERÍSTICAS DE PLANTA EN RELACIÓN A NDVI MEDIDOS EN LOS SITIOS EXPERIMENTALES

Las figuras 22 y 23 presentan las relaciones entre las variables físicas en planta y la medida de NDVI.

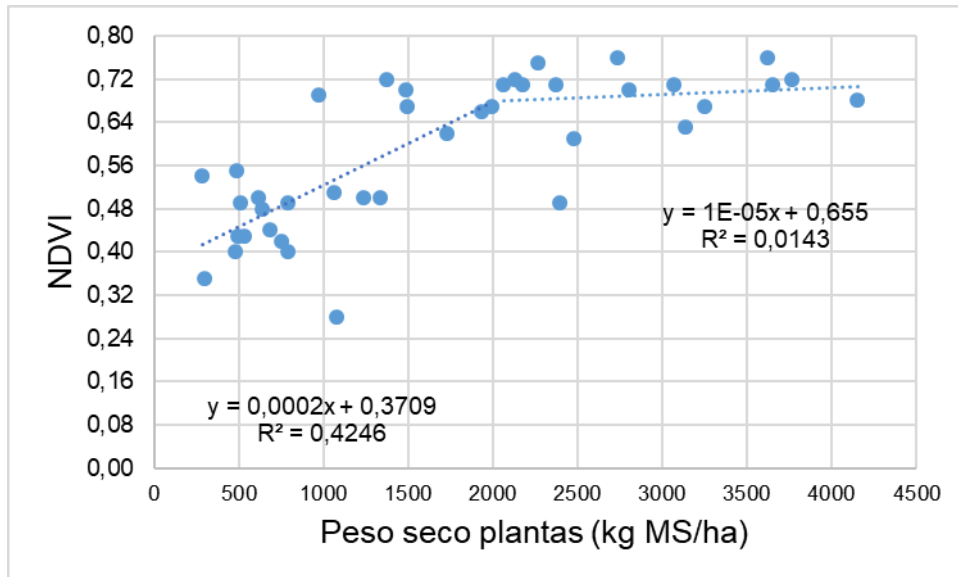


Figura 22. NDVI medido con Crop Sensor en relación peso de plantas en V10 para todos los sitios.

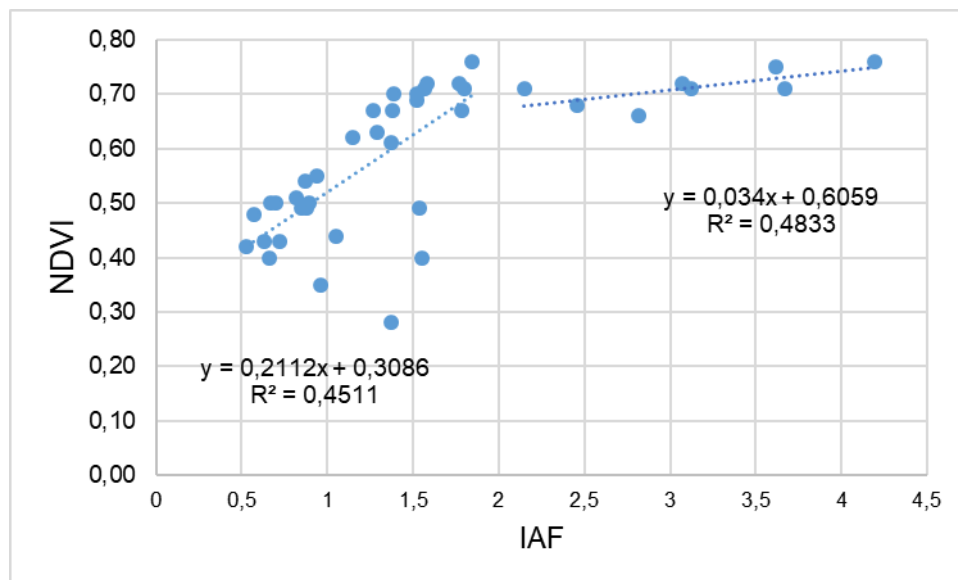


Figura 23. NDVI medido con Crop Sensor en función del IAF en V10 para todos los sitios.

Tanto para el IAF como para el peso seco, se observa una relación positiva entre estos factores y el NDVI. Para el caso del IAF, el NDVI aumenta ante aumentos de este parámetro hasta que el IAF se encuentra en torno a 2.

Esto coincide con lo planteado por Viñas (2004). En cuanto al peso peco, también se encontró una relación positiva con el NDVI, el cual aumenta ante incrementos de peso seco hasta que éste alcanza valores de 2500 kg MS/ha.

4.2.1 Análisis de la relación entre NDVI y la absorción de N a V10

A continuación, se presenta la absorción de N hasta el estadio V10 en función del NDVI-CS medido a campo en las parcelas experimentales.

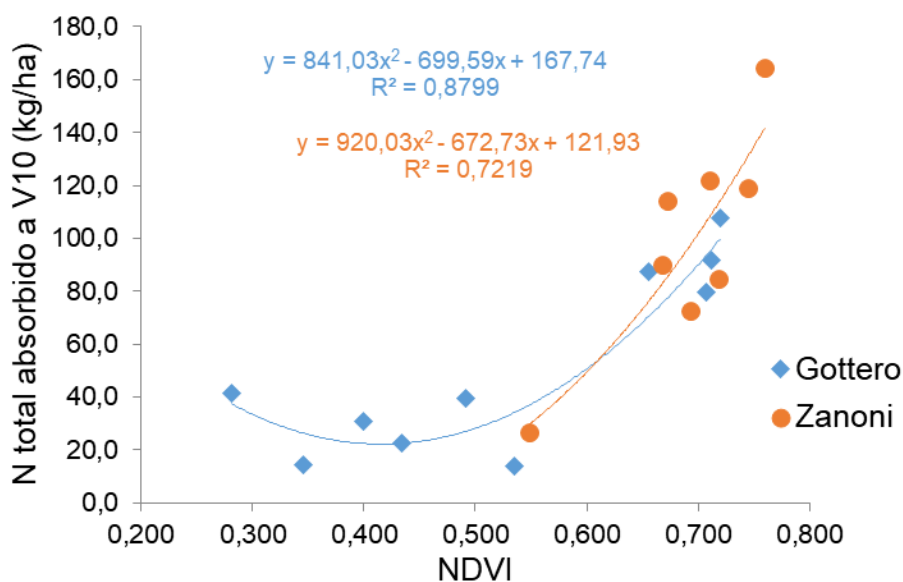
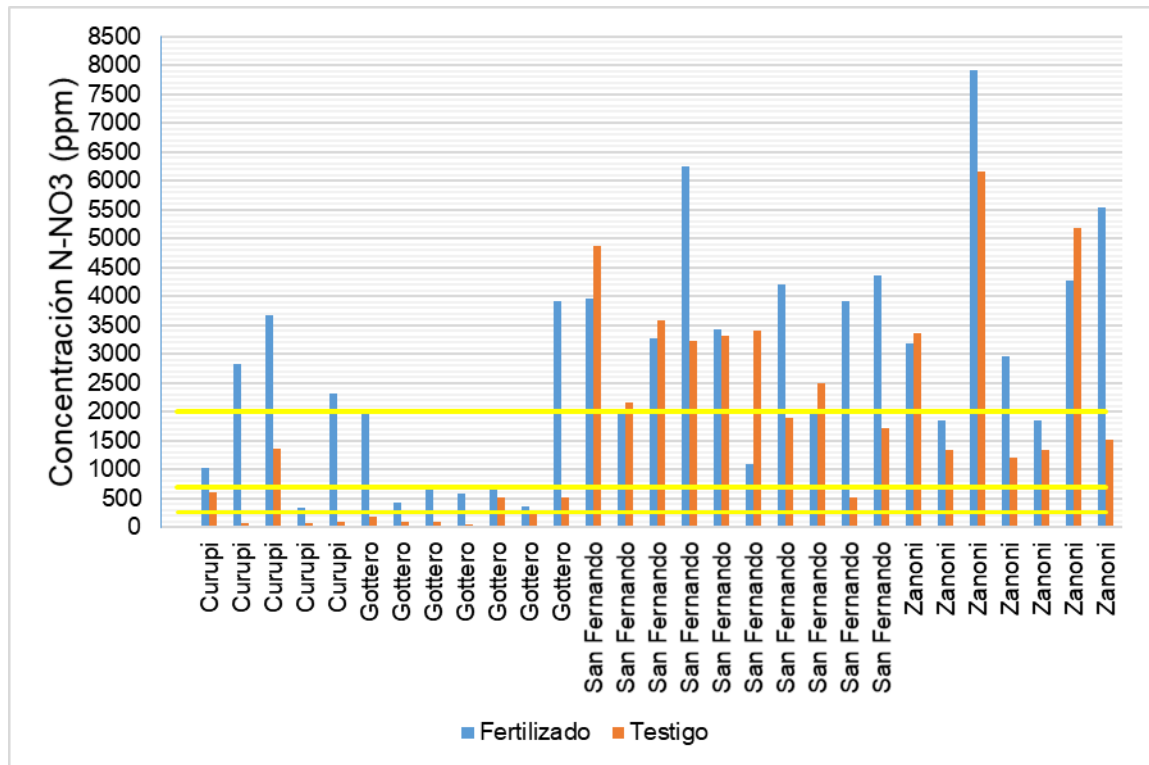


Figura 24. Nitrógeno absorbido a V10 en función del NDVI medido con Crop Sensor.

La figura 24 muestra que en los sitios en los que se midieron menores niveles de NDVI es en donde se dio la menor absorción de N ante una misma dosis de fertilizante. Resultados en otros trabajos (Li et al., 2014) indican que el índice tiene mayor capacidad de medir la absorción de N al evaluar su comportamiento a lo largo de las etapas V6-V12. Es importante remarcar que esta diferencia está explicada básicamente por una diferencia en el peso de las plantas y no por la concentración de N en planta tal como se puede ver en los anexos 10 y 11. Esto reafirmaría la importancia de realizar una fertilización variable, ya que no todos los sitios absorben la misma cantidad de N, debido a que el crecimiento del cultivo está limitado otros factores.

4.2.2 Evaluación del estado nutricional a través de la medida de base del tallo

La figura 25 presenta los resultados de la medida de concentración de N-NO₃ en la base de tallo para todos los sitios y ambos tratamientos con los valores de referencia citados en la bibliografía. Cabe aclarar que las diferencias de registros entre sitios se deben al distinto número de parcelas entre los mismos y en algunos casos pérdida de puntos por cosecha anticipada por parte del productor.



*Las líneas amarillas representan los rangos categóricos que presenta la bibliografía que fueron mencionados anteriormente.

Figura 25. Concentración de N-NO₃ en la base del tallo (ppm) por tratamiento y chacra.

Los tratamientos fertilizados no presentaron deficiencias de N, ya que los valores de concentración de nitrato en la base de tallo estuvieron por encima de las 250 mg.kg⁻¹, valor a partir del cual no habría deficiencia según Blackmer y Mallarino (1996). En el caso de los testigos se observaron deficiencias en algunos sitios de Curupí y Gottero. Cabe mencionar que algunos autores (Wilhelm et al., 2001) han propuesto que los niveles críticos para este análisis sean incrementados en un 35%, llegando los críticos de óptimo y exceso a 950 ppm y 2700 ppm respectivamente.

4.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

4.3.1 Análisis general

En el cuadro 5 se presentan los resultados del análisis estadístico general.

Cuadro 5. Análisis estadístico general.

a)						
		R ²	0.69072			
		R ² ajustado	0.673538			
		Cuadrado medio del error	1994.959			
		Media de respuesta	6865.912			
		Observaciones	58			
b)						
		AICc	BIC (criterio			
		(criterio de	de			
		información	información			
		de Akaike)	bayesiano)			
		1005.921	1016.637			
c)						
Efecto aleatorio	Coefficiente de análisis de la varianza	Componentes del coeficiente de análisis de la varianza	Error estándar	95% Inferior	95% Superior	Porcentaje del total
Chacra	2.2161817	8820096.5	7505591.2	-5890592	23530785	68.907
Residual		3979861.7	788356.55	2794896.5	6121527.5	31.093
Total		12799958	7538256	5243280.8	64863691	100.000
*-2 LogLikelihood = 992.27404949						
**Nota: "Total" es la suma de los componentes positivos de la varianza.						

d)					
Fuente	*Nparm	**DF	DFDen	F Ratio	p-valor
Tratamiento	1	1	50.97	0.0675	0.7960
NDVI	1	1	52.09	53.7544	<.0001*
Tratamiento*NDVI	1	1	50.97	0.0729	0.7882

*Nparm- número de parámetros asociados al efecto
 **DF- grados de libertad

e)		
Nivel		Menor media cuadrada
Curupí	A	10371.210
San Fern.	B	7920.215
Gottero	B	6301.577
Zanoni	C	3420.315

*Niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes $\alpha=0,050$

* a) Resumen de ajuste, b) Criterios para comparación de modelos, c) Máxima estimación restringida de los componentes de la varianza, d) Prueba de efectos fijos, e) Prueba Tukey rendimientos medios de sitios.

Al evaluar la significancia del NDVI para explicar el rendimiento se observa que esta variable fue significativa. También se puede decir que el modelo explica el 70% de la variación en rendimiento.

A partir de estos resultados se observa que tener en cuenta el efecto de la chacra es de relevancia ya que en un 70% afectó el rendimiento, de no haberse considerado se habría sobreestimado el aporte a la variación en rendimiento de las restantes fuentes de variación. Remarcando la necesidad de tomar en cuenta las diferencias entre las características de cada sitio para lograr un mejor manejo tanto del cultivo como de la fertilización.

En el cuadro 5 se aprecia que la refertilización no afectó el rendimiento de maíz. Esto puede estar explicado por el hecho de que el tratamiento testigo contaba con la fertilización realizada por los productores, la cual se considera que es suficiente para cubrir los requerimientos del cultivo. Esto último se confirma con los resultados del análisis de NO_3 en la base del tallo presentados anteriormente los cuales indican que en la mayoría de los casos el cultivo no sufrió deficiencias, basándose en los niveles críticos proporcionados por Blackmer y Mallarino (1996). La interacción tratamiento*NDVI, no fue

significativa. A su vez, se puede apreciar que el mayor y menor rendimiento se alcanzó en Curupí y Zanoni, respectivamente.

4.3.2 Análisis por chacra

En los cuadros 6, 7, 8 y 9 se presenta el análisis de varianza para cada sitio del trabajo.

Cuadro 6. ANAVA para la variable rendimiento en grano del sitio Curupí.

a)				
Chacra	Variable	N	R ²	R ² aj. CV
CU	Rend. kg/ha	10	0,98	0,96 7,38
b)				
		F.V.	p-valor	
		Modelo	0,0014	
		NDVI	0,0009	
		Tratamiento	0,7707	
c)				
Tratamiento	Medias	n	E.E.	
Fertilizado	9750,17	5	319,66 A	
Testigo	9609,15	5	319,66 A	

*El nivel de significancia utilizado en este ANAVA es de 5%
 **Ver anexo 1

*a) Resumen de ajuste b) Significancia de las fuentes de variación (F.V.) c) Cuadro comparación de medias según test de Tukey, DMS= 539,65.

Cuadro 7. ANAVA para la variable rendimiento en grano del sitio Gottero.

a)

Chacra	Variable	N	R ²	R ² aj.	CV
GO	Rend. kg/ha	14	0,96	0,9	14,36

b)

F.V.	p-valor
Modelo	0,0012
NDVI	0,0008
Tratamiento	0,8539

c)

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
Fertilizado	4776,64	7	257,32	A
Testigo	4706,69	7	257,32	A

*El nivel de significancia utilizado en éste ANAVA es de 5%
 ** Ver anexo 2

*a) Resumen de ajuste b) Significancia de las fuentes de variación (F.V.) c) Cuadro comparación de medias según test de Tukey, DMS= 539,65.

Cuadro 8. ANAVA para la variable rendimiento en grano del sitio San Fernando.

a)

Chacra	Variable	N	R ²	R ² aj.	CV
SF	Rend. kg/ha	20	0,99	0,98	5,65

b)

F.V.	p-valor
Modelo	<0,0001
NDVI	<0,0001
Tratamiento	0,2553

c)

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
Fertilizado	8401,64	10	147,66	A
Testigo	8147,84	10	147,66	A

*El nivel de significancia utilizado en éste ANAVA es de 5%
 ** Ver anexo 3

*a) Resumen de ajuste b) Significancia de las fuentes de variación (F.V.) c) Cuadro comparación de medias según test de Tukey, DMS= 539,65

Cuadro 9. ANAVA para la variable rendimiento en grano del sitio Zanoni.

a)						
Chacra	Variable	N	R ²	R ² aj.	CV	
ZA	Rend. kg/ha	14	0,97	0,93	10,46	

b)	
F.V.	p-valor
Modelo	0,0004
NDVI	0,0003
Tratamiento	0,9155

c)				
Tratamiento	Medias	n	E.E.	
Fertilizado	4983,14	7	196,37	A
Testigo	4952,43	7	196,37	A

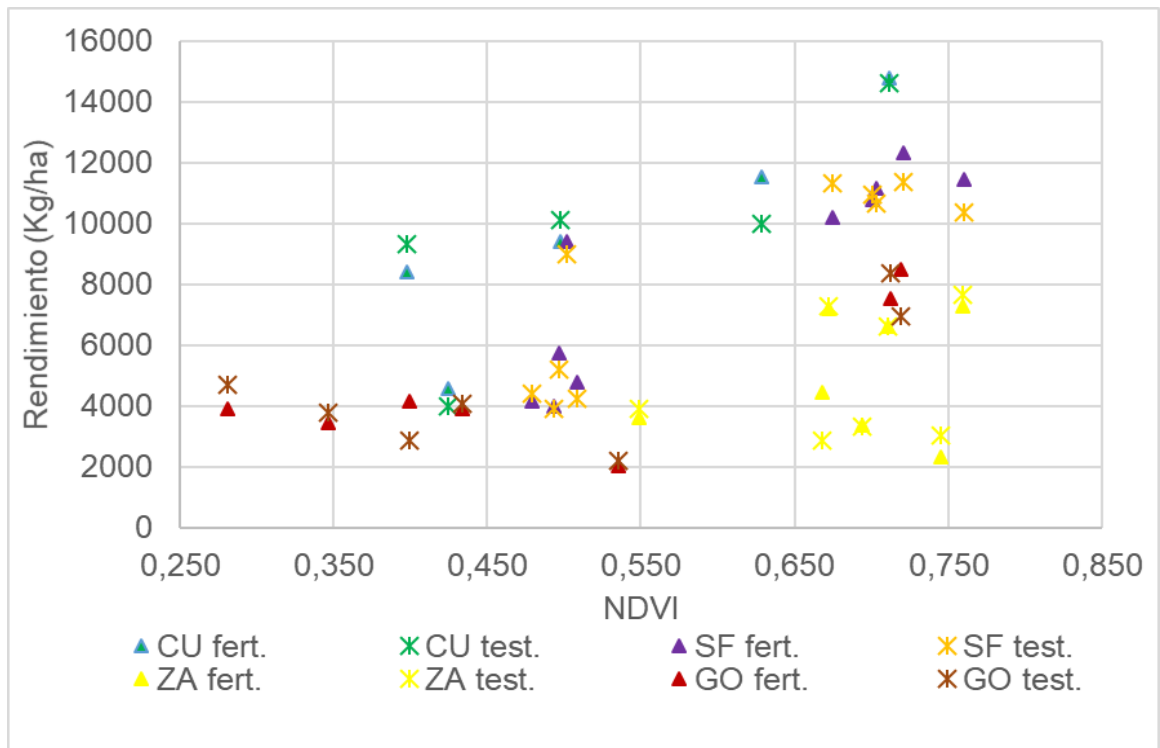
*El nivel de significancia utilizado en éste ANAVA es de 5%
 **Ver anexo 4

* a) Resumen de ajuste b) Significancia de las fuentes de variación (F.V.) c) Cuadro comparación de medias según test de Tukey, DMS= 539,65.

Al evaluar la significancia del NDVI para explicar el rendimiento se observa que, en todas las chacras, esta variable fue significativa. También se puede decir que el modelo planteado explica en más de un 90% la variación en rendimiento.

En los cuadros 6 a 9 se observa que el tratamiento de refertilización no afectó el rendimiento en ninguna de las chacras evaluadas.

La figura 26 presenta el conjunto de datos de rendimientos en función del NDVI siendo particionados por chacra y tratamiento. En la misma se observa que no existe una relación clara entre ambas variables al realizar el análisis en conjunto (fertilizados: $y=8497,7x^2+2422,9x+2463,2$ $R^2 = 0,2339$; testigos: $y=16181x^2-7121,9x+5133,7$ $R^2 = 0,2077$), pero si se analiza por separado cada chacra existen respuestas más acordes a los datos de la bibliografía.



*CU: Curupí, SF: San Fernando, ZA: Zanoni, GO: Gottero

**fert.: tratamiento fertilizado, test.: tratamiento testigo

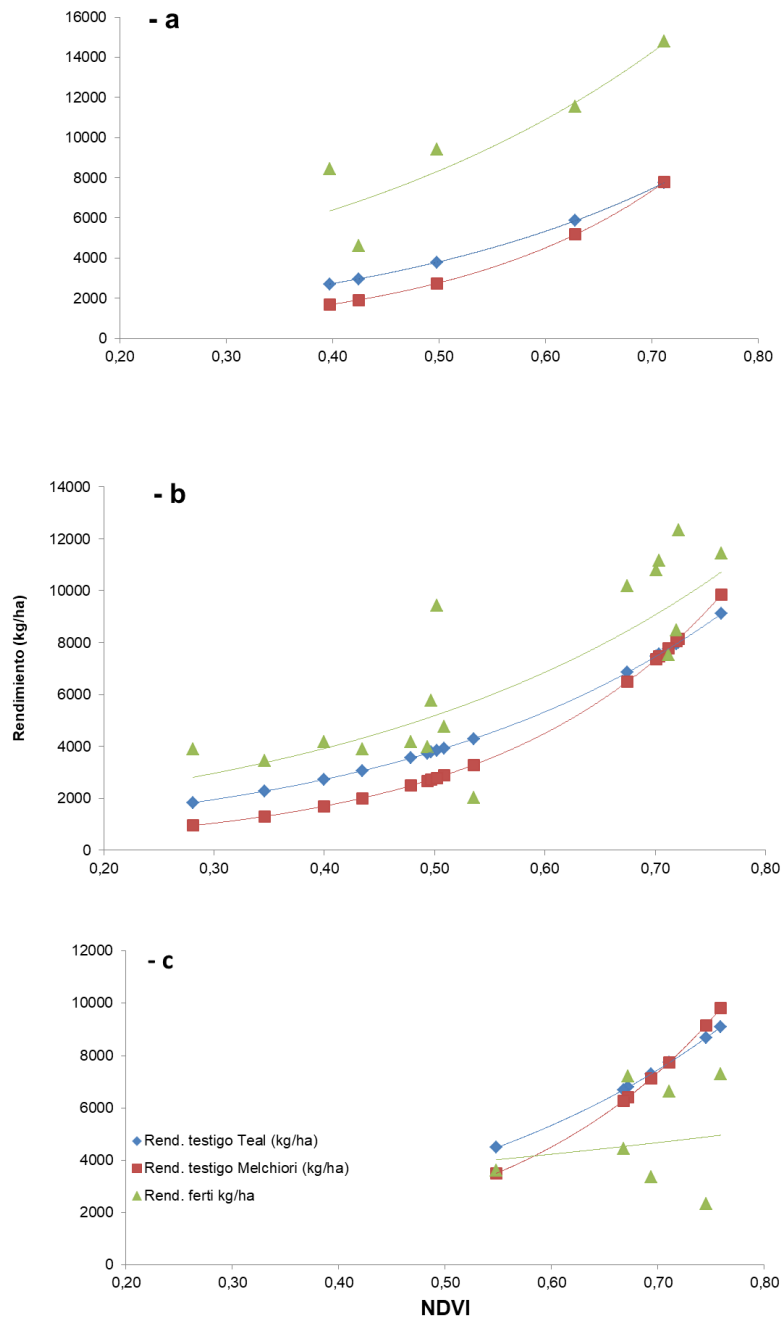
Figura 26. Rendimientos absolutos de los tratamientos testigos y fertilizados.

La figura 26 muestra que al aumentar el valor de NDVI se observa un incremento en el rendimiento, en coincidencia con los datos reportados por Teal et al. (2006). Un caso particular que se detectó es la chacra Zanoni, en la cual no se aprecian niveles bajos de NDVI, pero igualmente no hay rendimientos altos en relación a las otras chacras. Esto puede estar explicado por el hecho de que se logró un buen crecimiento del cultivo hasta V10 (momento en que se midió NDVI) pero no se consiguió concretar un buen rendimiento. Lo anterior puede deberse a que el grupo CONEAT 5.02b que predomina en esta chacra se caracteriza por suelos con menor capacidad de almacenaje de agua disponible comparándose con los otros sitios (suelos Brunosoles Subéutricos Háplicos moderadamente profundos, a los que se asocian Inceptisoles (Litosoles) a veces muy superficiales con el horizonte superior de textura franca, franco gravilosa o arenoso franca con gravillas abundantes, la fertilidad es media, a veces baja). Estas características seguramente afectaron la disponibilidad de agua al final del ciclo del cultivo, limitando el llenado de grano a pesar de que el cultivo se desarrolló bien en sus etapas vegetativas. Una evidencia de esto es además la existencia de altos valores de NO_3 en la base

del tallo, típicos de situaciones con un exceso relativo de N por elevada fertilización o estrés hídrico durante el llenado de grano.

Conocer el rendimiento del cultivo sin limitante de N es una herramienta muy importante, ya que permite saber cuál es el máximo rendimiento que se va a poder alcanzar si se corrige el N según el nivel de NDVI que presente el cultivo.

Para poder realizar un análisis de la respuesta a la refertilización se procedió a calcular el rendimiento de un testigo sin fertilizante a partir de las ecuaciones planteadas por Raun et al. (2002), Melchiori (2010) y se comparó con los valores observados. La figura 27 representa en forma gráfica lo planteado anteriormente.



*a) Curupí; b) San Fernando y Gottero; c) Zanoni).

Figura 27. Rendimientos de tratamientos fertilizados y testigos estimados en base a los observados para cada sitio. Fuente: adaptado de Raun et al. (2002), Melchiori (2010).

Comparar los rendimientos estimados del testigo en base a las ecuaciones con los rendimientos de los tratamientos fertilizados tampoco permitió observar lo planteado en la primera hipótesis, ya que en el caso de las gráficas a y b, la respuesta a la fertilización a dosis no limitantes no varía ante cambios en el valor de NDVI, mientras que en el caso de la gráfica c se observa una mayor respuesta a la fertilización a medida que aumenta el valor de NDVI. Esto puede estar explicado por el hecho de contar con pocos valores de NDVI medidos en el campo, así como también a que las ecuaciones a partir de las cuales se estimaron los rendimientos testigo fueron obtenidas en condiciones que pueden distar de las que presentan las chacras estudiadas en este trabajo.

La figura 28 presenta el efecto particular del tratamiento y cómo esta respuesta se dio en los distintos campos. A partir de ella se observa que a valores bajos de NDVI no habría respuesta al agregado de N a niveles no limitantes, a valores intermedios de NDVI se esperaría una respuesta, pero al llegar a los mayores registros del índice no se obtiene respuesta alguna. A pesar de ello en el análisis realizado anteriormente se desestima que el tratamiento haya tenido efecto alguno sobre el rendimiento.

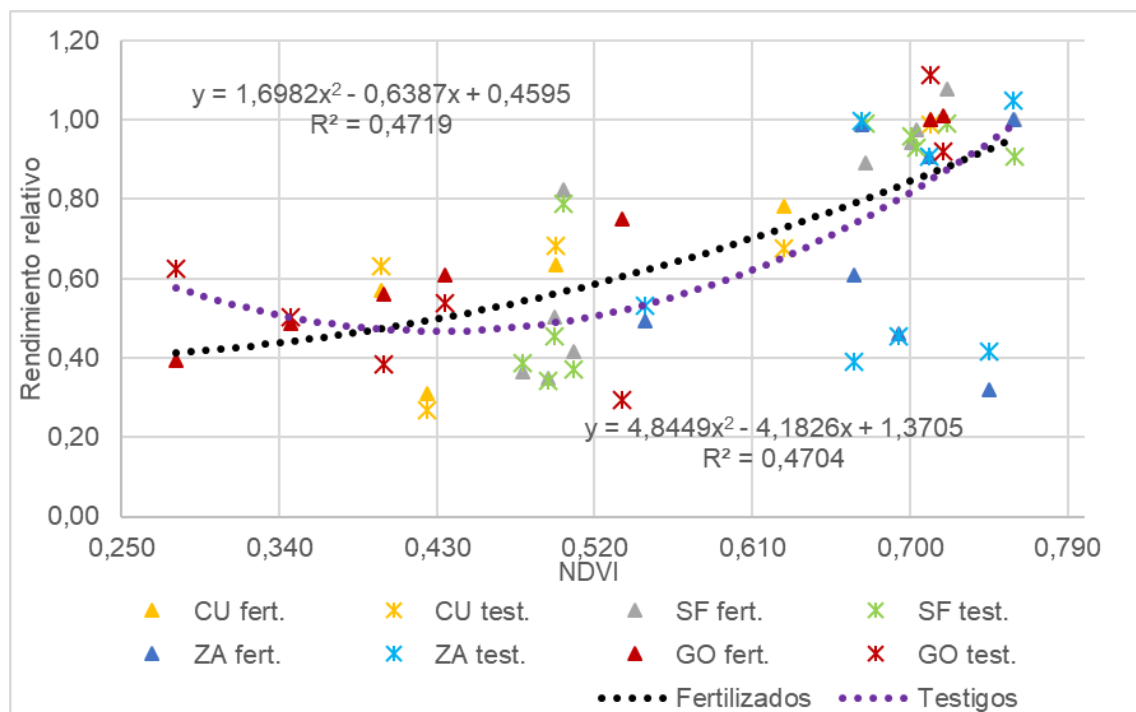


Figura 28. Rendimientos relativos testigos y fertilizados.

4.3.3 Análisis de regresión lineal (NDVI-rendimiento)

Se presenta en esta sección del trabajo la evaluación de la regresión entre el rendimiento y la medida de NDVI tomada con el Crop Sensor en cada parcela.

El nivel de significancia utilizado es 5%.

Cuadro 10. Regresión lineal para la variable rendimiento en grano.

a)							
Resumen							
Chacra	Variable	N	R ²	R ² aj.	ECMP	AIC	BIC
Curupí	Rend. kg/ha	10	0,72	0,64	7962846	186,18	187,39
Coeficientes de regresión y estadísticos asociados							
	Coef.	Est.	LI (95%)	LS (95%)	p-valor		
Const.	14926,14	-36292,9	66145,15	0,513			
NDVI	-43932,6	-237244	149378,7	0,6076			
NDVI ²	60923,19	-113519	235365	0,4361			
b)							
Resumen							
Chacra	Variable	N	R ²	R ² aj.	ECMP	AIC	BIC
Gottero	Rend. kg/ha	14	0,84	0,82	1430517	235,89	238,44
Coeficientes de regresión y estadísticos asociados							
	Coef.	Est.	LI (95%)	LS (95%)	p-valor		
Const.	15973,06	8611,73	23334,39	0,0006			
NDVI	-58353,7	-89137,8	-27569,6	0,0016			
NDVI ²	65338,97	35823,09	94854,85	0,0005			

*a) Curupí, b) Gottero

** ECMP: Error Cuadrático Medio de Predicción, AIC: Criterio de Información de Akaike, BIC: Criterio de Información Bayesiano, LI: Límite Inferior, LS: Límite Superior

*** Cuadros completos anexos 5 y 6

Cuadro 11. Regresión lineal para la variable rendimiento en grano.

a)							
Resumen							
Chacra	Variable	N	R ²	R ² aj.	ECMP	AIC	BIC
San Fern.	Rend. kg/ha	20	0,82	0,79	2686021	352,98	356,96
Coeficientes de regresión y estadísticos asociados							
Coef.	Est.	LI(95%)	LS(95%)	p-valor			
Const.	-47224,5	-99060,7	4611,74	0,0715			
NDVI	161966	-13720,8	337652,9	0,0685			
NDVI ²	-112290	-256490	31909,74	0,1188			
b)							
Resumen							
Chacra	Variable	N	R ²	R ² aj.	ECMP	AIC	BIC
Zanoni	Rend. kg/ha	14	0,08	0	6569107	258,48	261,04
Coeficientes de regresión y estadísticos asociados							
Coef.	Est.	LI (95%)	LS (95%)	p-valor			
Const.	-1824,1	-116288	112639,8	0,9726			
NDVI	11768,1	-341942	365478,3	0,9429			
NDVI ²	-2688,7	-273567	268189,6	0,983			

*a) San Fernando, b) Zanoni

** ECMP: Error Cuadrático Medio de Predicción, AIC: Criterio de Información de Akaike, BIC: Criterio de Información Bayesiano, LI: Límite Inferior, LS: Límite Superior

*** Cuadros completos anexos 7 y 8

Los coeficientes de regresión fueron significativos solamente en la chacra de GO, mientras que en el resto de los sitios no fueron significativos.

A continuación, se presentan las gráficas del ajuste de regresión para cada chacra.

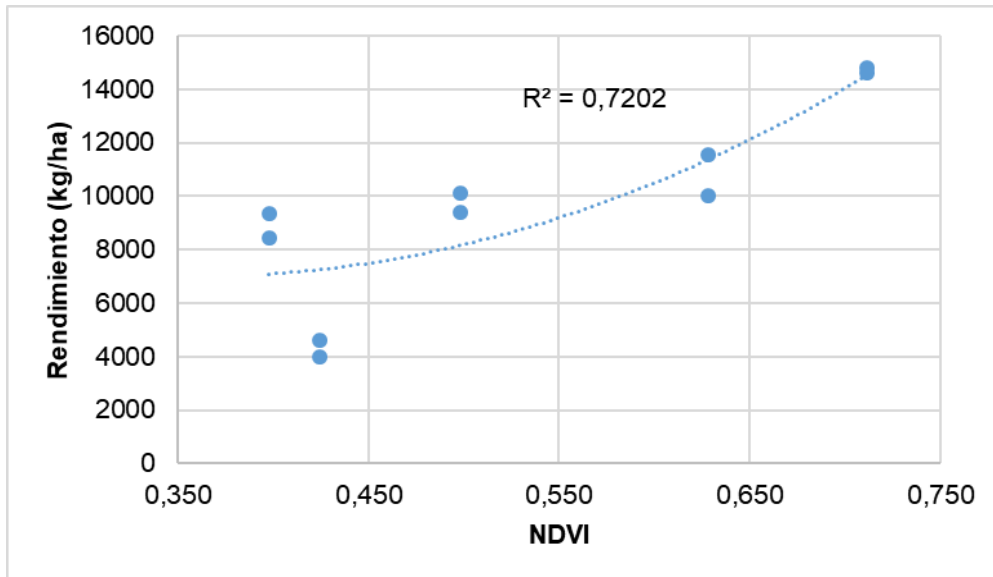


Figura 29. Rendimiento según NDVI (CU).

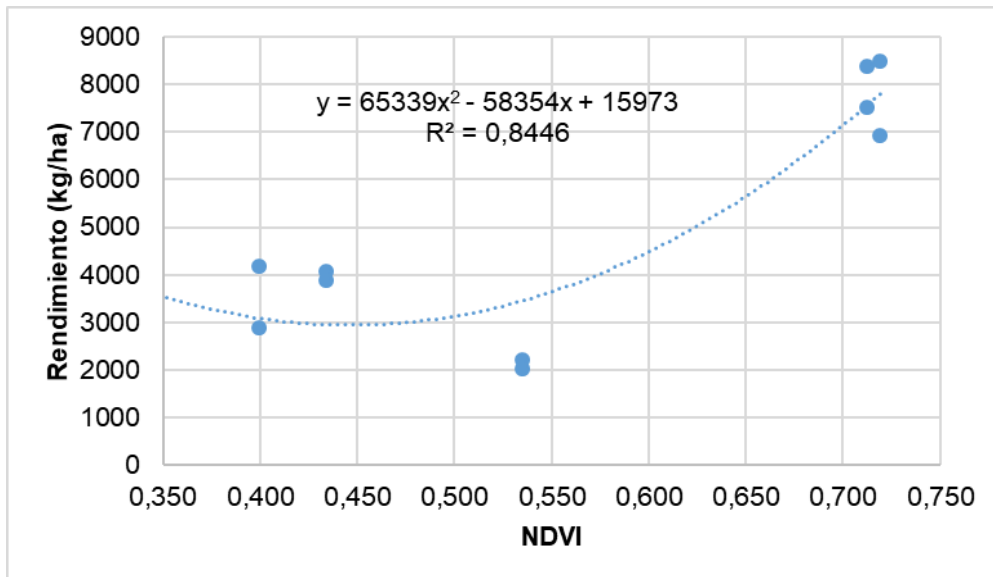


Figura 30. Rendimiento según NDVI (GO).

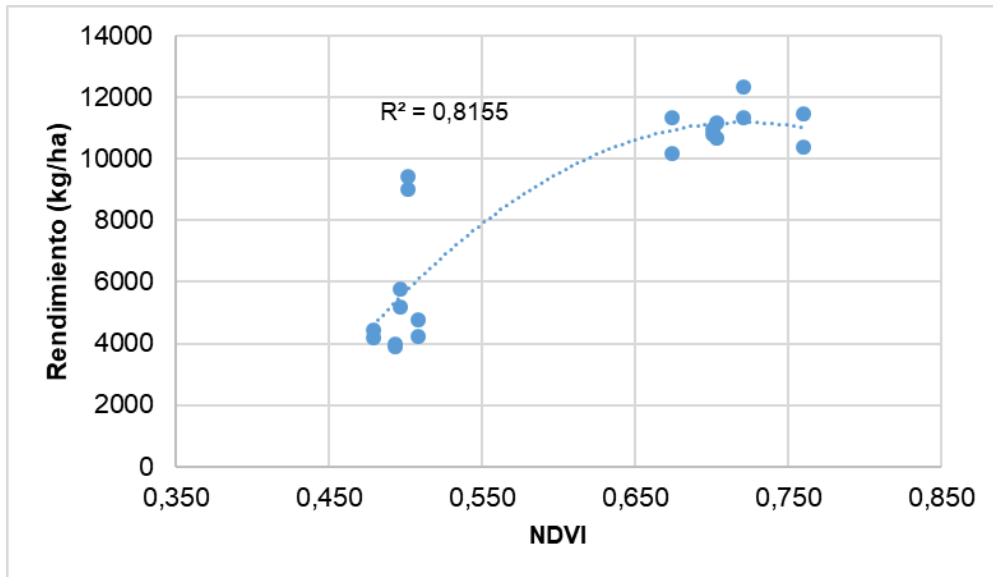


Figura 31. Rendimiento según NDVI (SF).

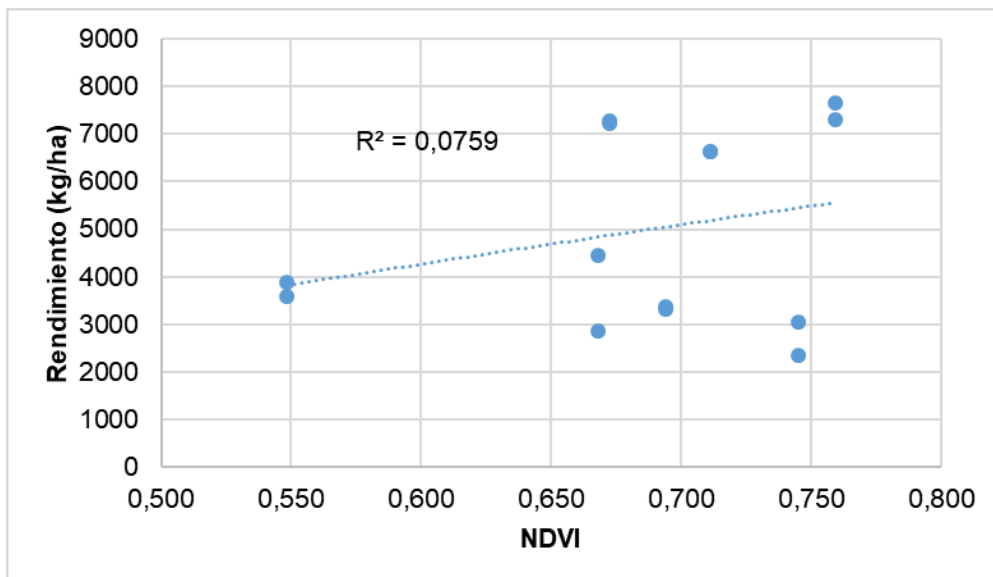


Figura 32. Rendimiento según NDVI (ZA).

4.3.4 Análisis de la relación NDVI Landsat 8 y rendimiento con ambientes predefinidos

La relación entre el rendimiento medido a través de los monitores de cosecha, las medidas de NDVI a través del L8 en V10 y la

ambientación realizada por cada productor se estudió solo para los sitios SF y GO, ya que en los otros sitios no se contaba con mapa de ambientes.

Los ambientes predefinidos por los productores presentaron en general distintos criterios. En los sitios SF y GO, si bien los ambientes fueron realizados por distintos proveedores de servicios (ADP en SF y Formagro en GO) los criterios fueron similares. En ambos casos se establecieron los ambientes principales según las medidas promedio de varios años de NDVI, y los datos de los monitores de rendimiento. Luego, a partir de estos grandes grupos, se generaron subclases o particiones confirmando la uniformidad de las distintas zonas directamente con muestreos a campo. Particularmente en SF a partir de medidas realizadas a campo se conformaron subclases dentro de los ambientes (ver anexo 9).

Cuadro 12. Comparación de medias de rendimiento (kg/ha) según test de Tukey, DMS=778,65.

Ambientes SF	Medias	N	E.E.	
A3-b-di	8520	267	129,94	A
A2-b	8488	341	114,98	A
A3-b	8259	245	135,65	A
B2-b-di	7990	153	171,66	A
D1-b-di	5361	245	135,65	B
D2-b-di-s	4857	141	178,81	B
D2-b-di	4706	49	303,33	B
B1-b	3372	106	206,23	C

Cuadro 13. Comparación de medias de rendimiento (kg/ha) según test de Tukey, DMS= 336,11.

Ambientes GO	Medias	n	E.E.	
Alta	4671	292	90,64	A
Medio	3897	218	104,91	B
Bajo	3518	208	107,4	C

Existe una clara correspondencia entre los ambientes predefinidos y la productividad media por ambiente, ya que en los mejores ambientes resultaron los mejores rendimientos medios. Particularmente en SF se observa que un ambiente predefinido como de mayor productividad (B1-b) resultó en menores rendimientos medios comparado con los peores ambientes (D).

A pesar de ser ambientes predefinidos en base a NDVI, al realizar las comparaciones con NDVI-L8, los ambientes de mayor productividad no se correspondieron tan directamente como con el rendimiento.

Cuadro 14. Comparación de medias de NDVI según test de Tukey, DMS = 0.012.

Ambientes SF	Medias	n	E.E.	
A3-b	0,39	245	2,00E-03	A
B2-b-di	0,39	153	2,60E-03	A
D2-b-di	0,36	49	4,60E-03	B
A3-b-di	0,35	267	2,00E-03	B
A2-b	0,34	341	1,70E-03	C
B1-b	0,33	106	3,10E-03	C
D2-b-di-s	0,31	141	2,70E-03	D
D1-b-di	0,29	245	2,00E-03	E

Cuadro 15. Comparación de medias de NDVI según test de Tukey, DMS=0,01037.

Ambientes GO	Medias	n	E.E.	
Alta	0,32	292	2,80E-03	A
Medio	0,29	218	3,20E-03	B
Bajo	0,29	208	3,30E-03	B

Al estudiar esta relación, se observó que los ambientes clasificados como los mejores presentaron bajo o alto NDVI, pero generalmente presentaron rendimientos altos. Los peores ambientes también presentaron bajos o altos NDVI, pero los rendimientos en general fueron bajos.

Por lo tanto los ambientes predefinidos se corresponden mejor con los rendimientos que con el NDVI, lo que hace pensar que es importante complementar correctamente el NDVI con la ambientación para poder lograr buenos resultados.

5. CONCLUSIONES

Se constató que las diferencias obtenidas en las medidas de NDVI a V10 en cada chacra se tradujeron en diferencias en rendimiento en grano a cosecha. A su vez, donde se observó un mayor NDVI se presentaron mayores rendimientos. Por el contrario, la correlación entre ambas variables con los datos de las parcelas fue muy baja.

Los ambientes predefinidos como altos presentaron en general los mayores rendimientos, pero no siempre los mayores niveles de NDVI. Se sugiere complementar con la ambientación predefinida en el campo para obtener una mayor utilidad de la medida de NDVI por L8.

El NDVI presentó una clara relación positiva con el IAF hasta que éste tomó valores superiores a 2 ($R^2=0,45$), donde el NDVI se satura. La misma conclusión se obtiene con el peso seco de las plantas, saturándose el NDVI a valores de 2500 kg de MS/ha.

No se detectaron diferencias significativas en cuanto a rendimiento entre los tratamientos testigo y fertilizado.

Al comparar los valores medidos por Landsat 8 y Crop sensor se observó que los valores no son iguales, pero en las zonas en las cuales el Landsat 8 midió valores más elevados, el Crop Sensor también presentó los valores más altos.

6. RESUMEN

Entre los elementos minerales esenciales, el nitrógeno (N) es el que con más frecuencia limita el crecimiento y el rendimiento del maíz. Dentro de las estrategias de fertilización nitrogenada, se considera como mejor alternativa la de diferir la aplicación de N en las distintas etapas del cultivo. En nuestra región uno de los indicadores de manejo de N más utilizados consiste en evaluar el contenido de nitratos en el suelo. Actualmente existen otras herramientas de diagnóstico de la necesidad de N por los cultivos que podrían ser utilizadas como complemento a las anteriores. Entre estas nuevas herramientas, se encuentra el uso del Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Por lo tanto en este trabajo, los objetivos fueron evaluar la capacidad del sensoramiento remoto (sensores activos) de estimar la existencia de respuesta a refertilización nitrogenada, evaluar la capacidad del sensoramiento remoto (sensores activos e imágenes Landsat) de estimar el potencial de rendimiento, realizar una evaluación exploratoria de los cambios en la respuesta a la refertilización nitrogenada según ambientes de producción predefinidos y evaluar en forma exploratoria el nivel de coincidencia entre los ambientes de producción predefinidos y el estado del cultivo observado mediante sensoramiento remoto, y su relación con el nivel de respuesta en rendimiento a la refertilización del cultivo. Para esto, se realizó un experimento en cuatro sitios en los departamentos de Colonia y Soriano. El NDVI fue obtenido a través de dos tipos de sensores. A nivel de campo en parcelas experimentales se utilizó RapidSCAN CS-45 HANDHELD CROP SENSOR (sensor activo de mano) y a nivel de chacra se utilizaron las imágenes obtenidas por el satélite Landsat-8 (sensor pasivo, OLI). Las medidas fueron tomadas cuando el cultivo se encontraba entre los estadios V8-V10 y fueron posteriormente contrastadas contra un conjunto de medidas realizadas a campo (peso de plantas, concentración de N, rendimiento, entre otros). También se estudiaron las relaciones entre el NDVI y los ambientes predefinidos en los predios estudiados. Previo a V8-V10 se identificaron en cada chacra puntos representativos de áreas de la chacra con valores contrastantes de NDVI (bajos, medios y altos). En cada punto se instalaron dos tratamientos de refertilización; testigo, el cual contó solamente con la fertilización llevada a cabo por cada productor; y el fertilizado, en el cual, además de la fertilización realizada por el productor se aplicó una dosis de 122.6 kg N/ha (considerada como de N no limitante para el cultivo). Se encontró que el NDVI fue una variable clasificatoria significativa para explicar el rendimiento, pero no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos.

Palabras clave: Nitrógeno; Maíz; NDVI; Rendimiento; Crop Sensor; Landsat 8.

7. SUMMARY

Among the essential mineral elements, the nitrogen (N) is the one more often limits the growth and yield of corn. Assessing the different strategies of nitrogen fertilization, the best alternative would be to differ the application to later stages of the crop. A wide range of tools are known to determine the amount of nitrogen to be applied, in our region one of the most used consist in evaluate the content of nitrates in the soil. The experiment was realized in four sites in the departments of Colonia and Soriano. This experiment is focused in the use of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) obtained through two types of sensors. At field level in the experimental plots it was used the RapidScan CS-45 HANDHELD CROP SENSOR (active hand sensor) and when assessing the whole site, it was used the images obtained from the satellite Landsat-8 (passive sensor OLI). The measurements were taken when the crop was in the stages V8-V10 and were evaluated with a set of measurements made in the field (weight of plants, nitrogen concentration, yield, among others). In addition, we studied the relationship between the observed NDVI and the predefined management zones within the sites. Before the V8-V10 stage sampling points were identified within each field, that had contrasting values of NDVI (low, medium and high). In each point two treatments of re-fertilization were installed: check plots, which only had the fertilization made by the farmer; and Fertilized plots, in which additionally to the fertilization made by the farmer it was applied a dose of 122.6 kg N/ha (being the fertilized treatment considered as non-limiting in N availability for the crop). The statistical analysis showed, that NDVI is a significant classificatory variable to explain yield, however refertilization response was not significant as well as the interaction between refertilization and NDVI.

Key words: Nitrogen; Corn; NDVI; Yield; Crop Sensor; Landsat 8.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Abraham, I.; Falco, N. 2012. Efecto de la fertilización nitrogenada tardía V10-12 sobre el rendimiento de maíz en condiciones de riego y secano. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. UdelaR. Facultad de Agronomía. 63 p.
2. AMIS (Agricultural Market Information System, IT). 2017. Market monitor. (en línea). Roma. Consultado mar. 2017. Disponible en <http://www.amis-outlook.org/>
3. Balboa, G.; Espósito, G., Castillo, C.; Balboa, R. s.f. Relación entre el índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI) y el rendimiento en grano de maíz (*Zea mays* L.) fertilizado con nitrógeno en diferentes zonas de manejo. s.n.t. pp. 310-318.
4. Barnett, T. L.; Thompson, D. R. 1982. The use of large-area spectral data in wheat yield estimation. *Remote Sensing of Environment*. 12: 509-518.
5. Below, F. 2002. Fisiologia, nutrição e abubação nitrogenada do milho. *Informações Agronomicas*. 99: 7-12.
6. Blackmer, A. M.; Mallarino, A. P. 1996. Determinación del contenido de nitratos en el tallo de maíz para evaluar la dosis de nitrógeno. Ames, Iowa, Iowa State University. 4 p.
7. Bragagnolo, J.; Carneiro, T. J.; da Silveira, R.; Santi, A. L.; Ernani, J.; Tabaldi, F. 2013. Optical crop sensor for variable-rate nitrogen fertilization in corn; II- indices of fertilizer efficiency and corn yield. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*. 37: 1299-1309.
8. Cazaban, M.; Rubio, N. 2014. Efecto de la fertilización nitrogenada tardía (V10-11) sobre el rendimiento de maíz. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. UdelaR. Facultad de Agronomía. 78 p.
9. de la Casa, G.; Ovando, G. 2007. Integración del Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI) y del ciclo fenológico de maíz para estimar el rendimiento a escala departamental en Córdoba, Argentina. Córdoba, AR, s.e. s.p.
10. García, F.; Correndo, A. 2014. Bases de la nutrición del cultivo de maíz. In: Satorre, E. H. ed. Maíz; técnicas probadas para una producción rentable. Buenos Aires, AACREA (Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola, AR). cap. 6, pp. 37-44.

11. Haghjoo, M.; Nezhad, F. P.; Amiri, E.; Vazan, S.; Kamel Manesh, M. M. 2013. Maize response to nitrogen and irrigation regimes. *American-Eurasian Journal of Agriculture & Environmental Science*. 5 (13): 639-646.
12. Hatfield, J. L.; Gitelson, A. A.; Schepers, J. S.; Walthall, C. L. 2008. Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. *Agronomy Journal*. 100: 117-131.
13. Holland, K.; Schepers, J. 2010. Active-crop sensor calibration using the virtual-reference concept. s.n.t. s.p.
14. INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, UY). 2016. Portal INIA. GRAS. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado mar. 2017. Disponible en <http://www.inia.uy/gras>
15. INUMET (Instituto Uruguayo de Meteorología, UY). 2016. Estadísticas climatológicas. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado mar. 2017. Disponible en <https://inumet.gub.uy/>
16. Iqbal, S.; Khan, H. Z.; Ehsanullah; Zamir, M. S. I.; Marral, M. W. R.; Javeed, H. M. R. 2014. The effects of nitrogen fertilization strategies on the productivity of maize (*Zea mays* L.) hybrids. *Zemdirbyste-Agriculture*. 101(3): 249-256.
17. Kaleem, A. M.; Tahir, M. M.; Rahim, N. 2013. Effect of N fertilizer source and timing on yield and N use efficiency of rainfed maize (*Zea mays* L.) in Kashmir-Pakistan. *Geoderma*. 195: 87-93.
18. Kullberg, E. G.; DeJonge, K. C.; Chávez, J. L. 2017. Evaluation of thermal remote sensing indices to estimate crop evapotranspiration coefficients. *Agricultural Water Management*. 179: 64-73.
19. Li, F.; Miao, Y.; Feng, G.; Yuan, F.; Yue, S.; Gao, X.; Liu, Y.; Liu, B.; Usitn, S. L.; Chen, X. 2014. Improving estimation of summer maize nitrogen status with red edge-based spectral vegetation indices. *Field Crops Research*. 157: 111-123.
20. MAP (Ministerio de Agricultura y Pesca, UY). 1967. Descripción de grupos de suelos CONEAT. Montevideo. 62 p.
21. Melchiori, R.; Caviglia, O.; Bianchini, A.; Faccendini, N.; Raun, W. 2005. Avances en la utilización de sensores remotos para manejo de nitrógeno de maíz. In: National Congress of AAPRESID (14th., 2006, Rosario, Argentina). Proceedings. Rosario, Argentina, AAPRESID. pp. 155-160.

22. _____. 2010. Advances in the use of remote sensors in argentinian agriculture. *Better Crops*. 94(3): 21-23.
23. Melgar, R.; Torres, M. 2016. Manejo de la fertilización en maíz. (en línea). s.l., Fertilizando.com. s.p. Consultado feb. 2017. Disponible en <http://www.fertilizando.com/articulos/Manejo%20de%20la%20Fertilizacion%20en%20Maiz.asp>
24. Mengel, D. 1995. Roots, growth and nitrogen uptake. West Lafayette, Indiana Department of Agronomy Publication. pp 1-8
25. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2016. Anuario estadístico agropecuario. Montevideo. 198 p.
26. Mika, J.; Kerényi, J.; Rimóczi-Paál, A.; Merza, Á.; Szinell, C.; Csiszár, I. 2002. On correlation of maize and wheat yield with NDVI; example of Hungary (1985-1998). *Advanced Space Research*. 30(11): 2399-2404.
27. Mistele, B.; Schmidhalter, U. 2008. Estimating the nitrogen nutrition index using spectral canopy reflectance measurements. *European Journal of Agronomy*. 29: 184-190.
28. Nandibewoor, A.; Hebbal, S. B.; Hegadi, R. 2015. Remote monitoring of maize crop through satellite multispectral imagery. *Procedia Computer Science*. 45: 344-353.
29. Niaz, A.; Yaseen, M.; Arshad, M.; Ahmad, R. 2015. Response of maize yield, quality and nitrogen use efficiency indices to different rates and application timings. *Journal of Animal & Plant Sciencies*. 25(4): 1022-1031.
30. Oyarzun, M. A. 2010. Respuesta productiva de un cultivo de maíz (*Zea mays* L. Var. DRACMA) a distintas dosis de nitrógeno con dos tipos de riego (aspersión e inundación) y efectos sobre la lixiviación de nitratos. Navarra, Universidad Pública de Navarra. 100 p.
31. Perdomo, C.; Barbazán, M. 2000. Nitrógeno. Montevideo, Facultad de Agronomía. 70 p.
32. Quincke, A.; García, A.; Morón, A. 2008. Manejo de la fertilización en cultivos de verano. Montevideo, INIA. s.p.

33. Raun, W. R.; Solie, J. B.; Johnson, G. V.; Stone, M. L.; Mullen, R. W.; Freeman, K. W.; Thomason, W. E.; Lukina, E. V. 2002. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. *Agronomy Journal*. 94: 815-820.
34. Scharf, P. C.; Shannon, D. K.; Palm, H. L.; Sudduth, K. A.; Drummond, S. T.; Kitchen, N. R.; Mueller, L. J.; Hubbard, V. C.; Oliveira, L. F. 2011. Sensor-based nitrogen applications out-performed producer-chosen rates for corn in on-farm demonstrations. *Agronomy Journal*. 103: 1683-1691.
35. Shanahan, J. F.; Schepers, J. S.; Francis, D. D.; Varvel, G. E.; Wilhelm, W. 2001. Use of remote-sensing imagery to estimate corn grain yield. *Agronomy Journal*. 93: 583-589.
36. _____; Kitchen, N. R.; Raun, W. R.; Schepers, J. S. 2008. Responsive in-season nitrogen management for cereals. Lincoln, Nebraska, United States Department of Agriculture. 13 p.
37. Solari, F.; Shanahan, J.; Ferguson, R. B.; Schepers, J. S.; Gitelson, A. A. 2008. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. *Agronomy Journal*. 100 (3): 571-579.
38. Teal, R. K.; Tubana, B.; Girma, K.; Freeman, K. W.; Arnall, D. B.; Walsh, O.; Raun, W. R. 2006. In-season prediction of corn grain yield potential using Normalized Difference Vegetation Index. *Agronomy Journal*. 98: 1488-1494.
39. Tremblay, N.; Bouroubi, M.; Vigneault, P.; Bélec, C. 2011. Guidelines for in-season nitrogen application for maize (*Zea mays* L.) based on soil and terrain properties. *Fields Crop Research*. 122: 273-283
40. Viñas, A. 2004. Remote estimation of leaf area index and biomass in corn and soybean. Thesis PhD. Lincoln, Nebraska, USA. University of Nebraska. 144 p.
41. Wang, R.; Cherkauer, K.; Bowling, L. 2016. Corn response to climate stress detected with satellite-based NDVI time series. *Remote Sensing*. 8: 1-22.
42. Whelan, B. 2015. Advanced field-scale experimentation for grain growers. Sydney, University of Sydney. 16 p.
43. Wilhelm, W.; Gary, V. E.; Schepers, J. S. 2001. Corn stalk nitrate concentration profile; implications for the end of season stalk nitrate test. In: Horst, W. J. ed. *Plant nutrition-food security and*

sustainability of agro-ecosystems. Dordrecht, NL, Kluwer. pp. 708-709.

44. Yule, I.; Pullanagari, R. 2009. Use of reflectance sensors to optimise nutrient management. Palmerston North, New Zealand Centre for Precision Agriculture. s.p.

9. ANEXOS

1. Cuadro de análisis de la varianza (SC tipo III) Curupí.

F.V.	S.C.	gl	C.M.	F	p-valor
Modelo.	112514643	5	22502928,5	44,04	0,0014
NDVI	112464924	4	28116230,9	55,03	0,0009
Tratamiento	49718,9	1	49718,9	0,1	0,7707
Error	2043678,25	4	510919,56		
Total	114558321	9			

2. Cuadro de análisis de la varianza (SC tipo III) Gottero.

F.V.	S.C.	gl	C.M.	F	p-valor
Modelo.	59092114,6	7	8441730,66	18,21	0,0012
NDVI	59074985,6	6	9845830,94	21,24	0,0008
Tratamiento	17129,01	1	17129,01	0,04	0,8539
Error	2780932,93	6	463488,82		
Total	61873047,6	13			

3. Cuadro de análisis de la varianza (SC tipo III) San Fernando.

F.V.	S.C.	gl	C.M.	F	p-valor
Modelo.	194517855	10	19451785,5	89,15	<0,0001
NDVI	194195783	9	21577309,2	98,89	<0,0001
Tratamiento	322072,2	1	322072,2	1,48	0,2553
Error	1963762,8	9	218195,87		
Total	196481618	19			

4. Cuadro de análisis de la varianza (SC tipo III) Zanoni.

F.V.	S.C.	gl	C.M.	F	p-valor
Modelo.	50644141,6	7	7234877,38	26,8	0,0004
NDVI	50640839,9	6	8440139,98	31,27	0,0003
Tratamiento	3301,79	1	3301,79	0,01	0,9155
Error	1619624,71	6	269937,45		
Total	52263766,4	13			

5. Coeficientes de regresión y estadísticos asociados CU.

Coef.	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
Const.	14926,14	2166 0,53	-36292,9	66145,15	0,69	0,513		
NDVI	-43932,6	8175 1,41	-237244	149378,7	-0,54	0,6076	2,38	211,25
NDVI^2	60923,19	7377 1,49	-113519	235365	0,83	0,4361	2,72	211,25

6. Coeficientes de regresión y estadísticos asociados GO.

Coef.	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
Const.	15973,06	3344,56	8611,73	23334,39	4,78	0,0006		
NDVI	-58353,7	13986,5	-89137,8	-27569,6	-4,17	0,0016	18,04	80,38
NDVI^2	65338,97	13410,3	35823,09	94854,85	4,87	0,0005	23,84	80,38

7. Coeficientes de regresión y estadísticos asociados SF.

Coef.	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
Const.	-47224,5	24569,08	-99060,7	4611,74	-1,92	0,0715		
NDVI	161966	83271,2	-13720,8	337652,9	1,95	0,0685	5,63	787,44
NDVI^2	-112290	68347,1	-256490	31909,74	-1,64	0,1188	4,6	787,44

8. Coeficientes de regresión y estadísticos asociados ZA.

Coef.	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
Const.	-1824,1	52005,77	-116288	112639,8	-0,04	0,9726		
NDVI	11768,1	160705,4	-341942	365478,3	0,07	0,9429	2,09	341,4
NDVI^2	-2688,7	123071,4	-273567	268189,6	-0,02	0,983	2,08	341,4

9. Descripción de ambientes predefinidos.

Descripción de ambientes	
Ambiente A	Presenta sistemáticamente todos los años y para todos los cultivos analizados, valores de IVDN superior al promedio
Ambiente B	Presenta valores de IVDN inconsistentes en el tiempo, dependientes del año y/o del cultivo
Ambiente D	Presenta sistemáticamente todos los años y para todos los cultivos analizados, valores de IVDN inferiores al promedio
Sub- ambientes	
A1	Suelos aptos para el desarrollo de todos los cultivos sin ninguna limitante
A2	Suelos aptos para el desarrollo de todos los cultivos con una propiedad inferida limitante
A3	Suelos aptos para el desarrollo de todos los cultivos con más de una propiedad inferida limitante
B1	Suelos aptos para el desarrollo de algunos cultivos con limitaciones moderadas
B2	Suelos aptos para el desarrollo de algunos cultivos con limitaciones moderadas y requieren prácticas de manejo específicas
D1	Suelos aptos para el desarrollo de algunos cultivos con limitaciones severas corregibles
D2	suelos aptos para el desarrollo de algunos cultivos con limitaciones muy severas no corregibles
D3	Suelos no aptos para agricultura

CLASES - Posición del terreno

l	loma
ml	media loma
b	bajo

SUB CLASES - Impedimentos físicos y/o químicos, curvaturas			
s	Salinidad; sodio	Br	Brunosol
bt	Horizontes B texturales	Vrt	Vertisol
ts	Tosca	Psol	Planosol
a	Anegamiento	Lit	Litosol
ca	Calcáreo	Arg	Argisol
p	Pendiente	Lvsol	Luvisol
e	Erosión	H	Háplico
cv	Cóncavo	Prof	Profundo
cx	Convexo	Mp	Moderadamente profundo
Ar	Arenoso	Rut	Rúptico
di	Drenaje imperfecto	Ti	Típico
fert.b	Fertilidad baja	Lv	Lúvico
Ocr	Ócrico	Eu	Étrico
Mco	Melánico	Dstr	Dítrico
Sup	Superficial	c	Compactación

10. Nitrógeno absorbido a V10, Zanoni.

Parcela	Peso plantas(g)	%N	N(g)	N abs.(kg/ha)	NDVI
1	677	2,52	17,05	121,8	0,711
2	570	2,80	15,98	114,1	0,672
3	427	2,94	12,55	89,6	0,668
4	782	2,94	23,00	164,3	0,759
5	648	2,57	16,66	119,0	0,745
6	139	2,67	3,71	26,5	0,548
7	393	3,01	11,81	84,4	0,719
8	278	3,64	10,12	72,3	0,694

11. Nitrógeno absorbido a V10, Gottero.

Parcela	Peso planta(g)	%N	N(g)	N abs.(kg/ha)	NDVI
1	621	1,80	11,17	79,8	0,707
2	85	2,41	2,05	14,6	0,346
3	608	2,48	15,10	107,8	0,719
4	142	2,24	3,17	22,7	0,434
5	307	1,89	5,81	41,5	0,281
6	226	2,44	5,51	39,4	0,491
7	81	2,43	1,97	14,1	0,535
8	590	2,18	12,86	91,8	0,712
9	226	1,90	4,30	30,7	0,400
10	552	2,22	12,27	87,6	0,656