

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN AMBIENTES
DE DIFERENTE POTENCIAL PRODUCTIVO**

por

Gustavo Ariel POLAK VOSCOBOINIK

TESIS presentada como uno de los
requisitos para obtener el título de
Magíster en Agronomía, opción
Suelos y Aguas

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2019**

Tesis aprobada por el tribunal integrado por Ing. Agr. (Dr.) Sebastián Mazzilli, Ing. Agr. (PhD.) Mónica Barbazán, e Ing. Agr. (PhD.) Andrés Quincke, el 10 de diciembre de 2019. Autor: Ing. Agr. Gustavo A. Polak. Director Ing. Agr. (PhD.) Andrés G. Berger.

AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas a quien debo mi agradecimiento por hacer posible este trabajo, ya que fueron varios los que contribuyeron de una forma u otra para poder lograrlo. Fueron tres años de trabajo y cuatro sitios experimentales, de los cuales quiero agradecer a los responsables técnicos de los establecimientos: Hugo Figueredo, José Buzzi, Martín Álvarez y Álvaro Bertini por su gran apoyo. A la empresa ADP, en la cual trabajé ocho años y donde pude desarrollarme como profesional, institución que me brindó todo su respaldo a la hora de realizar mi tesis.

A mi amiga y mano derecha en mi profesión María Noel Pérez, quien dedicó largas horas ayudándome en todos los temas referentes a GIS (Sistemas De Información Geográfica) y sensoramiento remoto. A Ricardo Rondan compañero de trabajo y amigo que me acompañó y ayudó en los muestreos de campo.

Recuerdo las largas discusiones técnicas con mi tutor de tesis Andrés Berger, intercambios que no solo fueron de gran aprendizaje, sino que me dejaron más fascinado con la temática elegida, y que fueron claves para darle forma al planteo de esta tesis.

A su vez, están esas personas que me dan su apoyo constante en el día a día, que son mi esposa Cecilia y mis hijos Juan y Joaquina quienes “me aguantan” en este proceso de estudio, acompañándome en mi carrera profesional con gran confianza en mí. Por último, no puedo dejar de agradecer a “mi viejo” por haberme heredado esta profesión que me apasiona tanto como a él y a mi madre y hermanos que siempre me alentaron para poder obtener mi título y realizar mis logros.

TABLA DE CONTENIDO

	página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN.....	VI
SUMMARY.....	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1. VARIABILIDAD DENTRO DE LA CHACRA.....	2
1.1.1 <u>Determinantes de la variabilidad espacial</u>.....	3
1.2 ZONAS DE MANEJO.....	4
1.2.1 <u>Planimetría y altimetría</u>.....	5
1.2.2 <u>Agricultura de precisión</u>.....	5
1.2.3 <u>Medición y Análisis de la Variabilidad</u>.....	6
1.3 MONITOR DE RENDIMIENTO E IMÁGENES SATELITALES.....	7
1.3.1 <u>Monitores de rendimiento</u>.....	7
1.3.2 <u>Información proveniente de imágenes</u>.....	8
1.3.3 <u>Índice de vegetación normalizado</u>.....	8
1.3.4 <u>NDVI como estimador de rendimiento</u>.....	9
1.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS.....	10
1.4.1 <u>Análisis de Clusters y CART</u>.....	10
1.4.2. <u>Análisis geoestadísticos</u>.....	11
1.5 PROPIEDADES DE LOS SUELOS.....	12
1.5.1 <u>Definición de ambientes por propiedades químicas de los suelos</u>.....	12
1.5.2 <u>Propiedades físicas del suelo</u>.....	13
1.6 MANEJO DEL NITRÓGENO POR AMBIENTES.....	14
1.6.1 <u>Aspectos claves del uso del nitrógeno en maíz</u>.....	14
1.6.2 <u>Sensoramiento remoto y nitrógeno</u>.....	16
1.6.3 <u>Manejo del nitrógeno por ambientes y/o sitio específico</u>.....	17
1.7 HIPÓTESIS.....	20

2. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	21
2.1. CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO	21
2.1.1. <u>Descripción de los sitios</u>	21
2.1.2. <u>Ambientación o delimitación de zona de manejo de los</u> <u>sitios</u>	24
2.2. PRESCRIPCIONES DE NITRÓGENO	28
2.3. MUESTREOS DE SUELOS	30
2.4. MONITORES DE RENDIMIENTOS	31
2.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	33
3. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	34
3.1. SITIO “EL CURUPY”	35
3.2. SITIO “LAS TRES A”	39
3.3. SITIO “LA TACUARA”	42
3.4. SITIO “EL AHORRITO”	45
3.5. ANÁLISIS DE LOS SITIOS EN CONJUNTO	49
4. <u>CONCLUSIONES</u>	52
5. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	54
6. <u>ANEXOS</u>	58
6.1. RESPUESTA A DOSIS DE N SEGÚN ZONA DE MANEJO EN MAÍZ Y SORGO	58
6.2. SITIO “EL CURUPY”	73
6.3. SITIO “LAS TRES A”	76
6.4. SITIO “LA TACUARA”	80
6.5. SITIO “EL AHORRITO”	82

RESUMEN

Los suelos agrícolas presentan variación en sus propiedades químicas, físicas y biológicas, correspondiendo una parte de esta a la variabilidad natural y otra a la ocasionada por las prácticas agrícolas. En consecuencia, el rendimiento de los cultivos varía espacialmente, siendo el gran desafío actual predecir la forma y magnitud en que lo hacen y sus causas. El nitrógeno (N) es uno de los tres macronutrientes en la nutrición de maíz y sorgo, y uno de los nutrientes con más importante respuesta sitio-específica. El objetivo de este trabajo fue evaluar la respuesta en rendimiento de grano de maíz y sorgo a la fertilización nitrogenada en ambientes de diferente potencial dentro de una chacra. El estudio se realizó en cuatro sitios en el verano 2014/15 y 2015/16, y en cada sitio se diferenciaron tres ambientes definidos según su historial de rendimiento y características de suelo que determinan a priori diferente potencial: un ambiente con mayor potencial (A), un ambiente con menor potencial (D) y un ambiente con un comportamiento variable (B). El ensayo consistió en tres franjas de diferente dosis de N, dispuestas de manera que las franjas atravesasen los diferentes ambientes con tres repeticiones (nueve franjas). Las dosis de N en el momento de la prescripción fueron: 0, 48 y 104 kg ha⁻¹ en tres sitios y 0, 44 y 110 kg ha⁻¹ en el restante. En la dosis más baja de N, común a todos los ambientes, el rendimiento en grano fue significativamente diferente entre los distintos ambientes. En todos los sitios se encontró respuesta diferencial a dosis de N, siendo mayor la respuesta en los ambientes de bajo potencial. Algunos de estos ambientes presentaron menor valor de Potencial de Mineralización de N (PMN). En tres de los cuatro sitios se observaron diferencias en el rendimiento alcanzado con las máximas dosis de N, aunque no fue clara la asociación con ambientes clasificados como de mayor o menor potencial. Si bien en todos los sitios se constató una mayor respuesta al agregado de N en ambientes de bajo potencial, en la mitad de los sitios el rendimiento final logrado con las máximas dosis de N fue mayor en los denominados como alto potencial.

Palabras clave: Zonas de manejo; ambientes; maíz; nitrógeno.

SUMMARY

Chemical, physical, and biological properties are extremely variable in Uruguayan farming soils where the natural processes of soil formation and farming practices are the most important sources of variability. As a result, crop yields are influenced by the spatial variability across the field where the current challenge is to predict the shape, magnitude, and causes of that variability. Nitrogen (N) is one of the main macronutrients for corn and sorghum nutrition being in most cases the factor determining the crop yield potential, and showing an important site-specific response. The objective of this study was to evaluate corn and sorghum grain yield response to nitrogen fertilization in environments with different potential within a field. The study was conducted during summer 2014-2015 and summer 2015-2016 on “El Curupy”, “Las Tres A”, “La Tacuara”, and “El Ahorrito” farms which are under precision agriculture or agriculture by environments management practice. The criteria to differentiate management zones was based on the method proposed by the ADP S.A company as described in Bosh and Lecueder (2011) and Polak (2013). Main treatments consisted of 3 strips of different N rates, each strip was oriented across (transversally) the different management zones with three replicates (9 rows in total). The treatment rates were: 0, 48 y 104 kg N ha⁻¹. In this work, yield response was analyzed to nitrogen fertilization by management zones and experimental farms. All the management zones showed yield statistically different from the zero N treatment. In all experimental sites, differential yield response was found to nitrogen rate, where the highest response was observed in low potential management zones. Furthermore, in general it was also associated with management zones that presented the lowest values of potential nitrogen mineralization (PMN). In 3 out of 4 experimental sites, yield potential differences were observed (at non-limiting N rates) even though it was not clear the association with the management zone of higher or lower yield potential. Although in all sites, a greater response to N fertilization was found in low potential environments, in half of the sites the final yield achieved at non-limiting N was greater in high potential management zones.

Key words: Management zones; maize; corn; nitrogen.

1. INTRODUCCIÓN

El aumento del precio de los granos, en especial de la soja, y el valor de la tierra, han ocasionado la necesidad de producir en forma cada vez más eficiente, maximizando las ganancias por unidad de superficie. Las recientes preocupaciones por la conservación del medio ambiente, han impulsado el desarrollo de tecnologías que maximizan la eficiencia de uso de los agroquímicos en general, buscando maximizar la respuesta a los mismos, sin perder de vista el cuidado del medio ambiente.

La mayoría de los suelos agrícolas presentan variación en sus propiedades químicas, físicas y biológicas, siendo una parte variabilidad natural y otra resultante de las prácticas agrícolas (Bocchi y Castrignanó, 2007), constituyendo una situación típica de Uruguay (Ahunchain y Klaassen, 1990). En consecuencia, el rendimiento de los cultivos varía espacialmente.

Los sistemas de producción agrícola de Uruguay presentan el desafío constante de aumentar los niveles de producción en respuesta a una creciente demanda de la población mundial por alimentos. El camino para lograrlo no solo debe ser la expansión en superficie, sino que se debe incrementar el rendimiento y productividad por unidad de superficie. Como desafío anexo al aumento de la productividad, está el disminuir costos por hectárea o tonelada producida, para lograr avanzar hacia una producción nacional eficiente y rentable.

La nutrición vegetal en maíz y sorgo es una de las variables claves para la obtención de altos rendimientos en estos cultivos. Dentro de la estrategia de fertilización, el N es uno de los nutrientes principales, pudiendo ser, en muchos casos determinante del rendimiento final. Por otro lado, los esquemas de fertilización nitrogenada actual basados en datos promedios del sitio no resultan ser eficientes, ya que la variabilidad espacial del potencial de rendimiento es alta y las prácticas de manejo de N tradicionales no atienden a la variabilidad que existe entre y dentro de los sitios (Scharf et al., 2011). Esto provoca que diferentes zonas dentro una chacra queden subestimadas en su recomendación, y el nutriente se transforme en limitante mientras que otras queden sobreestimadas, provocando gastos excesivos y un

aumento de la probabilidad de pérdidas de N fuera del sistema. Bajo este esquema resulta clave generar estrategias que aumenten la eficiencia de este insumo, como lo es la fertilización variable.

Por otro lado, el potencial de rendimiento de cada ambiente es diferente en función de las propiedades físicas y químicas de los suelos, por lo que la expectativa de rendimiento será diferente en relación al potencial del ambiente. El uso de tecnologías de agricultura por ambientes o de precisión basados en sensoramiento remoto (utilizando por ejemplo el historial de imágenes de satélites o fotografías aéreas), estudios plani-altimétricos u otros constituyen una buena herramienta para delimitar y generar zonas de diferente potencial de rendimiento.

En este contexto, el objetivo general de este trabajo fue evaluar la respuesta de maíz y sorgo a la fertilización nitrogenada en ambientes de diferente potencial dentro de un sitio. Los objetivos específicos de este trabajo fueron: a) cuantificar la respuesta de la fertilización nitrogenada en suelos típicos de Uruguay; b) evaluar el impacto de la fertilización variable de N y el uso de la diferenciación de ambientes en la respuesta a este nutriente c) generar bases para la creación de futuros modelos de fertilización variable de N, que contemplen el total de información actual existente de los campos (mapas de ambientes o zonas, análisis de suelo georreferenciado, sensores remotos en tiempo real).

1.1 VARIABILIDAD DENTRO DE LA CHACRA

La variación en los factores que afectan la producción de cultivos que pueden existir dentro de una chacra puede ser dividida en tres clases: (1) natural (e.g. variación de tipo de suelo), (2) aleatoria (e.g.: precipitaciones) y (3) antrópica (e.g.: fertilización o densidad de siembra) (Plant, 2001). La interacción entre estas tres clases marca las diferencias productivas entre distintos sitios específicos de una misma chacra (Bongiovanni y Lowenberg-Deboer, 2004).

En Uruguay, la agricultura de secano se caracteriza por presentar una alta variabilidad climática y de ambientes edáficos, que determinan considerables variaciones en rendimientos entre años y a su vez importantes diferencias en la

respuesta vegetal dentro y entre chacras (Terra et al., 2010). Las características del suelo y del cultivo varían en el espacio (distancia y profundidad) y en el tiempo. La variación espacial se expresa en diferencias de producción en un mismo campo, en una misma zafra y en una misma cosecha (Mantovani et al., 2006; Roel, 2006). A pesar de ello el manejo uniforme de los cultivos es generalizado, ocasionando ineficiencias económicas y ambientales (Terra et al., 2010).

1.1.1 Determinantes de la variabilidad espacial

Una vez encontrada la variabilidad, se debe establecer una estrategia para manejarla. Desde el punto de vista técnico y económico, el cultivo se debe manejar según aquellas variables que tengan un alto efecto en la productividad, presenten mayor variabilidad y expliquen en mayor medida esa variabilidad en el rendimiento, siempre y cuando puedan ser controladas (Plant, 2001).

Entre los factores que afectan el rendimiento de los cultivos, se encuentran los que definen el potencial de rendimiento, como el genotipo, la radiación solar y la temperatura ambiente; los que determinan el rendimiento logable, como el agua y nutrientes y los reductores como malezas, enfermedades y plagas, que definen el rendimiento logrado (Soldini, citado por Otaño y Zarucki, 2010).

La variabilidad natural intrínseca de la chacra es aquella atribuible al suelo, a variables geológicas y topográficas. Esta es estructural de la chacra, mientras que las medidas de manejo como fertilizaciones, densidad de siembra, rotación, pueden determinar variabilidad antrópica dentro de la chacra. En Uruguay, por ejemplo, Ahunchain y Klaassen (1990) mencionan a la heterogeneidad del potencial del suelo como responsable de promedios de rendimientos bajos en cultivos y atribuyen las diferencias en potencial de producción a diferencias en los tipos de suelo y topografía.

1.2 ZONAS DE MANEJO

La consideración de la variabilidad dentro de las chacras permite delimitar diferentes ambientes productivos, posibilita manejar cada zona según sus características, en lugar de usar los promedios, tratando de maximizar la productividad y rentabilidad en algunos casos y en otros priorizar la sustentabilidad (Bragachini et al., 2000).

Terra et al. (2010) define las Zonas de Manejo (ZM) como sub- áreas dentro de la chacra donde se deberían expresar combinaciones relativamente similares de factores determinantes del rendimiento, en las que es apropiado un manejo homogéneo del suelo y los cultivos. Al respecto Webb y Loomis, citados por Otaño y Zarucki (2010) indican que los métodos de análisis de datos de rendimiento para determinar zonas, por lo general asumen que las mismas son limitadas por algún factor primario.

Según Miller et al., citados por Plant (2001), existen tres criterios básicos para la realización de un manejo sitio específico de una chacra: existencia de variabilidad en factores determinantes del rendimiento de los cultivos; que dicha variabilidad pueda ser identificada y cuantificada; y que esta información pueda ser usada para modificar el manejo con el fin de reducir el impacto ambiental y mejorar el beneficio económico. Por lo tanto, suponen que las diferencias en rendimiento entre zonas deben ser significativas y en ellas habría combinaciones homogéneas de factores que influyen en el rendimiento. Terra et al. (2010) plantean que para delinear zonas de productividad contrastante se deberían considerar los factores que influyen en variaciones sistemáticas de los cultivos y que las mismas pueden contener variantes según las condiciones ambientales, el cultivo y el manejo de los suelos utilizado, debiendo ser ajustadas en el tiempo.

Según Hatfield, citado por Gregoret et al. (2009), la variabilidad de los rendimientos dentro de un sitio se debe a la interacción entre distintas fuentes de variabilidad, que generan efectos que no siempre están en concordancia con los límites establecidos para un sitio. Una de las finalidades de la agricultura de precisión es identificar diferentes ambientes con cualidades semejantes, determinadas

principalmente por topografía y características edáficas, que se denominan zonas de manejo. Cada ZM tendría características homogéneas manifestadas en similares rendimientos, que permitiría optimizar la eficiencia en la utilización de insumos, maximizar el beneficio económico y minimizar riesgos de contaminación del ambiente por sobredosis de insumos.

1.2.1 Planimetría y altimetría

La planimetría es un elemento central en el proceso de zonificación, ya que permite ubicar el sitio en estudio, tener georreferenciados las áreas no dedicadas a la producción agrícola y, por lo tanto, conocer el área útil del sitio a manejar. Por otro lado, la altimetría también puede servir en la determinación de ambientes y zonas de diferente potencial, por ejemplo asociado a la dinámica del agua y los nutrientes.

Kravchenko y Bullock (2000) encontraron para chacras en Iowa que las características topográficas explicaron un 20% de la variación del rendimiento (6 a 54%) en donde los rendimientos altos fueron consistentemente ubicados en las zonas bajas (correlación negativa entre rendimiento y elevación). Cuando se analizó conjuntamente con las propiedades del suelo, éstas explicaron el 40% de la variación (10 a 78%).

La relación entre el régimen pluviométrico con la topografía y el rendimiento son contradictorias, explicadas principalmente por las diferencias del suelo y condiciones climáticas que se generaron (Kravchenko y Bullock, 2000). La altitud, suelos de textura fina y alto contenido de carbono orgánico y disponibilidad de agua se correlacionan positivamente con rendimiento, siendo la posición topográfica el factor más importante. En los años de precipitaciones moderadas estas relaciones perdían importancia (Kaspar citado por Martín et al., 2004).

1.2.2 Agricultura de precisión

Según Plant (2001) el principal objetivo del manejo sitio-específico es identificar el factor que en primer lugar afecta el rendimiento, siendo esa la principal

limitante del sitio. El manejo sitio-específico se ha transformado en un manejo por ambientes delineados a través del análisis de información surgida de monitores de rendimiento y diseñadas mediante la aplicación de la geoestadística que ha llevado a una disminución en los costos (Bongiovanni, citado por García, 2002).

Para delimitar ambientes, las diferencias en rendimiento deben ser mayores entre ambientes que dentro de ellos, y los factores que limitan el rendimiento deben ser los mismos dentro de un mismo ambiente. De esta forma, el número de ambientes óptimo es aquel que contempla el tamaño, variabilidad natural de la chacra y la practicidad del manejo que disminuya al máximo la varianza (Plant, citado por Roel, 2006). En este sentido la Agricultura de Precisión permite implementar estrategias de manejo sitio-específico para abordar la variabilidad espacio-temporal de la producción agrícola (Pierce y Nowak, citado por Gregoret et al., 2009), que favorecerían incrementos en rentabilidad al ajustar por ejemplo las dosis de fertilizantes según el tipo de suelo y otras condiciones del ambiente.

1.2.3 Medición y análisis de la variabilidad

En general, para definir ambientes se utiliza la información de relevamientos planimétricos y altimétricos, monitores de rendimiento, imágenes satelitales y muestreo de suelos. Esta información se procesa utilizando métodos que incorporan la variabilidad espacial (geoestadística) y el análisis multivariado. Para aumentar la precisión en la definición de los ambientes, recientemente se han incorporado tecnologías basadas en el montaje de cámaras multiespectrales y térmicas en aviones tripulados y no tripulados. Esto permite independizarse del clima para la obtención de imágenes, así como también obtener mayor resolución espacial. Con el desarrollo de estas tecnologías se podría hacer un uso más “racional” de insumos como fertilizantes o enmiendas en ambientes delimitados.

1.3 MONITOR DE RENDIMIENTO E IMÁGENES SATELITALES

1.3.1 Monitores de rendimiento

Cada dato de rendimiento es representativo de un área correspondiente al ancho de la plataforma de la cosechadora y a la distancia recorrida por ésta en un tiempo dado (Bragachini et al., 2000). Esta capa de información tiene la ventaja de ser una variable directa del rendimiento, a diferencia de las capas de imágenes multispectrales aéreas o satelitales que son variables indirectas del rendimiento. Pero éstas presentan la desventaja de la falta de historial, como también de información confiable, ya que muchos de los mapas de rendimientos que tienen las chacras no están calibrados o presentan errores al tomar los datos. Partiendo de la premisa de que la variación temporal es igual o más importante que la espacial, esto termina siendo una limitante importante según Whelan y McBratney, citados por Terra et al. (2010). Por otro lado esta herramienta es útil para verificar la eficiencia de las zonas delineadas para detectar diferencias en productividad (Fraisse et al., citados por Roel, 2006). El monitor de rendimiento no solo es una capa de información para definir ambientes, sino que también es clave para definir el rendimiento alcanzable de cada ambiente. Al disponer de varios años de monitor de rendimiento se puede definir el rendimiento promedio de cada ambiente o el máximo alcanzable, datos claves para la definición de estrategias o rotaciones. Otra utilidad de significativa importancia en el uso de monitores es la de evaluación de ensayos o pruebas de campo.

Sin embargo, la generación de ZM a partir de mapas de rendimiento es cuestionada por Stafford et al., citado por Plant (2001) por considerarla insuficiente. En esta misma línea existen autores que afirman que la variación temporal es frecuentemente superior a la espacial, lo cual estaría cuestionando la validez de ZM determinadas en un año y un cultivo específico (Whelan y McBratney, citados por Terra et al., 2010). Bajo este esquema, el monitor es una información de evaluación, que permite cuantificar el rendimiento diferencial entre ambientes como también entre tratamientos dentro de un ensayo. Por lo tanto, esta herramienta brinda

información que luego se debe correlacionar con características físicas y químicas del suelo, distintos manejos anteriores, rotaciones y fertilización (Bragachini et al., 2000).

1.3.2 Información proveniente de imágenes

La información obtenida por satélites o aviones que caractericen las condiciones del suelo o el crecimiento y desarrollo de un cultivo puede ser muy útil en el manejo sitio-específico, siendo además de un relativo bajo costo (Mooran et al., Senay et al., citados por Plant, 2001). Esta información debe ser procesada e incorporada a la información previa, para luego analizar una posible relación entre las variables medidas y las condiciones de manejo, propiedades del cultivo y del suelo que afectan el rendimiento (Bragachini et al., 2000).

1.3.3 Índice de vegetación normalizado

Para la elaboración del Índice de Vegetación Normalizado (IVDN) o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), se parte de la base que el suelo y el cultivo reflejan la radiación solar de manera distinta (Perry y Lautenshlager, citados por Seidl et al., 2000). En distintos experimentos se han alcanzado buenas aproximaciones del estado sanitario del cultivo e incluso estimación del rendimiento a partir del NDVI.

La mayoría de las imágenes obtenidas por percepción remota de índice verde que están sin calibrar pierden cierta capacidad de explicar diferencias en el crecimiento del cultivo en biomasa o índice de área foliar (IAF). Dicha ausencia de calibración resulta en que no es posible diferenciar zonas distintas dentro de la chacra (Seidl et al., 2000). La calibración es fundamental para poder utilizar los datos de índice verde como input en modelos de crecimiento de cultivos. La calibración se realiza a través de un algoritmo de optimización entre el rendimiento observado y el rendimiento estimado para disminuir la suma de cuadrados del error (Goffe et al., citado por Seidl et al., 2000).

Para el cálculo del NDVI, con valores entre 0 y 1 se aplica la siguiente fórmula:

$$\text{NDVI} = \text{NIR-RED} / \text{NIR} + \text{RED}$$

NIR: Infrarrojo cercano

RED: Rojo

Según Viñas (2004) el NDVI es afectado por la presencia de nubes, pero no es afectado en gran magnitud por la presencia de partículas en la atmósfera, por lo que se puede decir que el índice es robusto, anulando el efecto de la atmósfera. El NDVI se satura por encima de valores de IAF de 2 (dependiendo del tipo de vegetación), siendo este índice a su vez el mejor índice para detectar cambios en la vegetación a bajos valores de IAF verde (<2). (Viñas, 2004)

1.3.4 NDVI como estimador de rendimiento

Existen diversos estudios empíricos que afirman que el NDVI es un buen estimador de biomasa y de rendimiento de ciertos cultivos agrícolas. Ma et al. (2001) plantean que el NDVI tiene un uso potencial rápido, confiable y repetible. Es un indicador para proyectar y estimar rendimiento en grano. Para el caso de la soja dichos autores encontraron una alta y positiva correlación entre ellos con mejoras progresivas de R4 a R5, respecto de R2. Según Seidl et al. (2000) la relación entre índice verde y rendimiento sigue una tendencia lineal para soja antes de comenzar el proceso de senescencia, habiéndose reportado coeficientes de correlación entre 0,5 y 0,6 entre estas variables. Distintos autores encontraron una alta correlación entre el NDVI y el rendimiento de trigo (Yuzhu, Benedetti and Rossini, citados por Plant, 2001), aunque varió mucho cuando se analizaron distintos cultivares (Ball y Frazier, citados por Plant, 2001). Martín et al. (2004) encontró una alta correlación entre rendimiento y NDVI en zonas bajas de la chacra con pendientes suaves, con alto carbono orgánico y elevada conductividad eléctrica.

Sin embargo, algunos estudios no han encontrado ninguna relación entre el NDVI y rendimiento (Plant, 2001). Las causas son varias y entre ellas se menciona

que el NDVI se relaciona con IAF, color de las hojas y biomasa por encima del suelo, pero no directamente con otras variables que también definen el rendimiento. También se plantea que este indicador debería tomar en cuenta la estructura genética del canopeo (Ma et al., 2001). En esta misma línea, Martín et al. (2004) encontró que el NDVI presenta limitaciones en su habilidad para determinar el estatus nutricional y energético de la planta en estados avanzados en donde la canopia ya está completamente desarrollada. Existen resultados contrastantes respecto de este indicador para estimar rendimiento en grano de soja. Según Plant (2001) el NDVI no es del todo eficiente para aquellos cultivos en donde el material vegetal no es el componente económico y este último depende de distintos factores como índice de cosecha y calidad.

1.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

1.4.1 Análisis de Clusters y CART

Existen varios métodos estadísticos que ayudan a estudiar la variabilidad de datos de una variable: los análisis de Clusters y la Classification And Regression Trees (CART). El objetivo del análisis de Clusters es generar agrupación de datos que minimicen la varianza dentro ellos y la maximicen entre ellos (Roel, 2006). Por otro lado, la herramienta CART es un método no paramétrico, que no necesita que sus datos presenten una distribución normal (Roel, 2006). En la conformación del árbol de regresión y clasificación se trabaja con múltiples estructuras de datos en distinto tiempo y espacio, que permiten identificar las distintas variables que están afectando y a qué nivel (Plant, citado por Roel, 2006).

Este tipo de análisis tiene varias ventajas sobre el uso de métodos de regresión lineal clásica: 1) no hay necesidad de especificar en forma funcional y verificar que se ajuste a los datos a los supuestos de un modelo lineal (ejemplo distribución normal, varianzas homogéneas, observaciones independientes); 2) selecciona las variables en forma automática; 3) minimiza el efecto de los valores extremos, aislándolos en pequeños nodos, y 4) aísla el efecto de las variables a las partes del

árbol, para descubrir la dependencia del contexto y las interacciones entre las variables (Plant, citado por Otaño y Zarucki, 2010). Plant (2001) encontró que la metodología de análisis de CART es una valiosa y objetiva información para la conformación de ZM y útil en describir la relación entre variables de respuesta y variables explicativas como pueden ser las propiedades del suelo.

1.4.2 Análisis geoestadístico

El análisis de datos con un componente espacial se denomina geoestadística (Plant, 2001). El análisis geoestadístico contempla dos etapas: la primera, el análisis estructural, en la cual se describe la correlación entre puntos en el espacio. En la segunda se hace predicción en sitios de la región no muestreados por interpolación. En la mayoría de las variables, observaciones cercanas en el espacio son más semejantes entre sí que con aquellas más distantes, por lo que la distribución espacial de dichos atributos no es independiente (Plant, 2001, Best y León, 2006). Esta interpolación de datos a espacios que no contienen información se basa en el principio de autocorrelación o asociación espacial. Si la variable bajo estudio muestra un patrón aleatorio, no existe autocorrelación espacial y no es posible representarlo en un mapa (Best y León, 2006).

En los métodos de medición continuos, medidas de la variable son obtenidas en todo el campo y se obtienen mediante técnicas de sensoramiento remoto como las imágenes satelitales, y monitores de rendimiento. En los métodos de muestreo discretos, se relevan algunos sitios predeterminados y sólo algunos puntos de la chacra son observados (Mulla y McBratney, citados por Pravia, 2009). Una de las herramientas ampliamente utilizadas para la descripción espacial de los conjuntos de datos corresponde al semivariograma y es de gran importancia para realizar una correcta interpolación, utilizando el método de kriging (Best y León, 2006).

El semivariograma es una descripción matemática de la relación entre la varianza entre pares de observaciones (puntos de datos) y la distancia que separa esos puntos (h). En un semivariograma teórico se distinguen los parámetros “Co” el efecto pepita, “rango” la distancia a la cual se estabiliza la semivarianza y a partir de donde

ya no existe correlación entre pares de puntos, y “C + Co” los valores de semivarianza.

1.5 PROPIEDADES DE LOS SUELOS

1.5.1 Definición de ambientes por propiedades químicas de los suelos

Las propiedades químicas de los suelos presentan variabilidad espacial, no siendo la misma para todas las variables. Los parámetros como pH, carbono orgánico y textura presentan baja variabilidad espacial, mientras que la conductividad eléctrica y el fósforo (P) son de alta variación, según lo mencionado por Mulla y MacBratney citados por Terra et al. (2010). El carbono orgánico o la materia orgánica (MO) es un indicador de la calidad del suelo. Por lo general, suelos con mayor nivel de MO son más productivos como también más ricos en los niveles de nutrientes esenciales para el normal desarrollo de los cultivos. Kravchenko y Bullock (2000) encontraron niveles mayores de MO en zonas topográficas más bajas. Ésta fue la propiedad del suelo que presentó mayor correlación con el rendimiento de soja siendo alta y positiva para valores de análisis de MO inferiores a 3%.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es la cuantificación de la capacidad del suelo de retener cationes y se expresa como meq/100 g. Las posiciones de intercambio están ocupadas por cationes como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , H^+ , Al^{3+} , Mn^{2+} y Fe^{3+} (Durán et al., 1997). El valor absoluto de las bases que presentan los suelos es una información relevante para la interpretación de las propiedades químicas de los mismos, y también el valor relativo a la CIC. Según Durán et al. (1997) para los suelos del Uruguay son de 70-80% para Ca, 10-20% para Mg, y 10% para K y Na, expresados como % de bases totales. Asimismo, si el suelo presenta cantidades absolutas de Ca, Mg y K adecuadas, la relación entre ellos no influye en el rendimiento del cultivo ya que la disponibilidad total de los mismos es más importante (Liebhardt, citado por Kopittke y Menzies, 2007).

1.5.2 Propiedades físicas del suelo

Propiedades del suelo como la capacidad de retención de agua, drenaje, perfil de suelo explorable por raíces y fertilidad fueron identificadas como las causas más importantes de la variabilidad espacial del rendimiento en soja (Irmak et al., 2001). La estimación precisa de propiedades del suelo que influyen en el estrés hídrico es la clave para explicar la variabilidad en el rendimiento. En años secos es más frecuente encontrar correlaciones estrechas entre rendimiento y profundidad del perfil. El volumen de suelo explorado por las raíces determina la cantidad de agua disponible para el cultivo y se relaciona, entre otros aspectos edáficos, con su textura (Álvarez et al., 2009). Perfiles con mayor cantidad de arcilla presentan una menor disponibilidad de agua hacia las raíces (Irmak et al., 2001). Según Cox et al., citados por Martín et al. (2004) las áreas con mayor arcilla tuvieron mayor rendimiento, atribuible a una mayor cantidad de agua disponible durante periodos secos. Por otra parte, el efecto de la arcilla en años con precipitaciones normales podría ser opuesto y reducir el rendimiento. En el mismo sentido, sub-horizontes arcillosos significaron menor disponibilidad de nutrientes traduciéndose en menores rendimientos (Irmak et al., 2001).

La productividad depende también de la profundidad a la que se encuentra el horizonte textural (Bt). Álvarez et al. (2009) registró una caída lineal de los granos de soja fijados a medida que el horizonte Bt se encontraba por encima de una profundidad de 41 cm. La determinación del límite superior de este horizonte puede orientar acerca del potencial productivo de la chacra y plantear estrategias de manejo acordes. La alta variabilidad que presenta la profundidad a la que se encuentra el horizonte argilúvico en escalas reducidas, restringe la implementación de estrategias diferenciales de manejo de los cultivos.

1.6 MANEJO DEL NITRÓGENO POR AMBIENTES

1.6.1 Aspectos claves del uso del nitrógeno en maíz

El N con frecuencia limita el crecimiento y el rendimiento del maíz, debido a que las plantas requieren cantidades relativamente grandes de este elemento (de 1,5 a 3,5% de peso seco de la planta) y a que la mayoría de los suelos no tienen suficiente N en forma disponible para mantener los niveles deseados de producción (Below, 2002). 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).

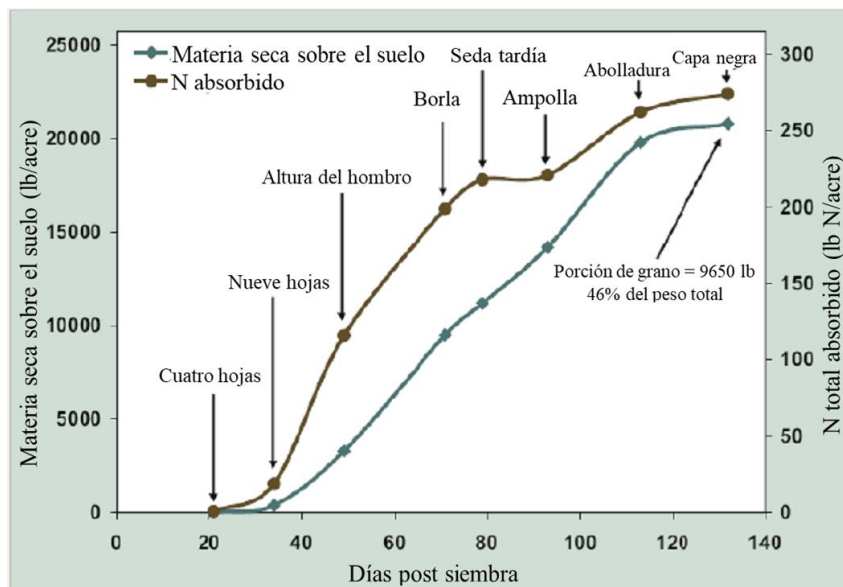


Figura 1. Acumulación de materia seca por encima del suelo y absorción de N para un rendimiento de 13 Mg ha⁻¹. Fuente: Adaptado de Mengel (1995)

La dinámica de absorción del N por parte del maíz, difiere en las distintas etapas del cultivo (Figura 1). 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 estilos) el consumo de N crece de manera importante y en poco más de un mes se consume del orden del 45% del total de N 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).

El maíz utiliza aproximadamente el 75% del total del N absorbido desde el suelo en la formación de sus órganos reproductores. Si en el período comprendido entre una a tres semanas antes de la aparición de los estilos y una a dos semanas después (período crítico de determinación de rendimiento) de dicho período la planta sufre carencia de N, la producción de grano se verá perjudicada de forma grave e irreversible (Oyarzun, 2010).

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 es bajo (Below, 2002).

Las prácticas actuales de manejo de N no atienden a las variabilidades que existen entre campos y dentro de los campos (Scharf et al., 2011).

Según Yule y Pullanagari (2009) una baja eficiencia del uso del N (EUN) puede ser debida a:

- Baja sincronía entre las prácticas de manejo del N en suelo y la demanda del cultivo.
- Aplicación uniforme de N en un paisaje variable que produce requerimientos de N diferenciales.
- Fallas al aplicar el fertilizante, determinando que no se alcancen los objetivos de la aplicación, resultando en un subóptimo uso del fertilizante.

- 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 entienden que, para lograr una óptima aplicación de N, se deben tener en consideración los siguientes elementos:

- Un método confiable en tiempo real para la determinación del crecimiento del cultivo.
- Un plan de acción para maximizar la utilización del fertilizante basado en el aspecto anterior y en el ambiente del cultivo.
- Un método seguro de estimar precisamente la cantidad correcta de fertilizante a agregar en cualquier punto de la chacra.
- El sistema debe de ser económicamente viable.

1.6.2 Sensoramiento remoto y nitrógeno

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 emplear el sensoramiento remoto de parámetros agronómicos incluyen: 1) empíricos (parámetros estáticos) correlaciones entre medidas a campo de distintos parámetros e índices de vegetación (IVs); 2) inversión del parámetro agronómico desde modelos físicos basados en la reflectancia del canopeo y 3) estimación usando una red neural (Neural Network) (Hatfield et al., 2008).

Antes de tratar de aplicar un algoritmo particular para el sensoramiento remoto, es importante entender precisamente la naturaleza de la característica a ser estimada. Después de un entendimiento completo biofísico de la característica de interés, entonces será posible evaluar algoritmos de sensoramiento remoto, sus potenciales y limitaciones. Desde esta perspectiva, el sensoramiento remoto sigue luchando para encontrar un simple y unificado acercamiento al monitoreo vegetal (Viñas, 2004).

En un estudio realizado en Missouri, EEUU, dónde se aplicó N en base a la relación entre los valores de reflectancia de la zona objetivo y los valores del área de

referencia de N alto se encontró que existe poca evidencia de que las dosis aplicadas según el sensoramiento remoto pueden aumentar el rendimiento frente a aquellas utilizadas por el productor (Scharf et al., 2011). 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). Por lo tanto, esta herramienta podría ser muy útil para lograr aumentar la EUN. Sobre este aspecto, Melchiori et al. (2006) estudiando la EUN en maíz en Entre Ríos, Argentina encontró que este parámetro fue significativamente mayor cuando la refertilización se llevó a cabo en base a sensoramiento remoto, con una diferencia de 8,4 kg de grano kg de N aplicado⁻¹ (80.3 vs 71.9 kg de grano kg de N aplicado⁻¹ para sensoramiento remoto y dosis fija respectivamente).

1.6.3 Manejo del nitrógeno por ambientes y/o sitio específico

El N es uno de los nutrientes con importante respuesta sitio-específica (Bongiovanni, citado por Gregoret et al., 2009). Para optimizar la fertilización con N es importante determinar relaciones sitio-específicas entre variables del suelo y la respuesta del cultivo. En Córdoba, Argentina, Gregoret et al. (2009) evaluando la respuesta sitio-específica de cultivos de maíz según niveles de N disponible, encontró que los rendimientos de maíz variaron según zonas de manejo y se relacionaron con la disponibilidad de agua y N del suelo y con los niveles de fertilización a la siembra. Esta variación estuvo comprendida entre 6.632 y 9.735 kg ha⁻¹ en la zona de baja productividad, 6.981 y 10.434 kg ha⁻¹ en la de alta productividad y 8.330 y 14.258 kg ha⁻¹ en las parcelas con riego (Gregoret et al., 2009).

La dosis óptima agronómica de N o cantidad de este nutriente necesario para alcanzar el rendimiento máximo, considerando el perfil hasta 60 cm para N y hasta 200 cm para el agua útil inicial en cada zona manejo, fue de 285, 184 y 162 kg ha⁻¹ para las zonas de mayor a menor productividad. Por otra parte, la dosis óptima económica (DOE) de N o cantidad del nutriente necesario para alcanzar el máximo

retorno económico al fertilizar fue de 171, 111 y 90 kg ha⁻¹, respectivamente (Gregoret et al., 2009).

El uso de la fertilización diferencial por ZM requiere la comprensión de las necesidades de N por el cultivo, de la eficiencia de su utilización, de la capacidad del suelo de suministrar N y de los patrones temporales de consumo y utilización del maíz en relación con la oferta de N (Hatfield, citado por Gregoret et al., 2009). Los principios generales del manejo sitio-específico son transferibles entre regiones, pero las estrategias de fertilización con dosis variable (FDV) deben ser modeladas localmente porque las condiciones edáficas y climáticas son variables (Bongiovanni, citado por Gregoret et al., 2009).

Trabajos de Gregoret et al. (2009) sobre maíz en la localidad de Manfredi, Argentina arrojaron contenidos y distribución en el perfil de N-NO₃ diferentes según ZM, principalmente en términos de la disponibilidad de N-NO₃ (mayor en la ZM alto potencial que en ZM de bajo potencial). Si bien las diferencias en el N disponible al inicio entre ZM fueron pequeñas (5,4 y 10,4 kg de N ha⁻¹ para 0-60 y 0-200 cm, respectivamente), estas diferencias, asociadas a diferencias en el contenido de agua inicial mostraron ser suficientes para generar ambientes productivos diferentes. Resultados similares fueron reportados por Zubillaga, citados por Gregoret et al. (2009) quienes encontraron que la distribución espacial de algunas variables edáficas no fue aleatoria, sino que los sitios de mayor productividad coincidieron con los de mayores concentraciones de N total y humedad inicial.

Gregoret et al. (2009) en trabajos sobre maíz, encontraron que en un mismo nivel de disponibilidad de N se observa una mayor absorción neta de agua edáfica en el período de seis hojas desarrolladas (V6) a post - floración (R2) en la ZM de alto potencial respecto a la de bajo potencial. La diferencia de absorción entre zonas fue 40 mm, sugiriendo un mayor desarrollo de raíces por mayor disponibilidad de agua en el perfil en el ambiente de alto potencial.

A partir del ajuste de la regresión espacial de la respuesta del maíz al N del fertilizante (Nf) y las ZM se observó que la respuesta al Nf difirió según ZM y son diferentes al promedio del lote, siendo mayores en zonas de alto potencial que de bajo potencial. Esta diferencia significativa entre variables ZM sugiere la existencia

de variables sitio-específicas que interactúan con el Nf, tales como el N y agua a la siembra, y que no son homogéneas en todo el lote (Gregoret et al., 2009).

Similares conclusiones se encuentran en el trabajo de Paganni (2014) en zonas húmedas de Argentina, donde las condiciones que determinan mayor rendimiento de un cultivo no necesariamente determinan mayor respuesta a la aplicación de N (y por ende mayor DOE) y viceversa. Lo mismo fue reportado en el cinturón maicero donde no se encontró relación entre la DOE de N y el rendimiento de maíz alcanzado al nivel de N económicamente óptimo (Paganni, 2014). En ese mismo trabajo, se encontraron mayores rendimientos de los cultivos en zonas bajas dentro del lote en comparación a zonas más elevadas, asociadas según el autor a que las zonas más deprimidas poseen mayor contenido de MO, texturas más finas y mayor disponibilidad hídrica que zonas altas del sitio. Si se utilizara el modelo de rendimiento objetivo, la dosis de N recomendada en las zonas deprimidas (bajas) sería consistentemente mayor que en las zonas elevadas del campo (lomas). Para el autor, este criterio no tiene en cuenta que, en las zonas deprimidas la DOE de N puede verse reducida con respecto al promedio del sitio debido al mayor aporte de N del suelo por mineralización, asociado al relativamente alto contenido de MO. Por otro lado, en años húmedos el agua deja de ser un factor limitante en las áreas de mayor elevación (textura más gruesa y menor contenido de MO) y suelen observarse altas respuestas a la aplicación de N debido al relativo bajo aporte edáfico. Esto determina que el modelo de fertilización por rendimiento objetivo por sí solo presenta falencias.

En la misma línea, trabajos realizados por Jaynes, citados por Pagani (2014), muestran variaciones significativas en la respuesta del cultivo de maíz a la aplicación de N y por lo tanto en la DOE según la posición del paisaje. Las áreas deprimidas presentaron mayor rendimiento y menor respuesta a N, en comparación a las zonas altas donde el rendimiento fue menor pero la respuesta a N mayor. Consecuentemente, la DOE de N presentó un comportamiento inverso, incrementándose al elevarse la posición en el paisaje.

1.7 HIPÓTESIS

La hipótesis de este estudio es que el rendimiento diferencial entre un ambiente de alto y bajo potencial a dosis cero de N en el momento de la prescripción es consecuencia de las propiedades edafológicas propias de cada ambiente.

Los ambientes de altos potencial explican su comportamiento por una mayor PMN y N total respecto a los ambientes de bajo potencial.

Las zonas de menor potencial tendrán una mayor respuesta al agregado de N, debido a un menor aporte de N por parte del suelo y su rendimiento final será menor que sitios de alto potencial como consecuencia de otras limitaciones del ambiente como la capacidad de almacenamiento de agua disponible (CAAD), profundidad del perfil, etc.

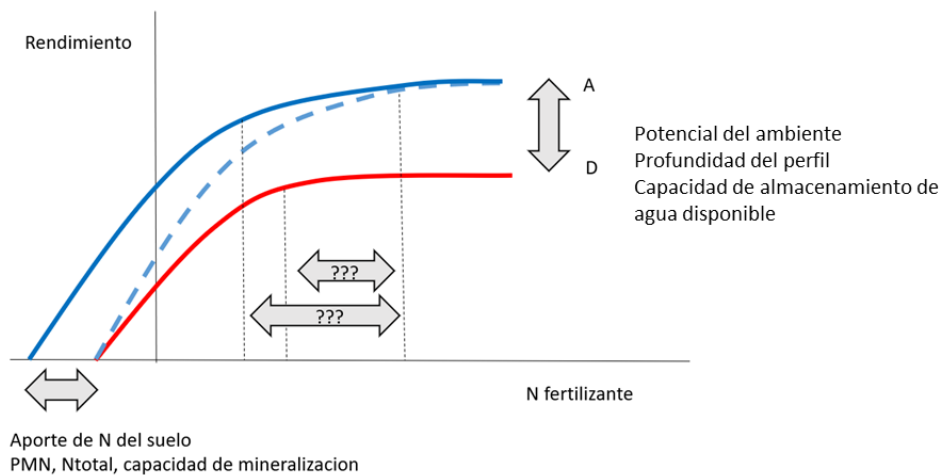


Figura 2. Respuesta teórica de la aplicación de nitrógeno en ambientes de diferente potencial. Línea continua azul: ambiente de alto potencial, línea roja: ambiente de bajo potencial, línea punteada azul: ambiente de alto potencial con bajo PMN, líneas punteadas verticales: niveles de N en los que deja de haber respuesta.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ENSAYO

2.1.1 Descripción de los sitios

El estudio se realizó en cuatro sitios en las zafras de verano 2013-2014, 2014-2015 y 2015-2016 en los establecimientos “El Ahorrito”, “El Curupy”, “La Tacuara” y “Las Tres A”. Los predios están ubicados en los Departamentos de Soriano y Río Negro.

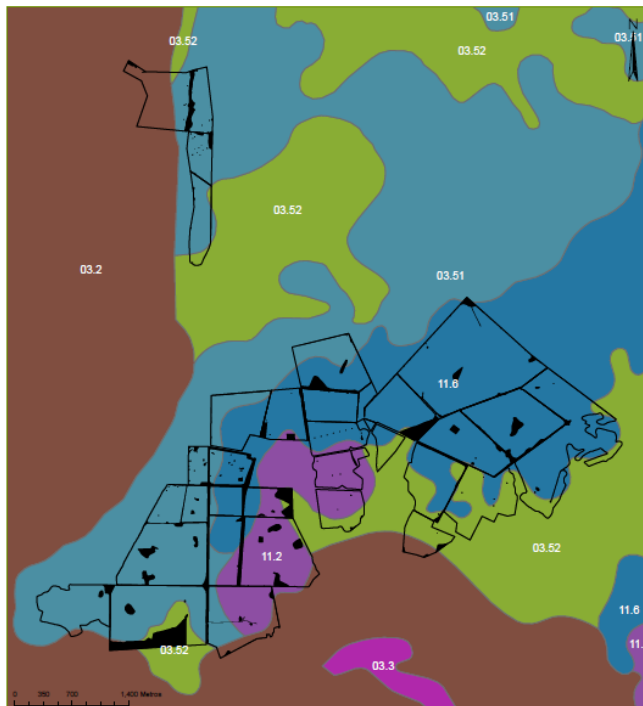
Cuadro 1. Relevamientos planimétricos de los sitios en estudio.

Sitio	Coordenadas	Área total (ha)	Área útil (ha)	Área de desperdicios (ha)
El Curupy	33°29'37.96"S 58°20'5.30"O	1322	1230	93
El Ahorrito	33°40'35.26"S 58°14'19.93"O	232	224	8
Las Tres A	31°35'14.88"S 57°57'7.75"O	774	764	11
La Tacuara	33° 1'36.03"S 57°17'17.28"O	668	565	103

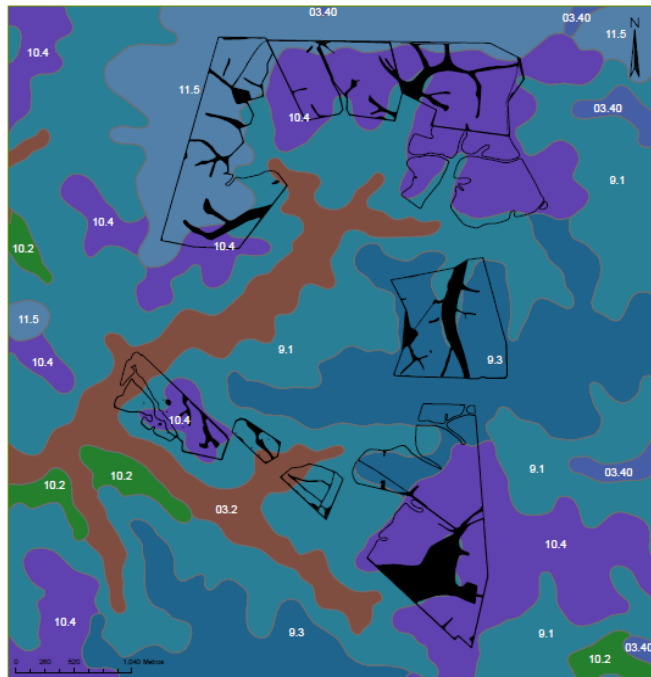
ESTABLECIMIENTO EL AHORRITO



ESTABLECIMIENTO EL CURUPY



ESTABLECIMIENTO LA TACUARA



ESTABLECIMIENTO LAS TRES A



Figura 3. Planos de los sitios superpuestos sobre mapa CONEAT, escala 1-20000. Fuente: MGAP (1967).

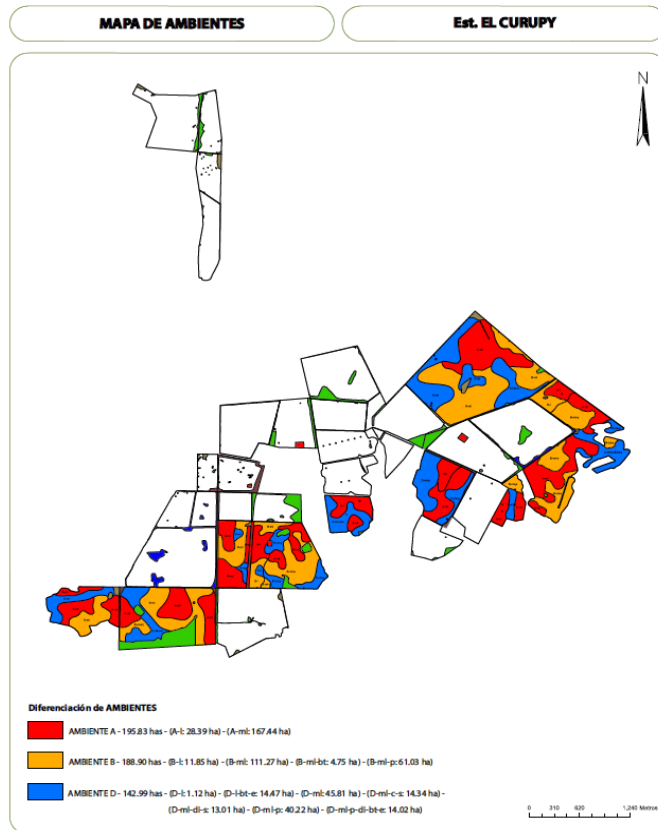
2.1.2 Ambientación o delimitación de zonas de manejo de los sitios

Los criterios para diferenciar ambientes se basaron en el método propuesto por la empresa ADP S.A descrita por Bosh y Lecueder (2011) y Polak (2013). La ambientación del campo se hizo a través de estudios planimétricos y altimétricos, historial de imágenes satelitales, monitores de rendimientos de zafras pasadas y correlación a campo de la información recabada. Además de esto se ajustó la precisión del mapa de ambientes por medio de imágenes aéreas tomadas por un vehículo aéreo no tripulado (UAV), comúnmente conocido como dron, el cual cuenta con tres cámaras (multiespectral, térmicas y Go-Pro o de alta definición), lo que permitió trabajar con mayor resolución. La resolución del píxel de la imagen obtenida por el UAV es de 30 cm x 30 cm, mientras que la resolución del píxel obtenido por la imagen satelital es 30 m x 30 m. Con esto se delimitó con mayor exactitud las zonas o ambientes de diferente potencial.

Con el mapa de ambientes se definieron tres zonas o ambientes de diferente potencial: un ambiente “A”, que es aquel en el cual todos los años, independientemente de las condiciones climáticas y/o tipo de cultivo sembrado, se logran 30 % o más de rendimiento que el promedio del campo; un ambiente “D”, en el cual todos los años los cultivos sembrados siempre rinden menos, siendo un 30 % o menor al rendimiento promedio de la chacra. Por último, se identifica el ambiente “B” que es aquel que se comporta como irregular; dependiendo del clima, del cultivo sembrado o de ambos, pudiendo comportarse como “A” o “D” según las condiciones establecidas.

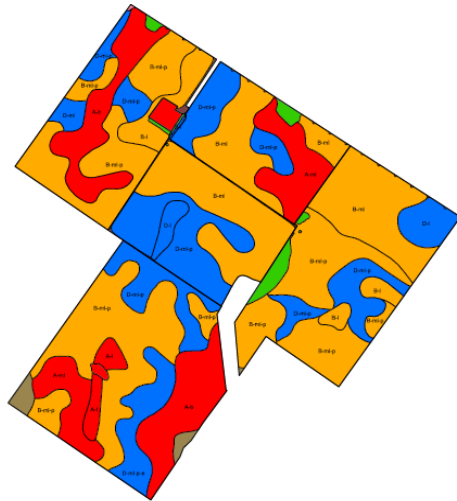
Dentro de cada ambiente se diferencian clases según la ubicación topográfica en la chacra, siendo “ml” (media loma), “l” (loma), “b” (bajo). También se diferencian subclases según los impedimentos físicos y/o químicos; pudiendo ser: “s” (salinidad), “bt” (horizontes B texturales), “ts” (tosca), “a” (anegamiento), “c” (compactación), “p” (pendiente), “e” (erosión), “cv” (cóncavo), “cx” (convexo). Ej: Ambientes D-l-ts: Ambientes de consistentemente baja productividad, de posición en el terreno loma, con tosca que limita la producción de los cultivos.

Una vez definidos los ambientes, estos se clasificaron como “Alto” y “Bajo” en función de su rendimiento sobre la franja testigo (dosis cero N en el momento de la prescripción). Esto significa que en ciertos casos un ambiente A puede ser clasificado como “Bajo”, mientras que el D como “Alto” dependiendo de dicho rendimiento.



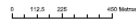
MAPA DE AMBIENTES

Est. EL AHORRITO



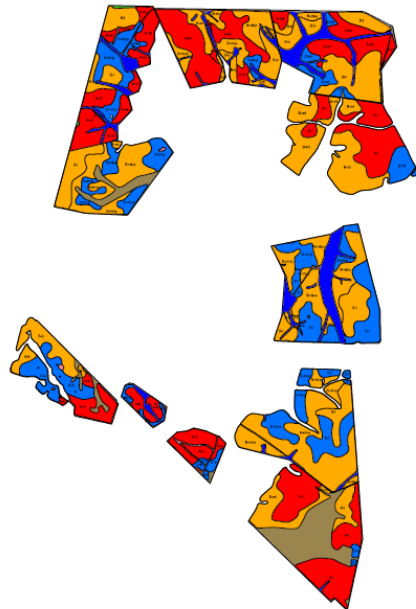
Diferenciación de AMBIENTES

- AMBIENTE A - 42.59 has - (A-b: 24.10 ha) - (A-c: 3.17 ha) - (A-m: 15.23 ha)
- AMBIENTE B - 124.98 has - (B-b: 7.75 ha) - (B-m: 46.25 ha) - (B-mi-p: 70.98 ha)
- AMBIENTE D - 55.94 has - (D-b: 63.4 ha) - (D-m: 1.72 ha) - (D-mi-p: 40.22 ha) - (D-mi-p-e: 7.67 ha)



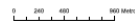
MAPA DE AMBIENTES

Est. LA TACUARA



Diferenciación de AMBIENTES

- AMBIENTE A - 173.45 has - (A-b: 24.83 ha) - (A-cv: 0.95 ha) - (A-c: 67.22 ha) - (A-m: 79.95 ha)
- AMBIENTE B - 268.03 has - (B-b: 32.15 ha) - (B-cv: 5.88 ha) - (B-c: 71.75 ha) - (B-m: 48.65 ha) - (B-mi-p: 109.60 ha)
- AMBIENTE D - 123.29 has - (D-b: 18.44 ha) - (D-c: 36.63 ha) - (D-m: 14.51 ha) - (D-mi-p: 53.71 ha)



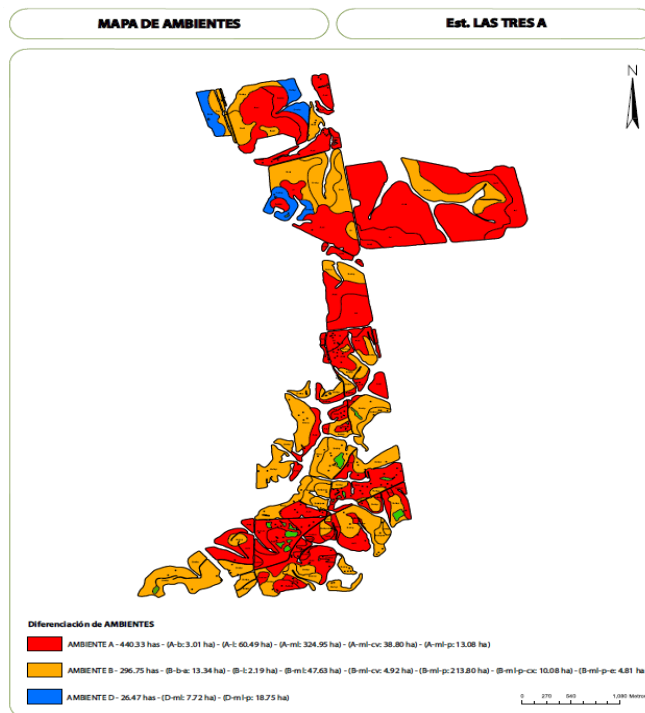


Figura 4. Mapas de ambientes de los predios bajo estudio. Fuente: Zonificación elaborada según procedimiento descrito por Bosh y Lecueder (2011) y Polak (2013). Nota: Ambientes A: siempre presenta alto valor de NDVI; B: ambiente que presenta alto o bajo valor de NDVI, según el cultivo y/o año; D: ambiente que siempre presenta bajo NDVI. Segunda letra es posición topográfica: b: bajo; ml: media loma; l: loma. Tercera letra es información adicional: c: zonas cóncavas; cv: zonas convexas; e: zonas con erosión; ts: presencia de tosca; p: pendiente mayor a 3%.

Cuadro 2. Área ocupada por ambiente en cada sitio.

Ambientes	El Curupy		El Ahorruto		La Tacuara		Las Tres A	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Ambientes A	196	16	43	19	173	31	440	58
Ambientes B	189	15	115	51	268	47	297	39
Ambientes D	143	12	66	30	123	22	26	3

2.2 PRESCRIPCIONES DE NITRÓGENO

Generado el mapa de ambientes de cada campo, se diseñó un mapa de prescripción para las fertilizadoras variables que realizaban las aplicaciones en cada establecimiento. Los archivos fueron generados en formato Shapefile para luego ser convertidos en los formatos utilizados por cada fertilizadora. El ensayo consistió en tres franjas de diferente dosis de N, siendo la fuente utilizada Sulfamax (40% N + 5% S). Las franjas atravesaban los ambientes de diferente potencial con tres repeticiones (resultando en nueve franjas), a excepción del establecimiento “El Curupy”, que por motivos del tamaño del ambiente se realizaron dos repeticiones (seis franjas). A modo de ejemplo se presenta la distribución de dichas franjas en el establecimiento “El Ahorruto” (Figura 5). Las dosis de N fueron: 0 (T1), 120 (T2) y 260 kg ha⁻¹ (T3) de Sulfamax (40% N), lo que corresponde a 0, 48 y 104 kg N ha⁻¹ respectivamente, con excepción de “El Ahorruto” en donde las dosis fueron 0 (T1); 110 (T2) y 320 kg ha⁻¹ (T3) de Sulfamax (40% N), lo que corresponde a 0, 44 y 128 kg N ha⁻¹ respectivamente (Cuadro 3).

Cuadro 3. Dosis de N aplicado

	El Curupy			La Tacuara			Las Tres A			El Ahorruto		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
N prescripción (kg ha ⁻¹)	0	48	104	0	48	104	0	48	104	0	44	128
N manejo general (kg ha ⁻¹)	90	90	90	9	9	9	44	44	44	32	32	32
N total (kg ha ⁻¹)	90	138	194	9	57	113	44	92	148	32	76	160

Además de las dosis de N planteadas en las prescripciones, en las unidades experimentales se realizaron otras aplicaciones de N (Cuadro 3), en fertilizaciones basales y en distintos estados de desarrollo del cultivo (Cuadro 5). Las prescripciones fueron aplicadas para maíz de primera en el caso de los establecimientos “El Curupy” y “Las Tres A”, en estado fenológico V4 y V8 respectivamente. En el caso de “El Ahorruto” y de “La Tacuara” fueron gramíneas de verano de segunda, siendo maíz de segunda para el primero y sorgo de segunda para el sitio “La Tacuara”. En

estos dos últimos campos las prescripciones fueron aplicadas entorno a V4-V5 (Cuadro 4).

Cuadro 4. Fechas y estados fenológicos al momento de las prescripciones de N.

Sitio	Cultivo	Estado Fenológico	Fecha
El Curupy	Maíz 1 ^a	V4	27/10/2015
La Tacuara	Sorgo 2 ^a	V4-V5	14/1/2015
Las Tres A	Maíz 1 ^a	V8	18/1/2015
El Ahorruto	Maíz 2 ^a	V4	10/1/2014

El único manejo intervenido por esta tesis fue la prescripción de N presentada en los párrafos anteriores, bajo la metodología de franjas de diferentes dosis atravesando ambientes. El resto del manejo fue realizado por el técnico y/o productor a cargo (Cuadro 5).

Cuadro 5. Principales manejos y sus respectivas fechas de cada sitio.

Sitio	Cultivo	Siembra	Fertilización				Cosecha
		Fecha	Fecha	Estadio	Dosis (kg N ha ⁻¹)	Observaciones	Fecha
El Curupy	Maíz 1 ^a	15/9/2015	8/9/2015		18	100 kg ha ⁻¹ de NPK 18-46-0	28/2/2016
			27/10/2015	V4	0-48-104	Ensayo tesis de Sulfamax (40N+5S)	
			25/11/2015	V9	72	180 kg ha ⁻¹ Sulfamax (40N+5S)	
La Tacuara	Sorgo 2 ^a	15/12/2014	15/12/2014		9	50 kg ha ⁻¹ NPK 18-46-0	20/5/2015
			14/1/2015	V4-V5	0-48-104	Ensayo tesis de Sulfamax (40N+5.8S)	
Las Tres A	Maíz 1 ^a	15/12/2014	15/12/2014		13	70 kg ha ⁻¹ NPK 18-46-0 al voleo	15/5/2015
			31/12/2014		31	110 kg ha ⁻¹ Solmix Zinc 2%.	
			18/1/2015	V8	0-48-104	Ensayo tesis de Sulfamax (40N + 5S)	
El Ahorruto	Maiz 2 ^a		10/1/2014	V4	0-44-110	Ensayo tesis de Sulfamax (40N +5S)	30/6/2014
			19/2/2014	V8	32	80 kg ha ⁻¹ urea azufrada	



Figura 5. Prescripción de fertilización N de “El Ahorrito” en el estadio V4.

2.3 MUESTREO DE SUELOS

Durante el verano 2013-14, 2014-15 y 2015-16, previo a las prescripciones, se tomaron muestras de suelo del horizonte superficial (0-20 cm) con calador de “balde” sobre las franjas con dosis cero de N de cada ambiente por sitio, formando una muestra compuesta de las dos franjas cero por ambiente. Según la cantidad de ambientes que atraviesa la franja podría ser de 2 a 3 muestras por sitio. La única excepción fue el establecimiento “El Curupy”, donde las muestras compuestas se hicieron por franja cero y ambiente, debido a que había dos ambientes, se generaron

cuatro muestras compuestas (dos ambientes y dos franjas cero). Si bien no se definió un número de submuestras por ambientes, las mismas fueron tomadas con el criterio del “azar” cada 15 pasos en forma de “zig-zag” dentro de cada franja de dosis cero, georreferenciando las tomas de cada muestra.

El total de muestras compuestas fue de 14, las cuales se enviaron al laboratorio Lavsa de la ciudad de Dolores, Departamento de Soriano. Los análisis que se realizaron fueron: PMN ($\text{mg kg}^{-1} \text{N-NH}_4$); nitratos ($\text{mg kg}^{-1} \text{N-NO}_3$) y N total (%). Los métodos de análisis fueron PMN (Incubación anaeróbica durante siete días), Nitratos (Potenciométrico) y N Total (Método de Kjeldahl).

2.4 MONITORES DE RENDIMIENTO

Los mapas de rendimientos obtenidos de las cosechadoras cumplieron un doble objetivo en el presente trabajo: contribuir como una capa más de información para la obtención de zonas de manejo o ambientes y de herramienta para evaluar los ensayos en esta tesis. La capa de monitor de rendimiento es una capa más del proceso de ambientación, que se superpone a las capas topográficas, de historial de imágenes satelitales e imágenes aéreas, además de los estudios edafológicos. Todas estas capas en conjunto se utilizan en el protocolo de definición de zonas de manejo.

En este trabajo los datos de rendimientos utilizados para realizar los análisis fueron obtenidos a partir de monitores de rendimiento. Los datos fueron analizados estadísticamente, partiendo como base la definición de bloques y de celdas. Esta última consistió en dividir las franjas en 10 parcelas de igual tamaño para reforzar el estudio. En el caso de bloques, se dividió en tres bloques (uno por repetición), con excepción del establecimiento “El Curupy” en donde fueron dos, dado su tamaño de ensayo que por temas de espacio no era suficiente para mantener el mismo protocolo que el resto de los campos. A modo de ejemplo se presentan los tratamientos superpuestos con los datos del monitor y el análisis mediante bloques y parcelas del sitio “La Tacuara” (Figura 6).

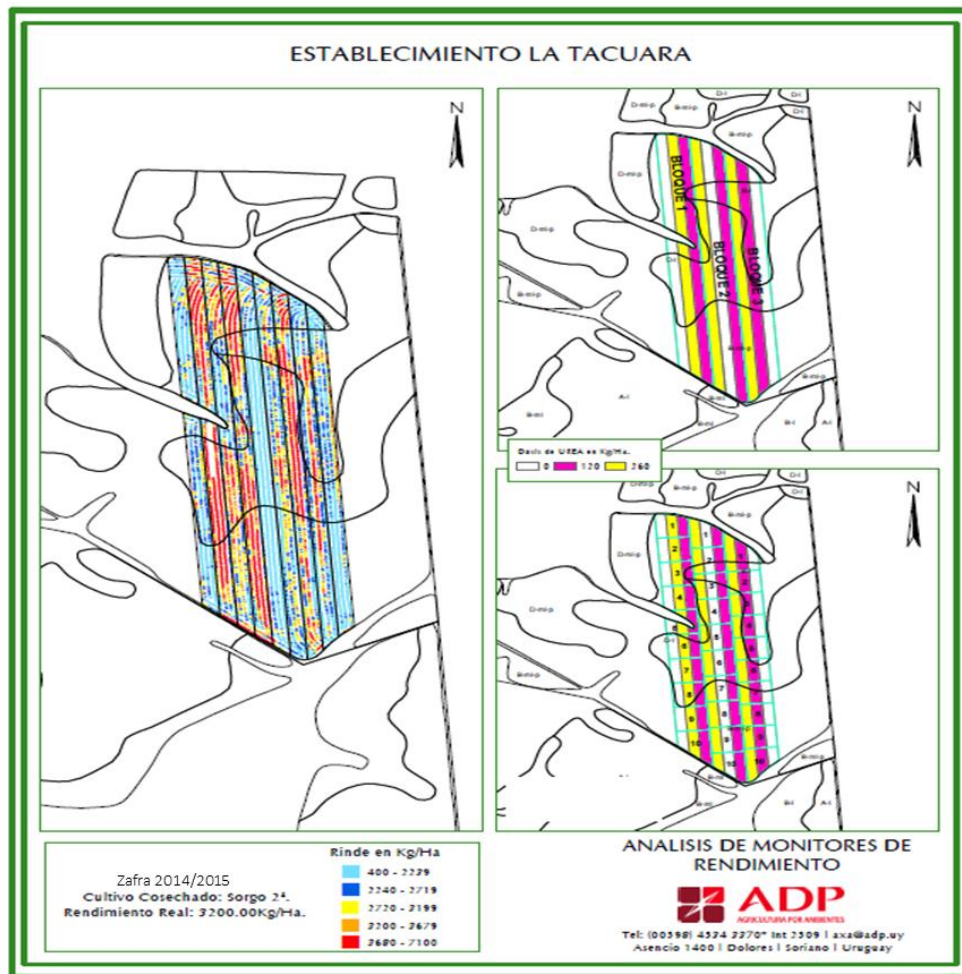


Figura 6. Análisis de los tratamientos mediante monitores de rendimiento.

En este trabajo, además de estudiar los establecimientos por separado, se realiza un análisis en conjunto. Para poder hacer comparable el rendimiento entre sitios se utiliza el rendimiento relativo, ya que los cultivos no son los mismos, así como tampoco los manejos. Además, un ambiente de alto potencial en un sitio no siempre corresponde con una zona de alto rendimiento en otro sitio. Para el cálculo del mismo se analizaron los datos por ambiente, es decir, los rendimientos obtenidos en cada ambiente (de todos los sitios) se compararon con el máximo rendimiento en cada uno de ellos.

2.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico empleado fue el mismo para todos los sitios (establecimientos). De cada uno se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

Medidas descriptivas de respuesta a dosis

ANAVA de respuesta a dosis en el momento de la prescripción

Comparación de medias a dosis cero de N en el momento de la prescripción, de ambientes contrastantes

Análisis de la interacción dosis por ambientes

Análisis del rendimiento por celdas y su correspondencia por ambiente

Para el análisis estadístico de los sitios se utilizaron modelos mixtos, siguiendo el siguiente formato para cada sitio:

$$y_{ij} = \mu + b_j + \alpha_k + \beta_l + \alpha\beta_{kl} + \epsilon_{ijkl}$$

$$i=1,2,\dots,t; j=1,2,\dots,b; k=1,2,3; l=1,2$$

donde:

α Efecto fijo de la dosis

β Efecto fijo del ambiente

$b_j \sim \text{iidN}(0, \sigma_b^2)$ Efecto aleatorio del bloque

$\epsilon_{ij} \sim \text{iidN}(0, \sigma_\epsilon^2)$ Error experimental

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuando se analizan las variables químicas del suelo de los ambientes de diferente potencial en cada establecimiento (Cuadro 6), se observa una tendencia a que ambientes de mayor potencial (A) presentan mayores valores de PMN que ambientes de potencial variable (B) y bajo potencial (D), con diferencias significativas entre ambientes de alto y bajo potencial en dos de los cuatro sitios en estudios (“El Ahorruto” y “El Curupy”). Lo que puede estar infiriendo a que zonas de mayor productividad aportan mayor contenido de N proveniente de la mineralización que zonas de menor rendimiento. Eso concuerda con los trabajos de Gregoret et al. (2009) sobre sitios con maíz en la localidad de Manfredi, Argentina, los cuales arrojaron contenidos y distribución en el perfil de N-NO₃ mayores en zonas de potencial más alto que ambientes de rendimiento inferior. Al igual que en el presente estudio las diferencias en el N disponible al inicio entre ZM son pequeñas. Según el autor, estas diferencias, asociadas a diferencias en el contenido de agua inicial, mostraron ser suficientes para generar ambientes productivos diferentes. A su vez, se observa que los ambientes clasificados como “Alto” o “Bajo” en cada sitio presentan claras diferencias con respecto a este parámetro. Por ejemplo, el ambiente “Bajo” del sitio “El Curupy” presenta un valor de PMN de 44 mg kg⁻¹, mientras que en el ambiente “Alto” de los sitios “Las Tres A”, “El Ahorruto” y “La Tacuara” este valor es de 31, 35 y 28 mg kg⁻¹ respectivamente.

Cuadro 6. Análisis químico de ambientes de diferente potencial

Sitio	Ambiente completo	Resumen ambiente	PMN		N-NO3		N Total	
			Media (mg kg ⁻¹)	E.E.	Media (mg kg ⁻¹)	E.E.	Media (%)	E.E.
El Curupy	A	ALTO	54,00	1,27 b	11,05	1,10 a	0,22	0,02 a
El Curupy	D	BAJO	42,50	1,27 a	6,45	1,10 a	0,20	0,02 a
Las Tres A	A	ALTO	30,50	1,46 a	4,65	5,98 a	0,28	0,03 a
Las Tres A	B	BAJO	34,00	1,46 a	21,60	5,98 a	0,23	0,03 a
Las Tres A	D	BAJO	30,00	1,46 a	4,70	5,98 a	0,22	0,03 a
El Ahorruto	B	BAJO	30,00	1,00 a	4,70	2,65 b	1,30	0,10 b
El Ahorruto	D	ALTO	35,00	1,41 b	6,80	3,75 a	1,40	0,14 a
La Tacuara	B	ALTO	28,00	1,50 a	1,80	2,00 b	0,17	0,04 b
La Tacuara	D	BAJO	27,00	2,12 b	1,90	1,90 a	0,12	0,05 a

Medias con una letra común dentro de cada sitio no son significativamente diferentes ($p > 0,05$). E.E.: Error estándar. PMN: Potencial de mineralización de N

En el caso de nitrato no se observa una tendencia clara como PMN, al comparar valores de esta variable en función del potencial del ambiente, siendo “La Tacuara” el sitio donde se asoció que los ambientes de potencial alto presentan mayores valores de nitrato que los de bajo potencial. Para la variable N total (%) sucede similar que para nitrato, no destacándose similitud entre potencial de zona y N total, con excepción del sitio “La Tacuara”.

3.1 SITIO “EL CURUPY”

Al estudiar la respuesta al agregado de fertilizante nitrogenado en el momento de la prescripción, se observa una respuesta diferencial a dosis de N, siendo significativa al comparar dosis 0 kg ha⁻¹ versus tratamiento 48 y 104 kg ha⁻¹. Sin embargo, no se presentan diferencias significativas entre estos dos últimos tratamientos (Cuadro 7). Si se toma la mediana como variable de análisis existe una tendencia que, a mayor dosis de N, mayor es el rendimiento obtenido, además de que los valores máximos (tomando el percentil 75) se dan en los tratamientos de dosis más altas. Al realizar el análisis estadístico se encontró una interacción significativa entre ambiente y dosis (Ver Anexo 6.2).

Cuadro 7. Análisis de varianza del rendimiento en grano de maíz en el sitio “El Curupy”.

Ambiente	Dosis N (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	E.E.	
D	104	9830	402	a
D	48	9598	403	a
A	0	9205	404	b
A	48	8765	403	c
A	104	8162	405	d
D	0	8035	399	d
D		9154	395	a
A		8711	395	b
	48	9181	397	a
	104	8996	397	a
	0	8620	396	b

$\alpha=0.05$

En el análisis de varianza de rendimiento por ambientes, al comparar ambos ambientes a dosis cero en el momento de la prescripción (igualdad de manejo), el ambiente de mayor potencial (A) fue significativamente superior que el de menor potencial (D). Esto también coincide con los trabajos de Gregoret et al. (2009), que encontraron que el rendimiento se manifiesta de forma diferencial en función de la zona de manejo.

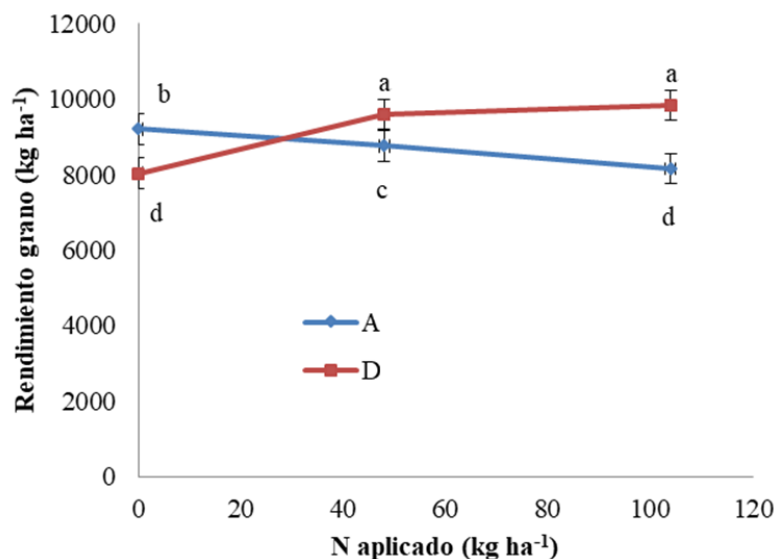


Figura 7. Rendimiento en grano de maíz según dosis de N por ambientes en el sitio “El Curupy”

En este sitio, en la dosis más baja de N y común a todos los ambientes, el rendimiento en grano en el ambiente de menor potencial (D) fue significativamente menor que en el ambiente definido como de mayor potencial (A) (Cuadro 7 y Figura 7). A mayores dosis de N, la respuesta en el ambiente de inferior calidad es mayor, con una EUN de 17,3 kg grano kg N⁻¹. A su vez, se observa que esta EUN varía según las dosis aplicadas en el momento de la prescripción, en el rango de 0-48 kg ha⁻¹ esta eficiencia es de 32,6 kg grano kg N⁻¹, mientras que en el rango de 48-104 kg ha⁻¹ es de 4,1 kg de grano kg N⁻¹. Similares conclusiones obtuvieron los trabajos de Pagani (2014) en zonas húmedas de Argentina, donde las condiciones que determinan mayor rendimiento de un cultivo no necesariamente determinan mayor respuesta a la aplicación de N. Si bien lo esperable es que el ambiente de mayor potencial concrete rendimientos superiores al ambiente de inferior calidad, en este caso puntual el agregado de N no provocó incrementos significativos de rendimiento al incorporar este insumo en el ambiente de mayor rendimiento. Esto puede estar relacionado a un efecto año, el cual fue de menor régimen de precipitación que la sería histórica, sobre todo en los meses correspondientes al período crítico del cultivo (Figura 8). Esto está de acuerdo con trabajos de Below (2002), quien encontró que en

un suelo fértil con alto contenido de N residual, la aplicación de fertilizantes nitrogenados presentó baja respuesta o reducción de los rendimientos. Existen también otros factores aparte del N, como la falta de humedad en el suelo o la deficiencia de otro nutriente 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 es bajo.

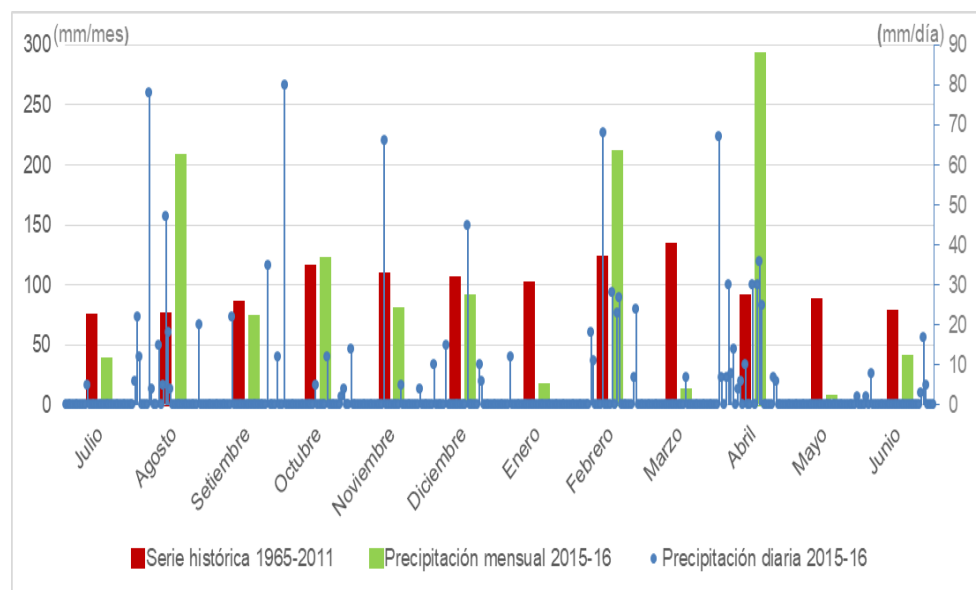


Figura 8. Precipitaciones serie histórica 1965-2011, mensuales y del año de ejercicio, Dolores.

Los ambientes de mayor potencial presentaron significativamente mayor aporte de N por mineralización (PMN) que los ambientes de inferior potencial (Cuadro 6). Esto puede estar explicando las diferencias de rendimiento entre ambientes a dosis cero de N en el momento de la prescripción, concordando en parte con trabajos de Pagani (2014), donde en las zonas deprimidas la DOE de N puede verse reducida con respecto al promedio del sitio debido al mayor aporte de N del suelo por mineralización. Para el caso de nitrato, si bien puede verse levemente una tendencia de mayor valor en ambientes de mayor potencial, esta diferencia no es significativa.

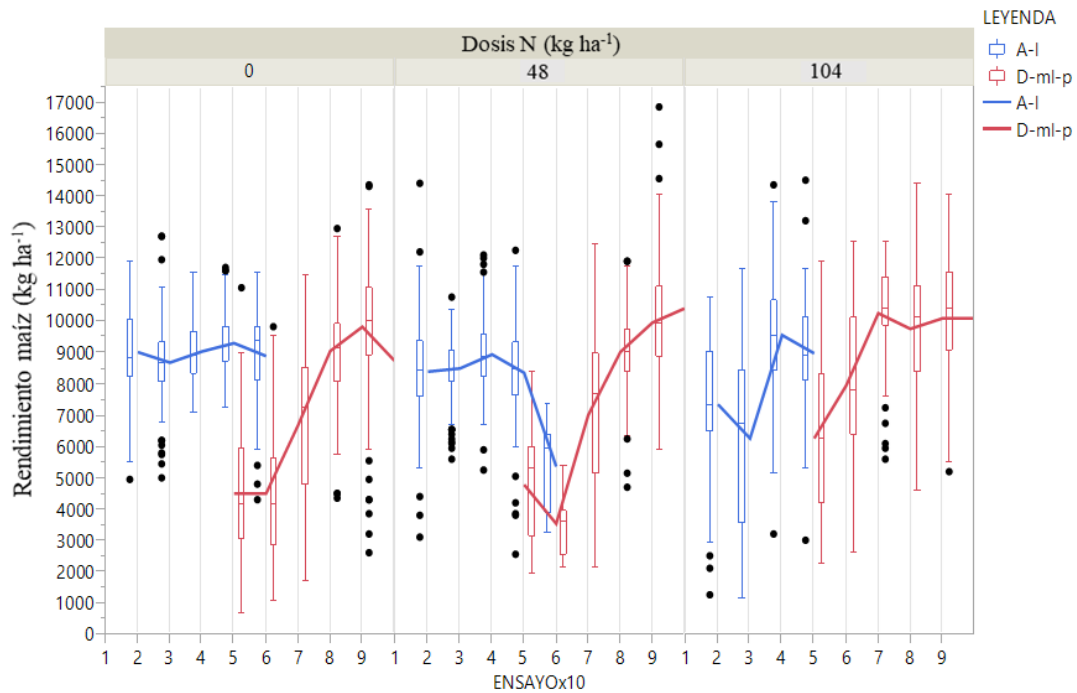


Figura 9. Análisis de monitor de rendimiento en grano de maíz por celdas del sitio “El Curupy”.

Al evaluar el ensayo por celdas (Figura 9), se discrimina con mayor detalle la respuesta mayor al insumo en el ambiente de menor potencial (línea roja). Si bien en general de rendimientos inferiores, la mayor eficiencia del uso del N hace que también sus rendimientos finales alcanzados también lo sean. En las celdas 5 y 6 se observan claramente las diferencias de rendimiento entre los ambientes cuando no se aplica fertilizante en el momento de la prescripción. A su vez, cuando se aplica N estas diferencias se reducen, explicado principalmente por una reducción en rendimiento del ambiente de mayor potencial, lo cual puede deberse a los problemas de sequía que se presentaron durante el ciclo del cultivo.

3.2 SITIO “LAS TRES A”

Existió una respuesta positiva y significativa al tratamiento dosis de N (Cuadro 8). Esto concuerda con los trabajos de Below (2002), donde los suelos no disponen de N disponible, por lo que el rendimiento está determinado por las dosis exógenas

del sistema. Los rendimientos más altos alcanzados en el presente sitio se obtienen con dosis de N más altas (Ver percentil 75 en Anexos 6.3).

El rendimiento es significativamente diferente a dosis cero N en el momento de la prescripción (testigos) en los diferentes ambientes. Esto concuerda con trabajos realizados por Jaynes et al. (2011) citados por Pagani (2014) en el estado de Iowa, EE. UU., los cuales muestran variaciones significativas en la respuesta del cultivo de maíz a la aplicación de N y por lo tanto en la DOE según la posición del paisaje.

La interacción entre ambiente y dosis fue significativa (Ver Anexo 6.3).

Cuadro 8. Análisis de varianza del rendimiento en grano de maíz del sitio “Las Tres A”.

Ambiente	Dosis N (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Std Error	
A	104	7697	253	a
B	104	7643	274	a
A	48	7169	253	b
D	104	6770	256	c
B	48	6707	262	cd
A	0	6684	253	c
D	0	6536	255	d
D	48	6313	255	e
B	0	6249	264	e
A		7183	252	a
B		6866	257	b
D		6540	252	c
	104	7370	254	a
	48	6729	253	b
	0	6490	253	c

$\alpha=0.05$

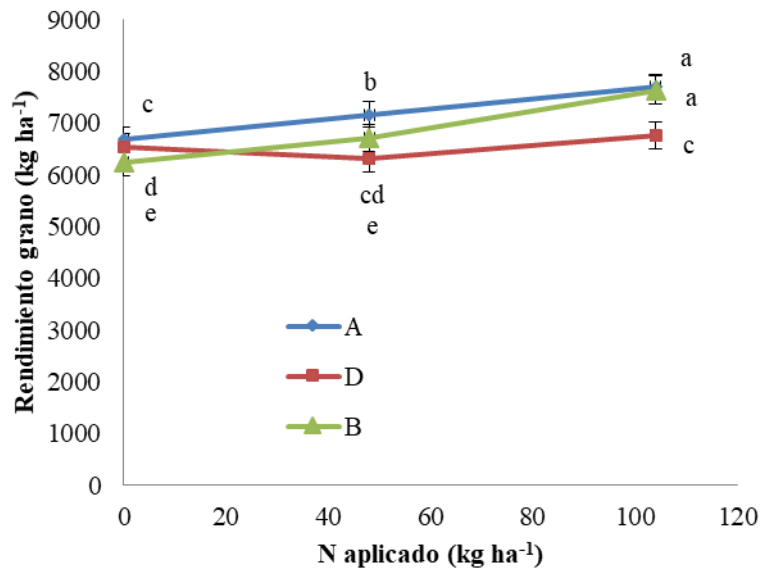


Figura 10. Rendimiento en grano de maíz según dosis de N por ambientes en el sitio “Las Tres A”.

El ambiente de menor potencial (B), presenta mayor respuesta a dosis de N en el momento de la prescripción, con una EUN de 13,4 kg de grano kg N^{-1} . Para el ambiente de mayor rendimiento (A), si bien presenta menor respuesta al agregado de N, con una EUN de 9,7 kg de grano kg N^{-1} , el rendimiento final alcanzado es superior. Este sitio concuerda de forma general con la hipótesis del experimento, donde la respuesta de ambientes de menor potencial a dosis de N es superior, pero el rendimiento final alcanzado es menor. Similares resultados obtuvieron Gregoret et al. (2009), donde se observó que la respuesta al Nf difirió según ZM y son diferentes al promedio del sitio, siendo mayores en zonas de alto potencial que de bajo potencial. Esta diferencia significativa entre variables ZM sugiere la existencia de variables sitio-específicas que interactúan con el Nf, tales como el N y agua a la siembra, y que no son homogéneas en todo el sitio.

En este sitio se observa lo contrario a lo que ocurre en el establecimiento “El Curupy”, en “Las Tres A” los ambientes de inferior calidad (menor rendimiento a dosis cero en el momento de la prescripción) presentan mayor valor de PMN y nitratos (Cuadro 6). Este resultado, en cierta forma, pone en duda la utilidad de este parámetro para la definición de ambientes, remarcando la necesidad de continuar con

el estudio del mismo. De forma inversa se observa para los datos de N Total (%), siendo zonas de mayor rendimiento con las dosis más bajas de N los que mayor porcentaje de N total presentan (Cuadro 6).

3.3 SITIO “LA TACUARA”

Similar a los resultados de los Sitios “Las Tres A” y “El Curupy”, en “La Tacuara” existe respuesta diferencial y positiva a la dosis de N. Siendo los rendimientos significativamente superiores en los tratamientos de mayor dosis de N (Cuadro 9). Además, los valores de rendimiento más altos de la chacra (ver percentil 75 en anexo 6.4) se obtiene con el tratamiento de dosis más altas. Se encontró una interacción significativa entre ambiente y dosis (Ver Anexo 6.4).

Cuadro 9. Análisis de varianza del rendimiento en grano de sorgo en el sitio “La Tacuara”.

Ambiente	Dosis N (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Std Error	
D	104	3964	101	a
B	104	3533	100	b
D	48	2905	102	c
B	48	2593	100	d
B	0	2182	100	e
D	0	2028	102	f
D		2966	100	a
B		2769	99	b
	104	3748	100	a
	48	2749	100	b
	0	2105	100	c

$\alpha=0.05$

Existe respuesta diferencial por ambiente en los tratamientos dosis cero N en el momento de la prescripción (testigo), siendo los ambientes de menor potencial (D)

los que significativamente rinden menos que los ambientes de mayor performance (B).

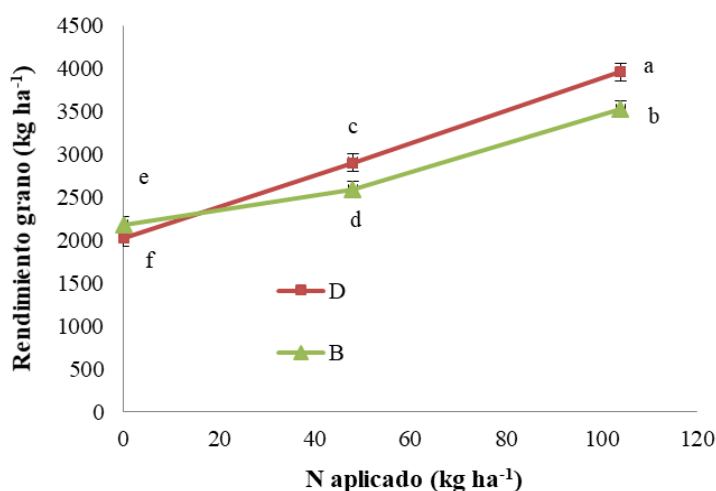


Figura 11. Rendimiento en grano de sorgo según dosis de N por ambientes en el sitio “La Tacuara”

Al igual que en el Sitio “El Curupy”, el ambiente de menor potencial (D) presentó menor rendimiento que el ambiente B en la dosis más baja de N, aunque la respuesta al aplicar fertilizante nitrogenado en el momento de la prescripción fue mayor en el ambiente D que en el B, con EUN de 18,6 y 13,0 kg de grano kg N⁻¹ respectivamente. Si bien la mayor respuesta concuerda con la hipótesis del trabajo, al igual que los trabajos de Pagani (2014), no concuerda en que el rendimiento final del ambiente de menor potencial sea mayor. Otro aspecto importante a remarcar es el bajo rendimiento del cultivo, lo que puede estar explicado por variables aún más limitantes, como puede ser la disponibilidad de agua, entre otras.

Cuadro 10. PMN en función del ambiente productivo en el sitio “La Tacuara”.

Ambiente	Resumen ambiente	PMN (mg kg ⁻¹)
B-1	ALTO	25
B-ml-p	ALTO	28
D-1	BAJO	27

En este sitio se discrimina un mayor aporte de nitrato y N total en el suelo en ambientes de mejor aptitud agrícola que aquellos de inferior potencial (Cuadro 6). Si bien esta diferencia en términos absolutos puede ser insignificante, los valores generales de estas variables en todos los ambientes de este sitio son muy bajos. Si bien estos resultados parecen justificar una mayor respuesta al N en ambientes de menor potencial, no es concordante con los datos presentados en el cuadro 10, donde no se aprecian mayores valores de PMN en zonas de alto rendimiento.

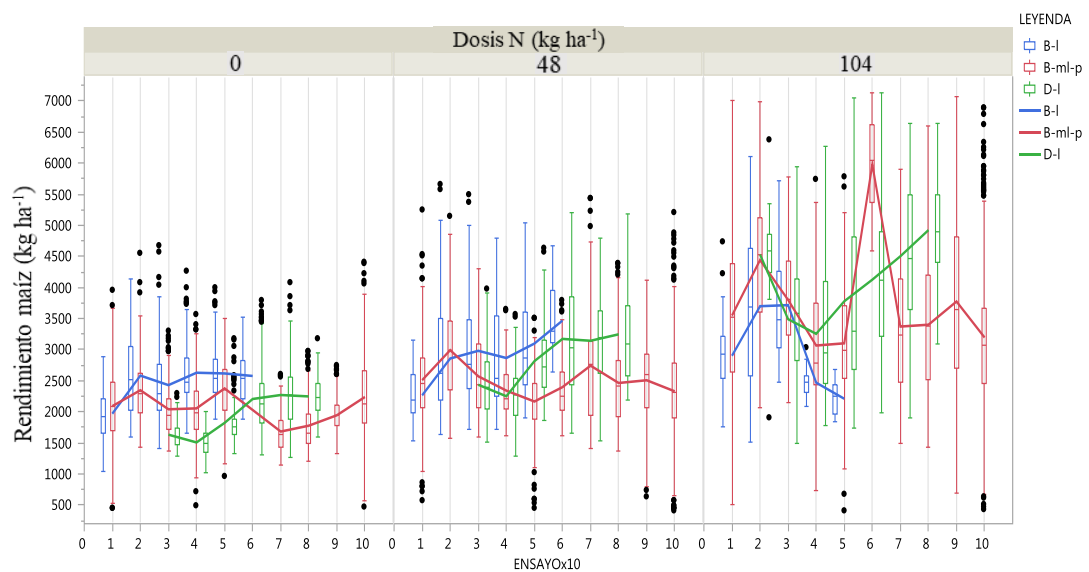


Figura 12. Análisis de monitor de rendimiento por celdas del sitio “La Tacuara”.

Al analizar el monitor de rendimiento por celdas, se puede apreciar mejor la mayor respuesta del ambiente de menor potencial (línea verde) a dosis de N en el momento de la prescripción (Figura 12). También se arroja de la gráfica que cuando no se aplica fertilizante en dicho momento, el ambiente de menor potencial comienza con rendimientos claramente inferiores. En el tratamiento correspondiente a dosis de 48 kg ha⁻¹, se desprende una mayor eficiencia de N en el ambiente de menor potencial (la línea verde se acerca a la línea azul), pero un rendimiento final alcanzado menor que el ambiente de mayor potencial (línea azul). Esto concuerda con la hipótesis del trabajo. Al observar el tratamiento de 104 kg ha⁻¹, el ambiente de

mayor potencial (línea azul) finaliza con menores rendimientos logrados que en los ambientes inferiores.

3.4 SITIO “EL AHORRITO”

Al igual que la mayoría de los sitios bajo estudio existe respuesta diferencial a los tratamientos dosis de N (Ver detalles en anexo 6.5). Se observaron diferencias significativas de rendimientos entre tratamientos de fertilización, siendo el de mayor dosis significativamente mayor al resto, mientras que el rendimiento correspondiente a la dosis más baja es significativamente inferior al obtenido en los otros dos tratamientos (Cuadro 11). Los ambientes tuvieron rendimientos significativamente diferentes a igualdad de manejo. La interacción entre ambiente y dosis fue significativa (Ver Anexo 6.5).

Como se explicó en la sección de materiales y métodos, el ambiente B es aquel que presenta resultados variables según el año y el cultivo. En este caso el ambiente D se comportó como de mayor potencial a dosis cero de N al momento de la prescripción, mientras que el B fue significativamente inferior, asumiendo que el manejo es el mismo.

Cuadro 11. Análisis de varianza del rendimiento en grano de maíz en el sitio “El Ahorrillo”

Ambiente	Dosis N (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Std Error	
D	128	6616	230	a
B	128	6546	231	a
D	44	6373	230	b
B	44	6258	230	c
D	0	5688	231	d
B	0	5073	230	e
D		6226	229	a
B		5959	229	b
	128	6581	230	a
	44	6315	230	b
	0	5381	230	c

$\alpha=0.05$

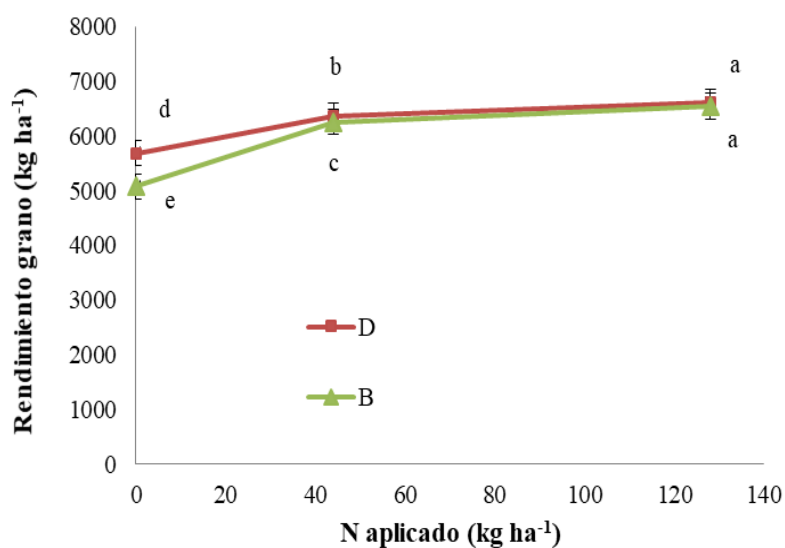


Figura 13. Respuesta de dosis de N por ambientes del sitio “El Ahorrillo”.

Para el sitio “El Ahorrillo” junto con “Las Tres A” son los experimentos que más coincidencias con la hipótesis presentan. El ambiente de menor potencial (B)

presenta una mayor EUN en el rango de dosis de 0-128 kg ha⁻¹ que el ambiente D, con valores de 11,5 kg de grano kg N⁻¹ y 7,3 kg de grano kg N⁻¹ respectivamente (Figura 13). A su vez en cada ambiente hay diferencias en las EUN según las dosis utilizadas en el momento de la prescripción, en el B en el rango de 0-44 kg N ha⁻¹ se obtuvo una EUN de 26,9 kg de grano kg N⁻¹ mientras que en el rango 44-128 kg ha⁻¹ esta fue de 3.4 kg de grano kg N⁻¹. En lo que al ambiente D respecta, las EUN fueron de 15,6 kg de grano kg N⁻¹ y 2,9 kg de grano kg N⁻¹ para los rangos de 0-44 kg ha⁻¹ y 44-128 kg ha⁻¹ respectivamente.

Independientemente del grado de respuesta de los ambientes, si bien las diferencias de rendimientos entre ZM no es tan marcada, lo que podría deberse a los bajos rendimientos obtenidos, la ZM de mayor potencial finaliza alcanzando rendimientos superiores, lo que lleva a suponer que la limitante en el final de la recta no es N. Este experimento también coincide con trabajos realizados por Jaynes et al. (2011) citados por Pagani (2014) en el estado de Iowa, EE. UU. donde ambientes de posición topográfica baja, responden menos a N, pero el rendimiento final es mayor.

Es probable que la limitante al finalizar la curva no esté asociada a N, lo que conlleva a que ambiente de mayor potencial disponga de más N (menor respuesta a N) pero también de otras propiedades: edafológicas (CAAD, profundidad total del perfil, estructura y textura de suelo); física y/o química de suelo (Dap, pH, P, K, Mo, etc), que determinan rendimientos finales mayores. Esto puede no coincidir con Webb y Loomis, y Connor, citados por Otaño y Zarucki (2010) quienes indican que los métodos de análisis de datos de rendimiento para determinar zonas, por lo general asumen que las mismas son limitadas por algún factor primario, en este sitio el N puede estar limitando el rendimiento del ambiente de bajo potencial, pero no es el único. En cambio, los resultados son similares con los trabajos de Terra et al. (2010), quien define las zonas de manejo como sub-áreas dentro de la chacra donde se deberían expresar combinaciones relativamente similares de factores determinantes del rendimiento, donde es apropiado un manejo homogéneo del suelo y los cultivos.

Los valores de PMN obtenidos (Cuadro 6) concuerdan con los resultados del sitio “El Curupy”, en donde los ambientes de mayor potencial son los que significativamente presentan valores más altos de N residual. Esta diferencia

concuerta con trabajos de Pagani. A (2014) y Gregoret et al. (2009), en los cuales ambientes o zonas de mayor potencial presentan más N disponible que ambientes inferiores. Si bien estadísticamente hay diferencias significativas, puede que en términos absolutos estas no sean tan relevantes. De todas formas, en estas condiciones de suelo, con importante historia agrícola estas diferencias pueden llegar a ser importantes.

Esta diferencia de PMN puede ser la causa por lo cual ambientes de menor potencial en el sitio “El Ahorruto” responden más a la dosis de N que ambientes de mejor calidad. Pero esta respuesta mayor no es suficiente para alcanzar rendimientos superiores a los ambientes de mayor performance, por lo que se puede inferir que la limitante en este punto es otra.

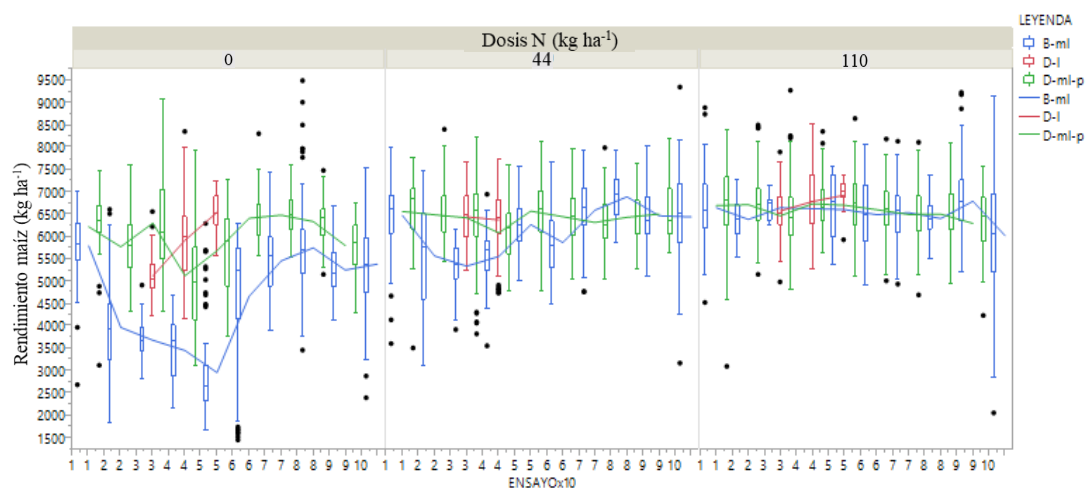


Figura 14. Análisis de monitor de rendimiento por celdas del sitio “El Ahorruto”.

Al analizar el monitor de rendimiento por celdas (Figura 14) se observa con mayor detalle como los ambientes de menor potencial (línea azul) presentan menor rendimiento que los ambientes de mayor potencial (línea roja y verde) cuando no se agrega N en el momento de la prescripción. Al analizar las curvas del tratamiento de 44 kg ha⁻¹, los ambientes de menor potencial tienen un significativo aumento de rendimiento, mientras que en los de mayor potencial el aumento es moderado. En la última fase de la curva que corresponde a la dosis 128 kg ha⁻¹, la curva azul continúa

su aumento de rendimiento a dosis, pero inferior a la respuesta obtenida de 0 a 44 kg ha⁻¹. Las curvas de mayor potencial también responden al aumento de dosis de N quedando finalmente en rendimientos superiores a las curvas de inferior potencial.

3.5 ANÁLISIS DE LOS ESTABLECIEMIENTOS EN CONJUNTO

Se observó que los mayores rendimientos se obtuvieron con la dosis más alta (Figura 15), mostrando una clara respuesta al agregado de N. A su vez, a partir de los datos obtenidos no se puede tener la certeza de si la dosis correspondiente al tratamiento que recibió la mayor cantidad de N fue suficiente, ya que hay curvas que no presentan una fase plateau.

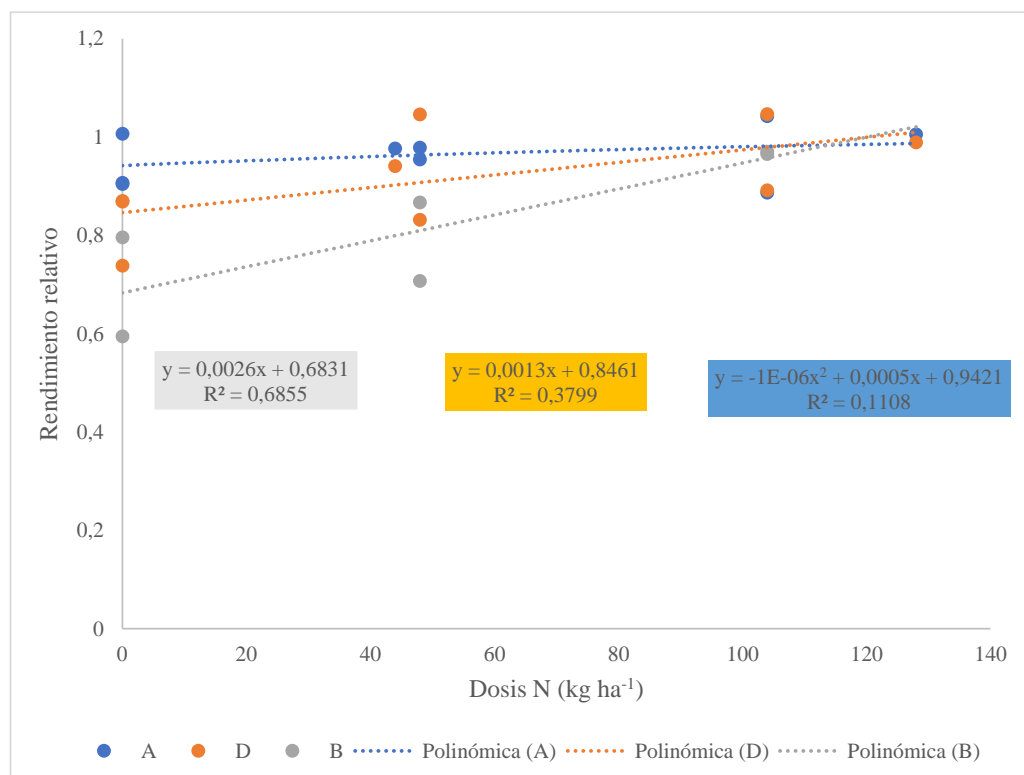


Figura 15. Rendimiento relativo de los ambientes de los cuatro sitios en función de la dosis de N.

Se observa una tendencia similar a la encontrada en los sitios individualmente, la pendiente de los ambientes de menor potencial es mayor que la de los ambientes

que rinden más cuando no se aplica N. Esto concuerda con la hipótesis planteada, no así el rendimiento máximo logrado, donde los ambientes de mayor potencial no obtienen rendimientos superiores con las dosis más elevadas de N. En el análisis por sitio individual se puede visualizar casos como “El Ahorrito” o “La Tacuara”, en los cuales los ambientes de mayor potencial alcanzan mayores rendimientos con las dosis más altas de N, concordando en su conjunto con toda la hipótesis del trabajo. Resulta complejo identificar las causas por lo cual los ambientes de bajo potencial finalizan superando el rendimiento de los de alto potencial en los otros dos sitios experimentales (“El Curupí” y “Las Tres A”). Una posible causa podría ser la dosis más alta, la cual puede ser insuficiente para satisfacer la respuesta o necesidad de N del ambiente de bajo potencial o estar lejos de ser la dosis máxima del de alto potencial, el cual, si bien presenta menor pendiente, puede si responder a mayores dosis.

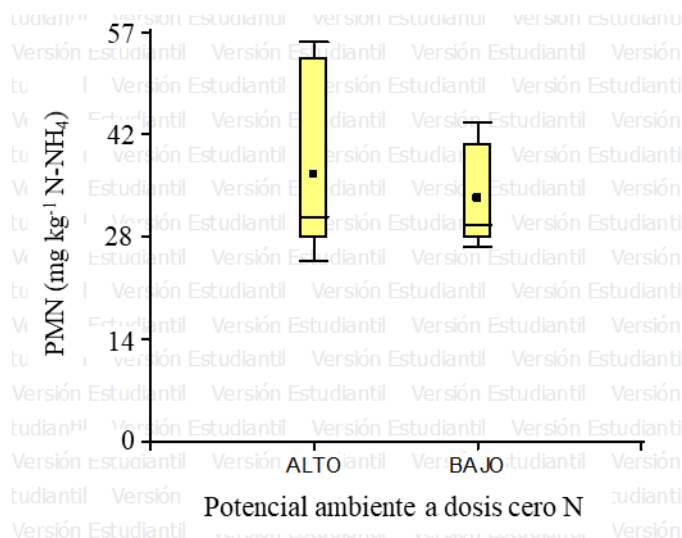


Figura 16. PMN en función del potencial del ambiente a dosis cero N en el momento de la prescripción, tomando los ambientes de los cuatro sitios.

Los ambientes de alto potencial presentaron una mayor variación de valores, observándose una tendencia a mayores valores de PMN en ambientes de mayor rendimiento alcanzado (Figura 16). También se observa que en ambientes superiores existe un 25% de los datos que está por encima de 53 mg kg⁻¹ NH₄, mientras que en

los inferiores existe un cuarto superior a $41 \text{ mg kg}^{-1} \text{ NH}_4$. Si bien en términos absolutos puede que estas diferencias no sean tan marcadas, al considerar estos suelos con importante historia agrícola, estas diferencias podrían ser de importancia.

4. CONCLUSIONES

En todos los sitios bajo estudio existió una respuesta diferencial a dosis de N. La misma fue positiva, obteniendo los mayores rendimientos con las dosis más altas de N.

El rendimiento fue significativamente diferente entre ambientes cuando no se aplicó de N en el momento de la prescripción (testigos) en todos los sitios bajo estudio. En líneas generales la definición de ambientes de la empresa ADP S.A. concuerda con los datos obtenidos en este trabajo, siendo los ambientes A los que rindieron más y D los de bajo potencial, a excepción en parte del establecimiento “El Ahorruto”, en donde el ambiente de mejor performance a dosis cero de N en el momento de la prescripción fue el D (definido como de bajo potencial según la empresa ADP S.A) y de menor rendimiento el ambiente variable B (que al ser variable también puede justificarse que su rendimiento no sea definido, comportándose como alto o bajo potencial dependiendo de otras variables).

Tanto para el cultivo de maíz como para sorgo existió una mayor respuesta al agregado de N en el momento de la prescripción en ambientes de bajo potencial, con EUN que se encuentran entre 11,5 y 18,6 kg de grano kg N^{-1} . Con respecto a los ambientes de alto potencial, en uno de los sitios no se observaron incrementos de los rendimientos al agregar N, mientras que en el resto se obtuvieron EUN entre 7,3 y 13,0 kg de grano kg N^{-1} . Esta diferencia en la eficiencia en el uso del nutriente se da en mayor medida en las dosis más bajas.

Se observa una tendencia a que los ambientes de menor rendimiento alcanzado cuando no se aplica N en el momento de la prescripción presentan menores valores de PMN, mientras que los ambientes de mayor rendimiento alcanzado en estas condiciones son los que mayor N residual tienen. Esto fue claro y significativo en 2 de los 4 sitios. Esta diferencia del indicador PMN puede ser uno de los factores que expliquen su mayor respuesta al agregado de N, sobre todo en los tratamientos de menor dosis en ambientes de menor potencial. Aunque es necesario continuar investigando sobre este aspecto, para poder determinar si el PMN puede ser utilizado como herramienta para discriminar ambientes.

En tres de cuatro sitios se observaron diferencias en rendimiento máximo alcanzado con las dosis más altas de N, aunque no fue clara la asociación con ambientes clasificados como de mayor o menor potencial.

“El Ahorruto” y “La Tacuara” fueron dos de los cuatro sitios donde la hipótesis se cumplió: la mayor respuesta al agregado de N en el momento de la prescripción se observó en ambientes de bajo potencial, pero siendo los de alto potencial las que mayor rendimiento lograron con las máximas dosis de N. Si bien el mayor rendimiento a dosis altas de N no se obtuvo en ambientes clasificados como de alto potencial en los otros dos sitios, existen varias causas posibles, como por ejemplo, podría ser que la dosis de N máxima no haya podido satisfacer el total de respuesta del ambiente D y expresar otras limitantes de este ambiente, como tampoco identificar el real potencial de los denominados ambientes de alto rendimiento.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Ahunchain M, Klaassen M. 1990. Causas de variabilidad de rendimiento en Trigo. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 165 p.
- Álvarez C, Barraco M, Scianca C. 2009. Efecto de las condiciones sitio-específico sobre la productividad y variabilidad de los cultivos en la región de la pampa arenosa. EEA INTA General Villegas, CC 153.
- Below F. 2002. Fisiología, nutrição e abubação nitrogenada do milho. *Informações Agronomicas*. 99: 7-12.
- Best S, León I. 2006. Geoestadística. In: Bongiovanni, R; Mantovani, E; Best, S.; Roel, A. eds. *Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 147-161.
- Bocchi S, Castrignanó A. 2007. Identification of potential production areas for corn in Italy through multitemporal yield map analysis. *Field Crops Research*. 102 (3): 185–197.
- Bongiovanni R, Lowenberg-Deboer J. 2004. Precision Agriculture and Sustainability. *Precision Agriculture* 5:359-387.
- Bosh F, Lecueder F. 2011. Relación entre el rendimiento de soja de segunda y la variación espacial de los atributos edáficos dentro de una misma chacra. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de agronomía. 58p.
- Bragachini M, Von Martin I A, Méndez A. 2000. Alcances y precisión de los monitores de rendimiento. Componentes de agricultura de precisión. Proyecto Agricultura de precisión. INTA Manfredi.
- Durán A, Ippolitti G, Zamalvide JP, García F. 1997. Propiedades físico químicas de los suelos. Código 421. Facultad de Agronomía. pp. 109.

- García FO. 2002. Beneficios potenciales del uso de las herramientas de agricultura de precisión en el diagnóstico y aplicación de fertilizantes. Tercer taller de Agricultura de Precisión del Cono Sur de América. PROCISUR. INTA-INIA.
- Gregoret T, Díaz Zorita M, Dardanelli J, Bongiovanni R. 2009. Modelo regional de respuesta de maíz al nitrógeno con variables sitio-específicas en ambientes semiáridos. *Informaciones Agronómicas*. 43 (3): 12-15.
- Hatfield JL, Gitelson, AA, Schepers JS, Walthall CL. 2008. Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. *Agronomy Journal*. 100: 117-131.
- Irmak A, Jones JW, Batchelor WD, Paz JO. 2001. Estimating spatially variable soil properties for application of crop models in precision farming. *Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural Engineers* ISSN 0001-2351. Vol 44(5): 1343-1353.
- Kopittke PM, Menzies NW. 2007. A Review of the Use of the Basic Cation Saturation Ratio and the “Ideal” Soil. School of Land and Food Sciences. The Univ. of Queensland. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71:259–265
- Kravchenko A, Bullock D. 2000. Spatial variability; correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agronomy Journal*. 92 (1): 75-83.
- Ma BL, Dwyer LM, Costa C, Cober ER; Morrison M. 2001. Early prediction of soybean yield from canopy reflectance measurements. *Agronomy Journal* vol 93:1227-1234.
- Mantovani E, De Carvalho Pinto FA, Marçal Dequeiro D. 2006. Introducción a la agricultura de precisión. In: Bongiovanni, R, Mantovani E, Best S, Roel A. eds. *Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 13-22.
- Martín NF, Bullock DG, Bollero G. 2004. Associations between field characteristics and soybean plant performance using canonical correlation analysis. *Plant and Soil* 273:39-55.

- Melchiori R, Caviglia O, Faccendini N, Bianchini A, Raun, W. 2006. Evaluación de refertilización nitrogenada basada en la utilización de un sensor óptico. Actualización Técnica-Maíz. INTA EEA Paraná. Serie de Extensión n° 41: 33-36.
- Mengel D. 1995. Roots, growth and nitrogen uptake. West Lafayette, Indiana Department of Agronomy Publication. pp 1-8
- MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). 1967. Descripción de grupos de suelos CONEAT. Montevideo. 62 p.
- Otaño C, Zarucki I. 2010. Impacto de distintos niveles de fertilidad y atributos de terreno sobre la variabilidad de rendimiento del cultivo de soja a escala de chacra. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de agronomía.107p.
- Oyarzun MA. 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.
- Pagani A. 2014. Manejo sitio-especifico de nutrientes. Pp 839-870. En: H. E. Echeverría, y F.O. García (eds.). Fertilidad de Suelos y fertilización de Cultivos. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Plant RE. 2001. Site-specific management: the application of information technology to crop production. Computers and Electronics in Agriculture 30: 9-29
- Polak G. 2013. Agricultura de precisión para la corrección de ambientes con elevado valor de sodio intercambiable. Tesis especialista de la universidad de Buenos Aires en fertilidad de suelos y fertilización. Buenos Aires, Argentina. Facultad de agronomía.47p
- Pravia V. 2009. Uso de los elementos de agricultura de precisión y modelos de simulación para la incorporación de la dimensión espaciotemporal en la investigación de cultivos agrícolas, A) Impacto de prácticas de manejo de suelos y atributos del terreno en la productividad de sorgo a escala de chacra, B) Simulación de la producción de arroz en Uruguay utilizando el modelo

- DSSATv4 CERES-Rice. Tesis M.Sc. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 102 p.
- Quaggio JA, Mascarenhas HA, Bataglia OC. 1982. Reposta da soja a aplicacao de doses crescentes de calcario em latossoloroxodistrofico de cerrado. R. Bras. Ci Solo 6: 113-118.
- Roel A. 2006. Análisis de cluster y CART. In: Bongiovanni R, Mantovani E, Best S, Roel A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 168-170
- Scharf PC, Shannon DK, Palm HL, Sudduth KA, Drummond ST, Kitchen NR, Mueller LJ, Hubbard VC, Oliveira LF. 2011. Sensor-based nitrogen applications out-performed producer-chosen rates for corn in on-farm demonstrations. Agronomy Journal. 103: 1683-1691.
- Seidl MS, Batchelor WD, Paz JO. 2000. Integrating remotely sensed images with a soybean model to improve spatial yield simulation. Transactions of the ASAE. Vol 47(6):2081-2090.
- Terra J, Melo D, Sawchik J. 2010. Atributos edáficos y topográficos relacionados a los patrones de variación de rendimiento de cultivos agrícolas en Uruguay. In: Reunión Técnica (1ª., 2010, Colonia del Sacramento, Colonia, Uruguay). Dinámica de las propiedades del suelo bajo diferentes usos y manejos. Montevideo, Sociedad Uruguaya de Ciencias del Suelo/International Soil and Tillage Research Organization. pp. 7-17.
- 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.
- Yule I, Pullanagari R. 2009. Use of reflectance sensors to optimise nutrient management. Palmerston North, New Zealand Centre for Precision Agriculture. s.p.

6. ANEXOS

6.1 RESPUESTA A DOSIS DE N SEGÚN ZONA DE MANEJO EN MAÍZ Y SORGO ¹

El interés actual de maximizar la eficiencia de uso de los recursos, mejorando la competitividad, en un sector agrícola donde los números económicos son cada vez más ajustados resulta clave. Sumado a la preocupación actual como futura sobre la sustentabilidad y la contaminación ambiental, conlleva a que el productor agropecuario busque nuevas tecnologías que maximicen la eficiencia de uso de los agroquímicos en general, con la premisa de aplicar lo justo y necesario para el cultivo, buscando la máxima respuesta y cuidando el medio ambiente.

La mayoría de los suelos agrícolas presentan variación en sus propiedades químicas, físicas y biológicas, siendo una parte variabilidad natural y otra resultante de las prácticas agrícolas (Bocchi y Castrignanó, 2007), constituyendo una situación típica de Uruguay (Ahunchain y Klaassen, 1990). En consecuencia, el rendimiento de los cultivos varía espacialmente.

El N es uno de los nutrientes principales, pudiendo ser en muchos casos determinante del rendimiento final. Por otro lado, los esquemas de fertilización nitrogenada actual basados en datos promedios del sitio, como ser nitrato promedio del potrero a diferentes profundidades o muestras de tejido vegetal promedio del potrero, no resultan ser eficientes, ya que la variabilidad espacial de potencial de rendimiento es alta y las prácticas de manejo de N tradicionales no atienden a la variabilidad que existe entre y dentro de los sitios (Scharf et al., 2011). Esto provoca que diferentes zonas dentro de una chacra queden subestimadas en su recomendación y el nutriente limitante, mientras en otras partes del sitio quedan sobreestimadas provocando gastos excesivos y un aumento de la probabilidad de pérdidas de N fuera del sistema.

Uno de los principales cometidos de la agricultura de precisión es poder mapear y entender la variación espacial y temporal de los sistemas productivos, no

¹ Artículo para publicar en la revista INIA

siendo su excepción los nutrientes del suelo, entre ellos el N. Actualmente la fertilización variable es una de las herramientas para trabajar dicha variación espacial, con el objetivo final de aumentar la eficiencia de uso de los nutrientes.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la respuesta de maíz y sorgo a la fertilización nitrogenada en ambientes de diferente potencial dentro de un sitio.

Experimento

El estudio se realizó en cuatro sitios en las zafras de verano 2013-2014, 2014-2015 y 2015-2016 en los establecimientos “El Ahorrillo”, “El Curupy”, “La Tacuara” y “Las Tres A”. Los predios están ubicados en los Departamentos de Soriano y Rio Negro.

Todos los establecimientos bajo estudio se encontraban en un esquema de agricultura de precisión bajo la modalidad de agricultura por ambientes.

Los criterios para diferenciar ambientes se basaron en el método propuesto por la empresa ADP S.A descrita por Bosh y Lecueder (2011) y Polak (2013).

La ambientación del campo se hizo a través de estudios planimétricos y altimétricos, historial de imágenes satelitales, monitores de rendimientos de zafras pasadas y correlación a campo (básicamente correlación de parámetros de descripción de suelos con nivel de producción) de la información recabada. Además de esto se ajustó la precisión del mapa de ambientes por medio de imágenes aéreas tomadas por un vehículo aéreo no tripulado (UAV), comúnmente conocido como dron, el cual cuenta con cámaras multiespectrales de mayor resolución espacial que la de los satélites, 30 cm x 30 cm vs 30 m x 30 m aproximadamente respectivamente.

Con el mapa de ambientes se definieron tres zonas o ambientes de diferente potencial: un ambiente “A”, que es aquel en el cual todos los años, independientemente de las condiciones climáticas y/o tipo de cultivo sembrado, se logran 30% o más de rendimiento que el promedio del campo; un ambiente “D”, en el cual todos los años los cultivos sembrados siempre rinden menos, siendo un 30% o menor al rendimiento promedio de la chacra. Por último, se identifica el ambiente “B” que es aquel que se comporta como irregular, dependiendo del clima, del cultivo

sembrado o de ambos, pudiendo comportarse como “A” o “D” según las condiciones establecidas. En la Figura 1 se presentan los mapas de ambientes de los establecimientos bajo estudio.

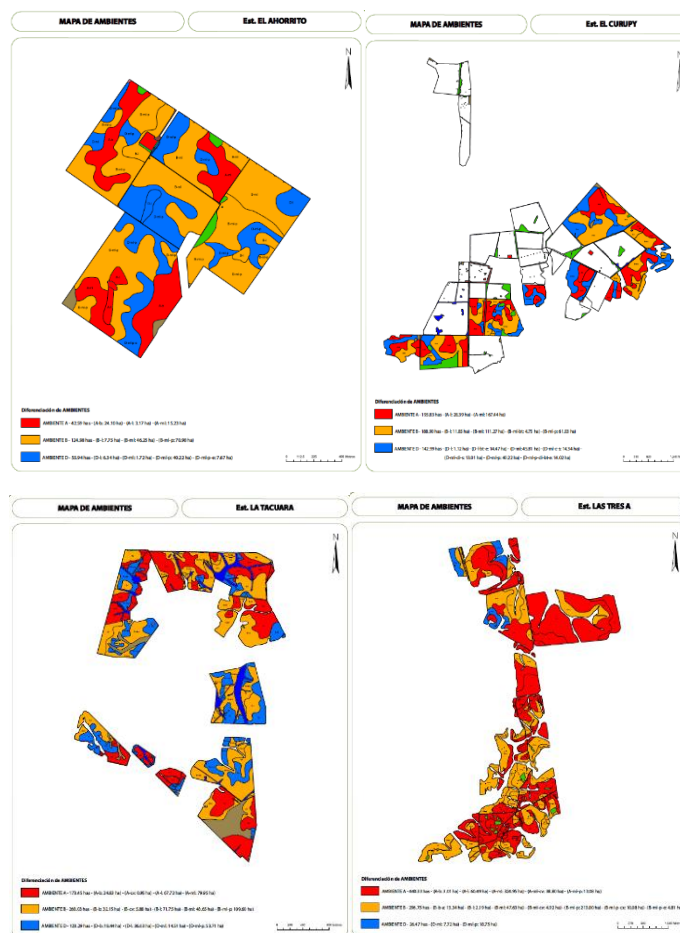


Figura 1. Mapas de ambientes de los predios bajo estudio. Fuente: zonificación realizada por la empresa ADP, citados en Bosh y Lecueder (2011) y Polak (2013).

Nota: Ambientes A que siempre presenta alto valor de Índice Verde Normal Diferenciado (IVDN); B: ambiente que presenta alto o bajo valor de IVDN, según el cultivo y/o año; D: ambiente que siempre presenta bajo IVDN. Segunda letra es posición topográfica: b: bajo; ml: media loma; l: loma. Tercera letra es información adicional: c: zonas cóncavas; cv: zonas convexas; e: zonas con erosión; ts: presencia de toasca; p: pendiente mayor a 3%.

Prescripciones de N

Generado el mapa de ambientes de cada campo, se diseñó un mapa de prescripción para las fertilizadoras variables que aplicaban en cada sitio, los archivos fueron generados en formato Shapefile para luego ser convertidos en los formatos utilizados por cada fertilizadora. El ensayo consistió en tres franjas de diferente dosis de N, siendo la fuente utilizada Sulfamax (40% N + 5% S). Las franjas atravesaban los ambientes de diferente potencial con tres repeticiones (resultando en nueve franjas), a excepción del establecimiento “El Curupy”, en el que por motivos del tamaño del ambiente se realizaron dos repeticiones (seis franjas). Las dosis de N en el momento de la prescripción fueron: 0, 48 y 104 kg N ha⁻¹, con excepción de “El Ahorrito” en donde las dosis fueron 0, 44 y 128 kg N ha⁻¹. Las prescripciones fueron aplicadas para maíz de primera en el caso de los establecimientos “El Curupy” y “Las Tres A”, en estado fenológico V4 y V8 respectivamente. En el caso de “El Ahorrito” y “La Tacuara” fueron gramíneas de verano de segunda, siendo maíz de segunda para el primero y sorgo de segunda para “La Tacuara”. En estos dos últimos campos las prescripciones fueron realizadas entorno a V4-V5. En la Figura 2 se puede apreciar ejemplos de las prescripciones realizadas en dos de los sitios bajo estudio.

El único manejo intervenido en este trabajo fue la prescripción de N bajo la metodología de franjas de diferentes dosis atravesando ambientes, el resto del manejo fue realizado por el técnico y/o productor a cargo.

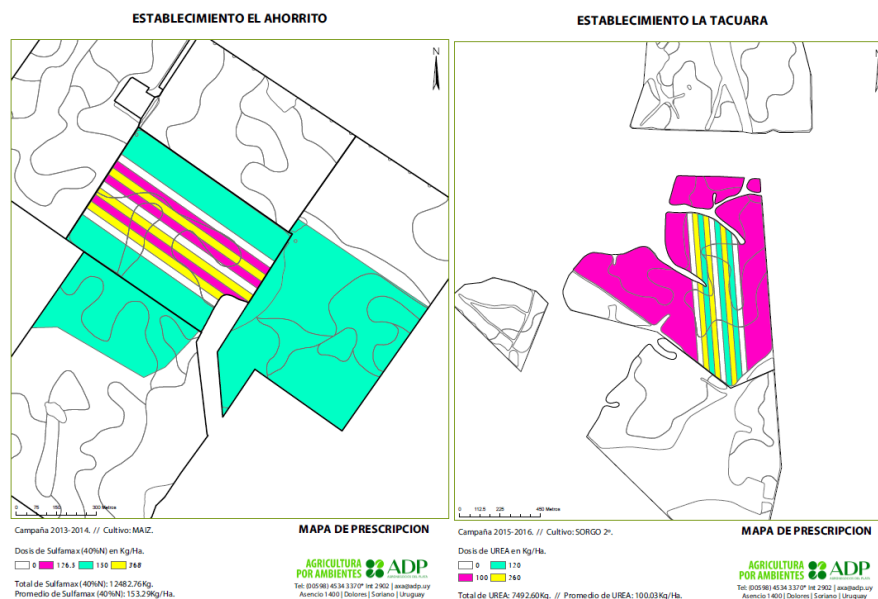


Figura 2. Ejemplo de las prescripciones de N realizadas en este estudio.

Muestreo de suelos

Durante el verano 2013-14, 2014-15 y 2015-16, previo a las prescripciones, se tomaron muestras de suelo del horizonte superficial (0-20 cm) con calador sobre las franjas correspondientes a dosis cero de N de cada ambiente por sitio.

Monitores de rendimiento

La información colectada mediante el monitor de rendimiento de la cosechadora permite cumplir con varios objetivos: 1) contribuye como capa de información para la delimitación de zonas de productividad, permitiendo determinar los rendimientos alcanzables por “chacra” o ambiente, lo cual se refuerza al acumular varios años de información de este tipo; 2) permite la evaluación de ensayos, por ejemplo, el análisis de ensayos de franjas a campo.

En este trabajo los datos de rendimientos utilizados para realizar los análisis fueron obtenidos a partir de monitores de rendimiento. Los datos fueron analizados estadísticamente, con bloques y tratamientos (ambientes o celdas x tratamiento de N). El tratamiento de parcela menor fue el ambiente. Los experimentos contaron con

tres bloques (repeticiones) con excepción del establecimiento “El Curupy”, en el que fueron dos dado el tamaño de ensayo. En la figura 3 se muestran ejemplos de dos de los sitios bajo estudio, donde se pueden observar los tratamientos superpuestos con los datos del monitor y el análisis mediante bloques y parcelas.

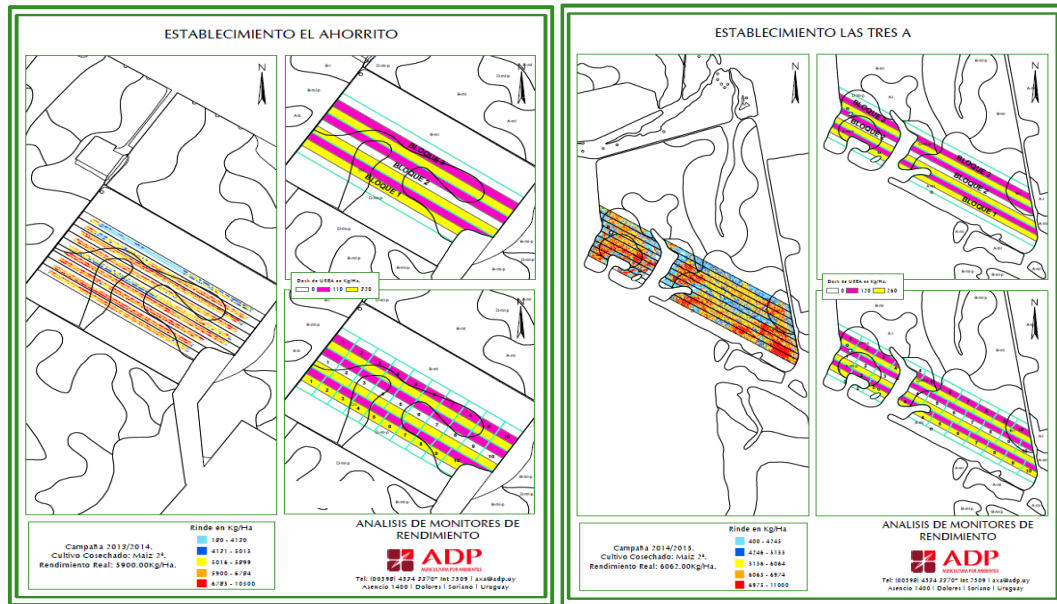


Figura 3. Ejemplo del análisis de los tratamientos mediante monitores de rendimiento, de dos de los sitios bajo estudio.

Resultados obtenidos

Cuando se analizan las variables químicas del suelo de los ambientes de diferente potencial en cada establecimiento (Cuadro 1), se observa una tendencia a que ambientes de mayor potencial (A) presentan mayores valores de PMN que ambientes de potencial variable (B) y bajo potencial (D), con diferencias significativas entre ambientes de alto y bajo potencial en dos de los cuatro sitios en estudios (“El Ahorrito” y “El Curupy”). Lo que puede estar infiriendo a que zonas de mayor productividad aportan mayor contenido de N proveniente de la mineralización que zonas de menor rendimiento. Eso concuerda con los trabajos de Gregoret et al. (2009) sobre sitios con maíz en la localidad de Manfredi, Argentina, los cuales

arrojaron contenidos y distribución en el perfil de N-NO₃ mayores en zonas de potencial más alto que ambientes de rendimiento inferior.

Cuadro 1. Análisis químico de ambientes de diferente potencial

Sitio	Ambiente completo	Resumen ambiente	PMN		N-NO ₃		N Total	
			Media (mg kg ⁻¹)	E.E.	Media (mg kg ⁻¹)	E.E.	Media (%)	E.E.
El Curupy	A	ALTO	54,00	1,27 b	11,05	1,10 a	0,22	0,02 a
El Curupy	D	BAJO	42,50	1,27 a	6,45	1,10 a	0,20	0,02 a
Las Tres A	A	ALTO	30,50	1,46 a	4,65	5,98 a	0,28	0,03 a
Las Tres A	B	BAJO	34,00	1,46 a	21,60	5,98 a	0,23	0,03 a
Las Tres A	D	BAJO	30,00	1,46 a	4,70	5,98 a	0,22	0,03 a
El Ahorríto	B	BAJO	30,00	1,00 a	4,70	2,65 b	1,30	0,10 b
El Ahorríto	D	ALTO	35,00	1,41 b	6,80	3,75 a	1,40	0,14 a
La Tacuara	B	ALTO	28,00	1,50 a	1,80	2,00 b	0,17	0,04 b
La Tacuara	D	BAJO	27,00	2,12 b	1,90	1,90 a	0,12	0,05 a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$). E.E.: Error estándar. PMN: Potencial de mineralización de N

Sitio “El Curupy”

El ambiente de menor potencial (D) a dosis cero de N en el momento de la prescripción genera rendimientos significativamente inferiores que el ambiente de mayor potencial (A) (Figura 4). A mayores dosis de N, la respuesta en el ambiente de inferior calidad es mayor, con una EUN de 17,3 kg grano kg N⁻¹. Similares conclusiones obtuvieron los trabajos de Pagani (2014) en zonas húmedas de Argentina, donde las condiciones que determinan mayor rendimiento de un cultivo no necesariamente determinan mayor respuesta a la aplicación de N. Si bien lo esperable es que el ambiente de mayor potencial concrete rendimientos superiores al ambiente de inferior calidad, en este caso puntual el agregado de N no provocó incrementos significativos de rendimiento al incorporar este insumo en el ambiente de mayor rendimiento.

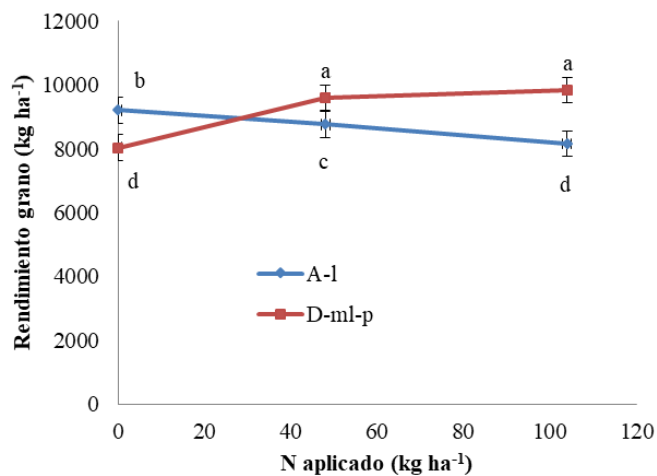


Figura 4. Respuesta de dosis de N por ambientes en el sitio “El Curupy”.

Los ambientes de mayor potencial presentaron significativamente mayor aporte de N por mineralización (PMN) que los ambientes de inferior potencial (Cuadro 1). Esto puede estar explicando las diferencias de rendimiento entre ambientes cuando no se aplica N en el momento de la prescripción, concordando en parte con trabajos de Pagani (2014), donde en las zonas deprimidas, la DOE de N puede verse reducida con respecto al promedio del sitio, debido al mayor aporte de N del suelo por mineralización.

Sitio “Las Tres A”

El ambiente de menor potencial (B), presenta mayor respuesta a dosis de N en el momento de la prescripción, con una EUN de 13,4 kg de grano kg N⁻¹. Para el ambiente de mayor rendimiento, si bien presenta menor respuesta al agregado de N, con una EUN de 9,7 kg de grano kg N⁻¹, el rendimiento final alcanzado es superior. Este sitio concuerda de forma general con la hipótesis del experimento, donde la respuesta de ambientes de menor potencial a dosis de N es superior pero el rendimiento final alcanzado es menor. Similares resultados obtuvieron Gregoret et al. (2009), donde se observó que la respuesta al Nf difirió según ZM y son diferentes al promedio del sitio, siendo mayores en zonas de alto potencial que de bajo potencial. Esta diferencia significativa entre variables ZM sugiere la existencia de variables

sitio-específicas que interactúan con el Nf, tales como el N y agua a la siembra, y que no son homogéneas en todo el sitio.

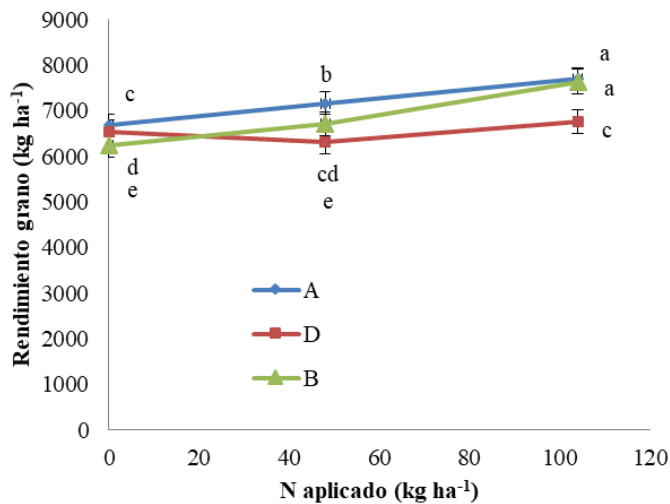


Figura 5. Respuesta de dosis de N por ambientes en el establecimiento “Las Tres A”

Sitio “La Tacuara”

Al igual que en el establecimiento “El Curupy”, el ambiente de menor potencial (D) presenta menor rendimiento que el ambiente B a dosis 0 de N en el momento de la prescripción, aunque la respuesta al aplicar fertilizante nitrogenado es mayor en el ambiente D que en el B, con EUN de 18,6 y 13,0 kg de grano kg N⁻¹ respectivamente.

Si bien la mayor respuesta concuerda con la hipótesis del trabajo, al igual que los trabajos de Pagani (2014), no concuerda en que el rendimiento final del ambiente de menor potencial sea mayor. Otro aspecto importante a remarcar es el bajo rendimiento del cultivo, lo que puede estar explicado por variables aún más limitantes, como puede ser la disponibilidad de agua, entre otras.

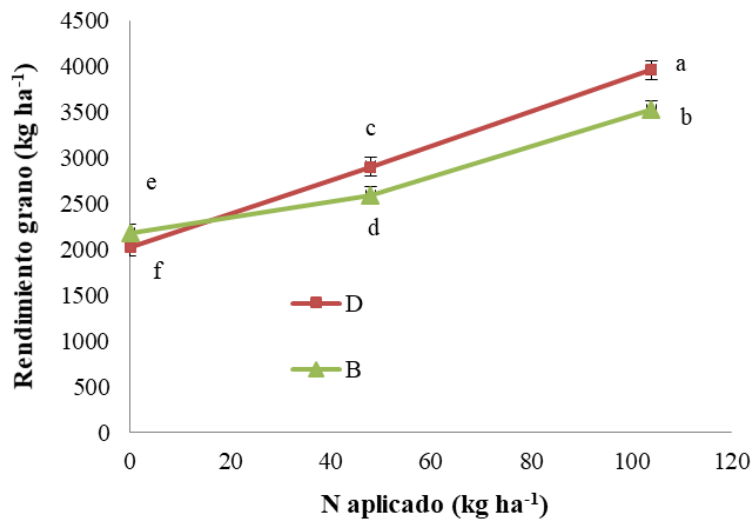


Figura 6. Respuesta de dosis de N por ambientes en el establecimiento “La Tacuara”.

Sitio “El Ahorruto”

Para el sitio “El Ahorruto” junto con “Las Tres A” son los experimentos que más coincidencias con la hipótesis presentan. El ambiente de menor potencial (B) presenta una mayor EUN en el rango de dosis de 0-128 kg ha⁻¹ que el ambiente D, con valores de 11,5 kg de grano kg N⁻¹ y 7,3 kg de grano kg N⁻¹ respectivamente (Figura 7). A su vez en cada ambiente hay diferencias en las EUN según las dosis utilizadas en el momento de la prescripción, en el B en el rango de 0-44 kg N ha⁻¹ se obtuvo una EUN de 26,9 kg de grano kg N⁻¹ mientras que en el rango 44-128 kg ha⁻¹ esta fue de 3.4 kg de grano kg N⁻¹. En lo que al ambiente D respecta, las EUN fueron de 15,6 kg de grano kg N⁻¹ y 2,9 kg de grano kg N⁻¹ para los rangos de 0-44 kg ha⁻¹ y 44-128 kg ha⁻¹ respectivamente.

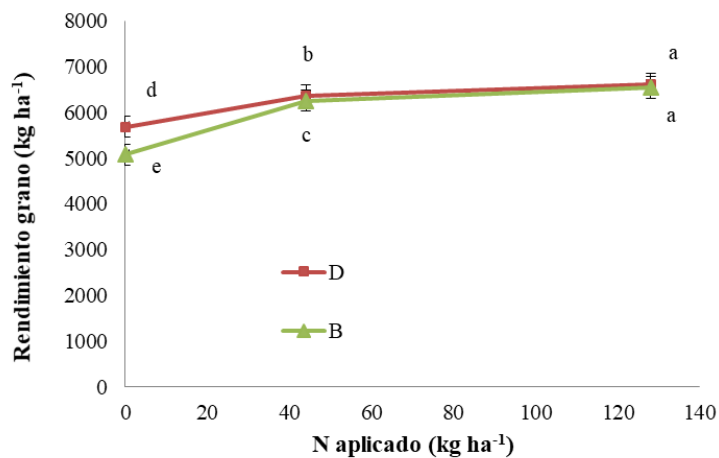


Figura 7. Respuesta de dosis de N por ambientes en el establecimiento “El Ahorruto”

Independientemente del grado de respuesta de los ambientes, si bien las diferencias de rendimientos entre ZM no es tan marcada, lo que podría deberse a los bajos rendimientos obtenidos, la ZM de mayor potencial finaliza alcanzando rendimientos superiores, lo que lleva a suponer que la limitante en el final de la recta no es N. Este experimento también coincide con trabajos realizados por Jaynes et al. (2011) citados por Pagani (2014) en el estado de Iowa, EE. UU. donde ambientes de posición topográfica baja, responden menos a N, pero el rendimiento final es mayor.

Es probable que la limitante al finalizar la curva no esté asociada a N, lo que conlleva a que ambiente de mayor potencial disponga de más N (menor respuesta a N) pero también de otras propiedades: edafológicas (CAAD, profundidad total del perfil, estructura y textura de suelo); física y/o química de suelo (Dap, pH, P, K, Mo, etc), que determinan rendimientos finales mayores

Análisis de los sitios en conjunto

Se observó que los mayores rendimientos se obtuvieron con la dosis más alta (Figura 8), mostrando una clara respuesta al agregado de N. A su vez, a partir de los datos obtenidos no se puede tener la certeza de si la dosis correspondiente al

tratamiento que recibió la mayor cantidad de N fue suficiente, ya que hay curvas que no presentan una fase plateau.

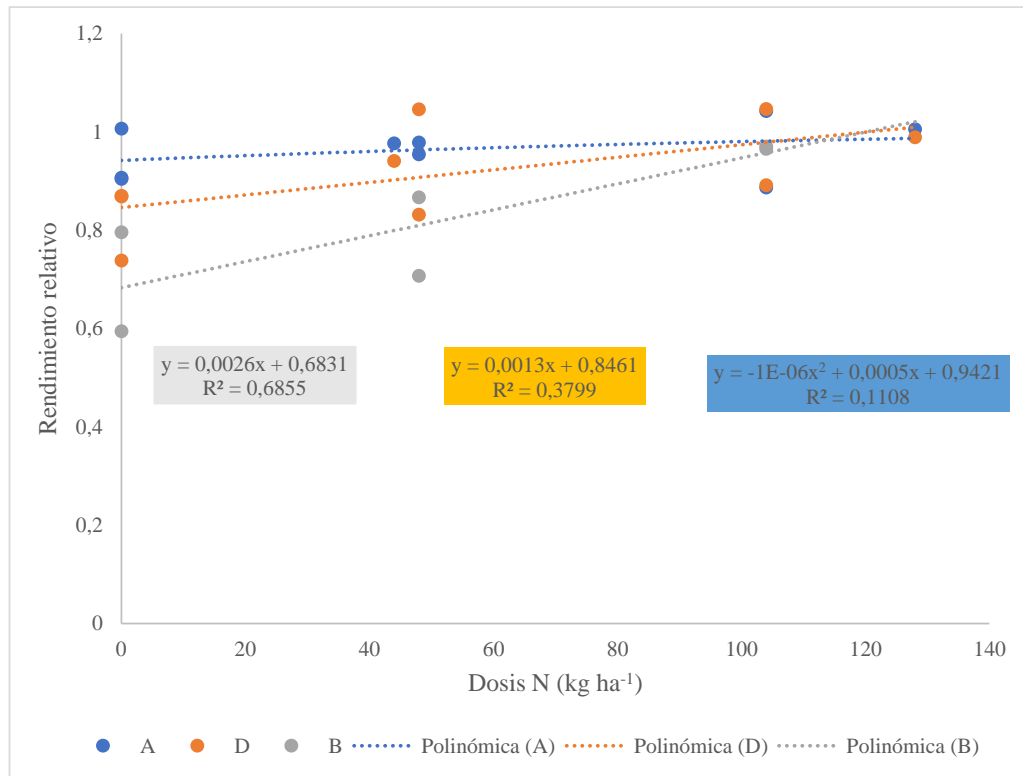


Figura 8. Rendimiento relativo de los ambientes de los cuatro sitios en función de la dosis de N.

Se observa una tendencia similar a la encontrada en los sitios individualmente, la pendiente de los ambientes de menor potencial es mayor que la de los ambientes que rinden más cuando no se aplica N. Esto concuerda con la hipótesis planteada, no así el rendimiento máximo logrado, donde los ambientes de mayor potencial no obtienen rendimientos superiores con las dosis más elevadas de N. En el análisis por sitio individual se puede visualizar casos como “El Ahorrito” o “La Tacuara”, en los cuales los ambientes de mayor potencial alcanzan mayores rendimientos con las dosis más altas de N, concordando en su conjunto con toda la hipótesis del trabajo. Resulta complejo identificar las causas por lo cual los ambientes de bajo potencial finalizan superando el rendimiento de los de alto potencial en los otros dos sitios experimentales (“El Curupí” y “Las Tres A”). Una posible causa podría ser la dosis

más alta, la cual puede ser insuficiente para satisfacer la respuesta o necesidad de N del ambiente de bajo potencial o estar lejos de ser la dosis máxima del de alto potencial, el cual, si bien presenta menor pendiente, puede si responder a mayores dosis.

Conclusiones

En todos los sitios bajo estudio existió una respuesta diferencial a dosis de N. La misma fue positiva, es decir, los mayores rendimientos se obtuvieron con las mayores dosis de N. El rendimiento fue significativamente diferente entre ambientes cuando no se aplicó de N en el momento de la prescripción (testigos) en todos los sitios bajo estudio. En líneas generales la definición de ambientes de la empresa ADP S.A. concuerda con los datos obtenidos en este trabajo. Tanto para el cultivo de maíz como para sorgo existió una mayor respuesta al agregado de N en el momento de la prescripción en ambientes de bajo potencial, con EUN que se encuentran entre 11,5 y 18,6 kg de grano kg N⁻¹. Con respecto a los ambientes de alto potencial, en uno de los sitios no se observaron incrementos de los rendimientos al agregar N, mientras que en el resto se obtuvieron EUN entre 7,3 y 13,0 kg de grano kg N⁻¹. Esta diferencia en la eficiencia en el uso del nutriente se da en mayor medida en las dosis más bajas. Se observa una tendencia a que los ambientes de menor rendimiento alcanzado cuando no se aplica N en el momento de la prescripción presentan menores valores de PMN, mientras que los ambientes de mayor rendimiento alcanzado en estas condiciones son los que mayor N residual tienen. Esto fue claro y significativo en 2 de los 4 sitios. Esta diferencia del indicador PMN puede ser uno de los factores que expliquen su mayor respuesta al agregado de N, sobre todo en los tratamientos de menor dosis en ambientes de menor potencial. Aunque es necesario continuar investigando sobre este aspecto, para poder determinar si el PMN puede ser utilizado como herramienta para discriminar ambientes. En tres de cuatro sitios se observaron diferencias en rendimiento máximo alcanzado con las dosis más altas de N, aunque no fue clara la asociación con ambientes clasificados como de mayor o menor potencial. “El Ahorruto” y “La Tacuara” fueron dos de los cuatro sitios donde

la hipótesis se cumplió: la mayor respuesta al agregado de N en el momento de la prescripción se observó en ambientes de bajo potencial, pero siendo los de alto potencial las que mayor rendimiento lograron con las máximas dosis de N. Si bien el mayor rendimiento a dosis altas de N no se obtuvo en ambientes clasificados como de alto potencial en los otros dos sitios, existen varias causas posibles, como por ejemplo, podría ser que la dosis de N máxima no haya podido satisfacer el total de respuesta del ambiente D y expresar otras limitantes de este ambiente, como tampoco identificar el real potencial de los denominados ambientes de alto rendimiento. En los otros dos sitios, existen varias causas posibles por lo cual no se cumple con la hipótesis, por ejemplo, podría ser que la dosis de N máxima no haya podido satisfacer el total de respuesta del ambiente D y expresar otras limitantes de este ambiente, como tampoco identificar el real potencial de los denominados ambientes de alto rendimiento. Las curvas que representan la respuesta diferencial por ambiente dejan de manifiesto la importancia del uso de modelos de fertilización variable de N para cada ambiente.

Bibliografía

- Ahunchain M, Klaassen M. 1990. Causas de variabilidad de rendimiento en Trigo. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 165 p.
- Bocchi S, Castrignanó A. 2007. Identification of potential production areas for corn in Italy through multitemporal yield map analysis. *Field Crops Research*. 102 (3): 185–197.
- Bosh F, Lecueder F. 2011. Relación entre el rendimiento de soja de segunda y la variación espacial de los atributos edáficos dentro de una misma chacra. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de agronomía. 58p.
- Polak G. 2013. Agricultura de precisión para la corrección de ambientes con elevado valor de sodio intercambiable. Tesis especialista de la universidad de Buenos Aires en fertilidad de suelos y fertilización. Buenos Aires, Argentina. Facultad de agronomía. 47p

- Scharf PC, Shannon DK, Palm HL, Sudduth KA, Drummond ST, Kitchen NR, Mueller LJ, Hubbard VC, Oliveira LF. 2011. Sensor-based nitrogen applications out-performed producer-chosen rates for corn in on-farm demonstrations. *Agronomy Journal*. 103: 1683-1691.
- Gregoret M, Díaz Zorita M, Dardanelli J, Bongiovanni R. 2009. Modelo regional de respuesta de maíz al nitrógeno con variables sitio-específicas en ambientes semiáridos. *Informaciones Agronómicas*. 43 (3): 12-15.
- Pagani A. 2014. Manejo sitio-especifico de nutrientes. Pp 839-870. En: H. E Echeverría, y F.O. García (eds.). *Fertilidad de Suelos y fertilización de Cultivos*. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.

6.2 . SITIO “EL CURUPY”

DOSIS	Variable	n	Media	D.E.	CV	Mín.	Máx.	Mediana	P (25)	P (75)
0	Mz15_16	1347	8230,91	2366,09	28,75	637,5	14368,43	8807,25	7499,23	9712,72
120	Mz15_16	1080	8925,2	1880,99	21,08	1946,59	16868,03	9010,55	8118,44	9970,04
260	Mz15_16	1054	8725,83	2540,87	29,12	1160,33	14532,53	9265,94	7294,83	10455,89

DOSIS	LEYENDA	n	Media	D.E.	CV	Mín.	Máx.	Mediana	P (25)	P (75)
0	A-l	515	8986	1210	13	4279	12736	8909	8283	9704
0	D-ml-p	832	7763	2755	35	638	14368	8589	5725	9715
120	A-l	544	8521	1415	17	2560	14426	8584	7954	9301
120	D-ml-p	536	9336	2184	23	1947	16868	9652	8491	10591
260	A-l	455	7917	2643	33	1160	14533	8292	6615	9681
260	D-ml-p	599	9340	2278	24	2232	14385	9882	8235	10835

REML Variance Component Estimates

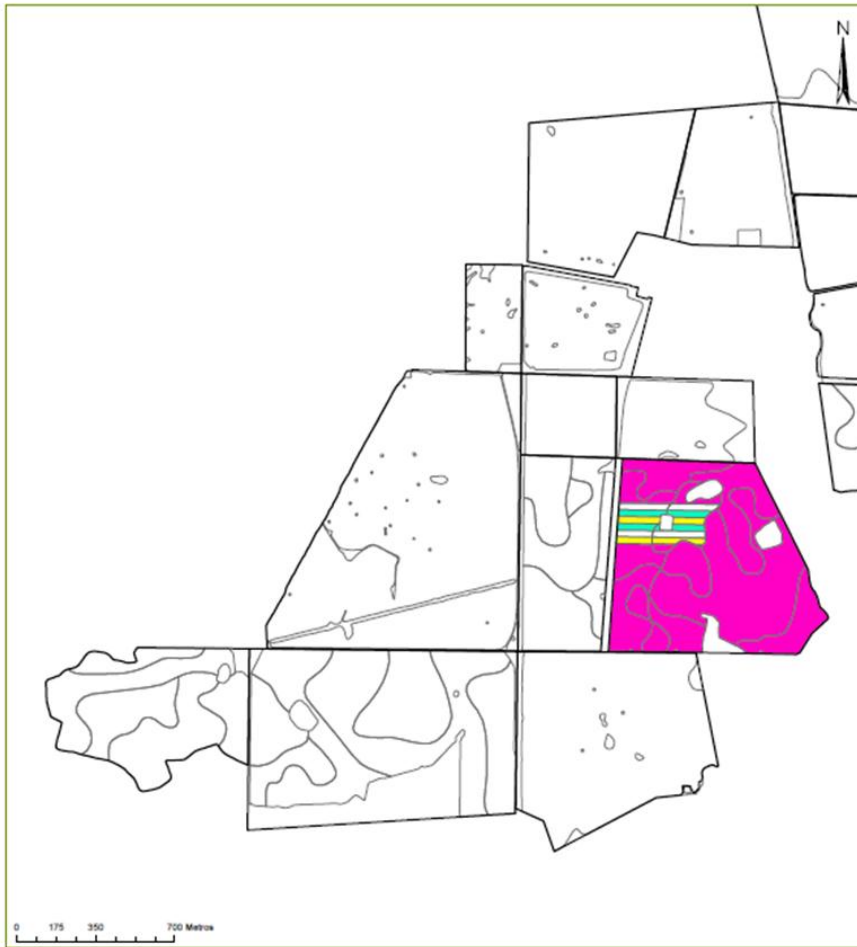
Random Effect	Var Ratio	Var Component	Std Error	95% Lower	95% Upper	Pct of Total
Bloque	0.060276	305962	437023	-550588	1162512	5.685
Residual		5076017	121793	4845516	5323448	94.315
Total		5381979	453657	4592789	6394786	100

-2 LogLikelihood	AICc	BIC
63566.99	63583.03	63632.23

Fixed Effect Tests

Source	Nparm	DF	DFDen	F Ratio	Prob > F
Ambiente	1	1	3475	32.0482	<.0001
DOSIS	2	2	3475	19.1142	<.0001
AMBIENTE*DOSIS	2	2	3474	122.756	<.0001

ESTABLECIMIENTO EL CURUPY



Zafra 2015-2016// Cultivo: Maíz

Dosis de UREA en Kg/Ha.

0 180
120 260

Total de UREA: 11085.60Kg. // Promedio de UREA: 173.51Kg/Ha.

MAPA DE PRESCRIPCIÓN

AGRICULTURA
POR AMBIENTES  ADP
AGROPECUARIOS DEL PLYTA
Tel: (00598) 4534 3370* Int 2902 | axa@adp.uy
Asencio 1400 | Dolores | Soriano | Uruguay

ESTABLECIMIENTO CURUPY



Zafra 2015/2016
Cultivo Cosechado: Maíz.
Rendimiento Real: 9110.00Kg/Ha.

Rinde en Kg/Ha

500 - 6771
6772 - 7727
7728 - 9102
9103 - 10467
10467 - 16500

ANALISIS DE MONITORES DE RENDIMIENTO



Tel: (00358) 4334 2270 Int 2309 | axa@adp.uy
Asencia 1400 | Dolores | Soriano | Uruguay

6.3 SITIO “LAS TRES A”

DOSIS	n	Media	D.E.	CV	Mín.	Máx.	Mediana	P (25)	P (75)
0	6789	5465	1782	33	416	11021	5412	4250	6660
120	6596	5682	1645	29	459	11089	5819	4877	6674
260	6658	6160	1735	28	432	11130	6232	5209	7249

DOSIS	LEYENDA	n	Media	D.E.	CV	Mín.	Máx.	Mediana	P(25)	P(75)
0	A-l	121	4235	2187	52	435	10241	4599	2279	6013
0	A-ml	3848	5518	1740	32	427	10955	5314	4274	6689
0	A-ml-p	429	6602	1131	17	2346	10076	6619	5912	7346
0	B-l	434	5056	1655	33	416	10139	5009	3931	6244
DOSIS	LEYENDA	n	Media	D.E.	CV	Mín.	Máx.	Mediana	P(25)	P(75)
0	D-ml-p	1778	5352	1896	35	438	11021	5489	4155	6605
120	A-ml	3179	6048	1252	21	667	11074	6009	5304	6752
120	A-ml-p	706	5940	1470	25	636	10833	6067	5016	6928
120	B-l	657	5514	1675	30	459	10043	5640	4497	6599
120	B-ml	101	4215	1333	32	722	6299	4422	3523	5137
120	D-ml-p	1953	5125	2024	40	465	11089	5378	3888	6494
260	A-ml	3866	6352	1520	24	460	11130	6298	5465	7282
260	A-ml-p	728	6810	1493	22	498	10661	6931	6051	7734
260	B-l	339	5984	1436	24	1911	9502	6144	5028	6946
260	B-ml	5	5588	531	10	5046	6199	5471	5139	6085
260	D-ml-p	1720	5492	2096	38	432	11058	5649	4095	6912

REML Variance Component Estimates

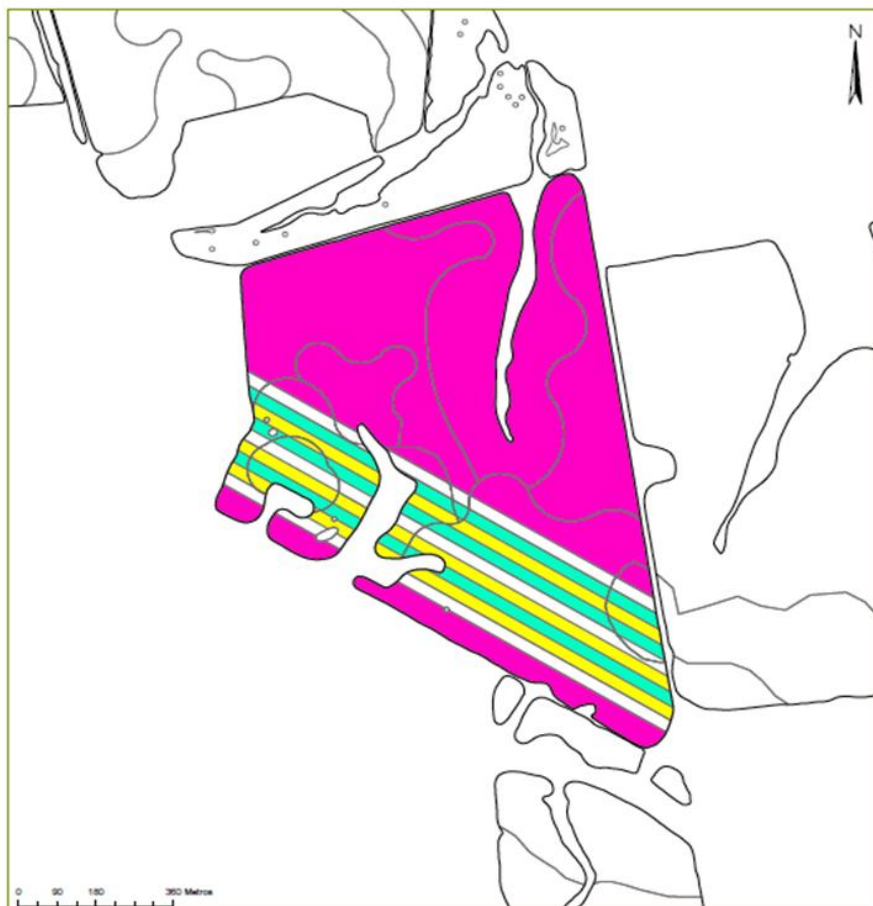
Random Effect	Var Ratio	Var Component	Std Error	95% Lower	95% Upper	Pct of Total
Bloque	0.0466906	188827.35	189545.68	-182675.4	560330.04	4.461
Residual		4044222.1	40409.907	3966174.2	4124607.5	95.539
Total		4233049.4	193803.77	3877475.1	4640140.2	100

-2 LogLikelihood	AICc	BIC
361718	361740	361827

Fixed Effect Tests

Source	Nparm	DF	DFDen	F Ratio	Prob > F
DOSIS	2	2	20033	143.4847	<.0001
Ambiente	2	2	20016	179.5942	<.0001
Ambiente*DOSIS	4	4	20033	33.6637	<.0001

ESTABLECIMIENTO LAS TRES A



Zafra 2014-2015//Cultivo: Maíz

Dosis de UREA en Kg/Ha.

0 120
80 260

Total de UREA: 8195.40Kg. // Promedio de UREA: 94.72Kg/Ha.

MAPA DE PRESCRIPCION

AGRICULTURA
POR AMBIENTES  ADP
Asociación de Productores del Plata
Tel: (00598) 45 34 3370* Int 2902 | axa@adp.uy
Asencio 1400 | Dolores | Soriano | Uruguay

ESTABLECIMIENTO LAS TRES A

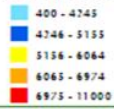


Dosis de UREA en Kg/HA.



Zafra 2014/2015
Cultivo Cosechado: Maíz 2ª.
Rendimiento Real: 6062.00Kg/Ha.

Rinde en Kg/Ha



ANALISIS DE MONITORES DE RENDIMIENTO



Tel: (00598) 4524 2270* Int: 2309 | axa@adp.uy
Asencio 1400 | Dolores | Soriano | Uruguay

6.4 SITIO “LA TACUARA”

DOSIS	n	Media	D.E.	CV	Mín.	Máx.	Mediana	P(25)	P(75)
0	4032	2139	556	26	445	4680	2052	1740	2462
120	4538	2671	763	29	397	5665	2558	2137	3107
260	4289	3662	1209	33	400	7134	3553	2701	4532

DOSIS	LEYENDA	n	Media	D.E.	CV	Mín	Máx.	Mediana	P(25)	P(75)
0	B-l	776	2525	561	22	1048	4680	2447	2120	2859
0	B-ml-p	2134	2050	523	26	445	4548	1977	1696	2335
0	D-l	1122	2040	497	24	1025	4080	1945	1678	2345
120	B-l	789	2898	805	28	1532	5665	2656	2269	3467
120	B-ml-p	2600	2497	693	28	397	5426	2432	2016	2916
120	D-l	1149	2908	780	27	1294	5196	2778	2341	3440
260	B-l	314	3380	1125	33	1521	6103	3060	2486	4292
260	B-ml-p	2598	3554	1201	34	400	7127	3431	2645	4406
260	D-l	1377	3930	1195	30	1489	7134	3917	2921	4797

REML Variance Component Estimates

Random Effect	Var Ratio	Var Component	Std Error	95% Lower	95% Upper	Pct of Total
Bloque	0.0387419	29122.384	29302.567	-28309.59	86554.361	3.73
Residual		751701.99	9377.6116	733655.56	770425.77	96.27
Total		780824.38	30765.854	723866.37	844815.08	100

-2 LogLikelihood	AICc	BIC
210442	210457.7	210517.4

Fixed Effect Tests

Source	Nparm	DF	DFDen	F Ratio	Prob > F
DOSIS	2	2	12852	3173.324	<.0001
Ambiente	1	1	12853	130.5784	<.0001
Ambiente*DOSIS	2	2	12852	105.9041	<.0001

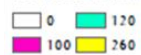
ESTABLECIMIENTO LA TACUARA



Zafra 2015-2016//Cultivo: Sorgo

MAPA DE PRESCRIPCIÓN

Dosis de UREA en Kg/Ha.



Total de UREA: 7492.60Kg. // Promedio de UREA: 100.03Kg/Ha.

**AGRICULTURA
POR AMBIENTES**  **ADP**
AGROPECUARIO DEL PLATA

Tel: (00598) 45 34 3370* Int 2902 | axa@adp.uy
Asencio 1400 | Dolores | Soriano | Uruguay

6.5 SITIO “EL AHORRITO”

DOSIS	n	Media	D.E.	CV	Mín.	Máx.	Mediana	P(25)	P(75)
0	1896	5336	1237	23	1454	9486	5558	4679	6162
110	1994	6318	765	12	3081	9332	6360	5883	6829
320	1995	6582	713	11	2041	9256	6594	6162	7027

DOSIS	LEYENDA	n	Media	D.E.	CV	Mín.	Máx.	Mediana	P(25)	P(75)
0	B-ml	1073	4862	1271	26	1454	9486	5150	4100	5761
0	D-l	176	5766	859	15	4153	8345	5799	5023	6340
0	D-ml-p	647	6004	859	14	3082	9063	6091	5536	6522
110	B-ml	951	6193	867	14	3081	9332	6255	5671	6796
110	D-l	177	6401	600	9	4734	7737	6441	6037	6796
110	D-ml-p	866	6437	646	10	3505	8394	6449	6039	6874
320	B-ml	667	6509	823	13	2041	9228	6525	6085	7001
320	D-l	167	6729	631	9	4984	8509	6713	6310	7163
320	D-ml-p	1161	6603	650	10	3089	9256	6619	6181	7025

REML Variance Component Estimates

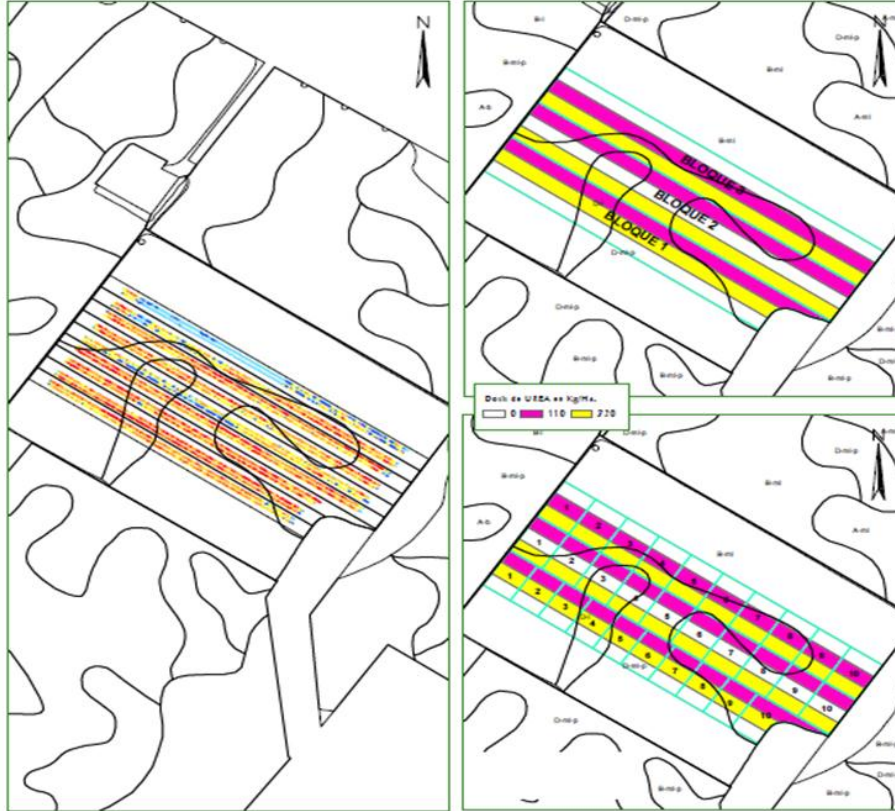
Random Effect	Var Ratio	Var Component	Std Error	95% Lower	95% Upper	Pct of Total
Bloque	0.2307855	157066.58	157503.87	-151635.3	465768.5	18.751
Residual		680573.83	12554.876	656621.81	705867.18	81.249
Total		837640.42	158002.77	597387.73	1259507.5	100

-2 LogLikelihood	AICc	BIC
95705	95721	95774

Fixed Effect Tests

Source	Nparm	DF	DFDen	F Ratio	Prob > F
DOSIS	2	2	5877	1069.64	<.0001
Ambiente	1	1	5879	126.5457	<.0001
Ambiente*DOSI					
S	2	2	5878	56.7493	<.0001

ESTABLECIMIENTO EL AHORRITO



Zafra 2013/2014
 Cultivo Cosechado: Maíz 2ª.
 Rendimiento Real: 5900.00Kg/Ha.

Rinde en Kg/Ha	
190 - 4120	4121 - 5015
5016 - 5899	5900 - 6784
6785 - 10500	

ANALISIS DE MONITORES DE RENDIMIENTO



Tel: (00358) 4524 2270* Int: 2509 | axa@adp.uy
 Asencio 1400 | Dolores Soriano | Uruguay