



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Diagnóstico y manejo de la variabilidad espacial del rendimiento de maíz bajo riego

Gastón Sebben Fontana

Magíster en Ciencias Agrarias
Opción Ciencias Vegetales

Diciembre, 2023

Diagnóstico y manejo de la variabilidad espacial del rendimiento de maíz bajo riego

Gastón Sebben Fontana

Magíster en Ciencias Agrarias
Opción Ciencias Vegetales

Diciembre, 2023

Tesis aprobada por el tribunal integrado por Ing. Agr. (PhD.) Álvaro Roel, Ing. Agr. (Dr.) Sebastián Mazzilli y Ing. Agr. (PhD.) María Cristina Capurro el 20 de diciembre de 2023. Autor: Ing. Agr. Gastón Sebben Fontana. Director: Ing. Agr. (Dr.) Luis Giménez. Codirector: Ing. Agr. (Dr.) Oswaldo Ernst.

AGRADECIMIENTOS

Enorme agradecimiento a todos los integrantes del grupo de Regadores Unidos del Uruguay y a mi familia por el apoyo en este proceso, a los tutores Luis Giménez y Oswaldo Ernst por el gran trabajo realizado para lograr este trabajo.

Fundamentalmente es muy importante agradecer a quienes estuvieron constantemente dando apoyo y ayudando en la práctica a que el trabajo salga adelante. Por esto muchas gracias a Santiago Arana, Diego Guigou, Martin da Costa, Hernan Masoller, Diego García, Carlos Lavista, Juan Carlos Baroffio y Juan Miguel Pastorini.

También gracias a Andrés Quincke, Claudio Garcia, Tomas Molina y Javier Moreira de Souza por contribuir a las mediciones realizadas en este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
RESUMEN.....	VIII
SUMMARY	XI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1. FACTORES DETERMINANTES DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL	2
1.2. MANEJO SITIO-ESPECÍFICO DE CULTIVOS	4
1.3. MANEJO EFICIENTE DEL NITROGENO EN AGRICULTURA	5
1.4. HIPÓTESIS	6
1.5. OBJETIVOS	6
2. <u>VARIABILIDAD ESPACIAL DE FACTORES EDAFO-CLIMÁTICOS LIMITANTES DEL RENDIMIENTO EN MAÍZ BAJO RIEGO</u>	7
2.1. RESUMEN.....	7
2.2. SUMMARY	8
2.3. RESUMO.....	9
2.4. INTRODUCCIÓN.....	10
2.5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
2.5.1. <u>Sitio experimental</u>	13
2.5.2. <u>Estrategia experimental</u>	13
2.5.3. <u>Determinaciones</u>	15
2.5.3.1. Determinaciones en el suelo	15
2.5.3.2. Determinaciones en el cultivo	16
2.5.3.3. Estatus hídrico del cultivo	16
2.5.4. <u>Análisis estadístico</u>	17
2.5.4.1. Autocorrelación espacial.....	17
2.5.4.2. Factores limitantes del rendimiento.....	18
2.6. RESULTADOS	19
2.6.1. <u>Estadísticas descriptivas</u>	19
2.6.2. <u>Respuesta del rendimiento a variables del suelo y del cultivo</u> ..	21
2.6.3. <u>Limitantes sitio-específicas del rendimiento</u>	23
2.6.4. <u>Distribución espacial de los factores limitantes</u>	25

2.6.5. <u>Brechas de rendimiento explicadas por factores limitantes según zonas de productividad</u>	27
2.7. DISCUSIÓN.....	29
2.8. CONCLUSIONES	31
2.9. AGRADECIMIENTOS.....	32
2.10. BIBLIOGRAFÍA	32
2.11. ANEXOS	38
3. <u>RESPUESTA SITIO-ESPECÍFICA A LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN MAÍZ BAJO RIEGO</u>	41
3.1. RESUMEN.....	41
3.2. SUMMARY	42
3.3. RESUMO.....	43
3.4. INTRODUCCIÓN.....	44
3.5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	46
3.5.1. <u>Sitio experimental</u>	46
3.5.2. <u>Estrategia experimental</u>	47
3.5.3. <u>Determinaciones</u>	48
3.5.3.1. Determinaciones en el suelo.....	48
3.5.3.1.1. Estimadores de propiedades químicas	49
3.5.3.1.2. Propiedades físicas	49
3.5.3.1.3. Variables que caracterizan el aporte de agua	49
3.5.3.2. Determinaciones en el cultivo	50
3.5.3.2.1. Estatus hídrico del cultivo	50
3.5.3.2.2. El Cuantificación de la eficiencia de uso del nitrógeno.....	51
3.5.4. <u>Análisis estadístico</u>	52
3.5.4.1. Autocorrelación espacial.....	52
3.5.4.2. Análisis de componentes principales	52
3.5.4.3. Efectos de los tratamientos y su interacción	53
3.5.4.4. Regresión entre propiedades físicas y EUNam.....	54
3.6. RESULTADOS	54
3.6.1. <u>Respuesta sitio-específica al nitrógeno</u>	56
3.6.1. <u>Relación entre propiedades físicas e hídricas del suelo y eficiencia de uso de nitrógeno</u>	60
3.6.1. <u>Relación entre propiedades químicas del suelo y eficiencia de uso de nitrógeno</u>	64

3.7.	DISCUSIÓN.....	66
3.8.	CONCLUSIONES.....	68
3.9.	AGRADECIMIENTOS.....	69
3.10.	BIBLIOGRAFÍA.....	69
3.11.	ANEXOS.....	74
4.	<u>DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES</u>	79
5.	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	82

RESUMEN

Los objetivos del trabajo fueron: I) determinar limitantes sitio-específicas del rendimiento según la ley de Von Liebig (1863); II) determinar la relación entre la eficiencia de uso del nitrógeno marginal (EUNam) y las propiedades físicas y químicas del suelo limitantes del rendimiento, y III) determinar la respuesta sitio-específica a dos dosis de nitrógeno (N). Se realizó un experimento en maíz en condiciones de producción comercial bajo riego, aplicando dos tratamientos de labranza (con y sin descompactador) para generar variabilidad en las propiedades físicas y tres dosis de N (80, 160 y 230 UN ha⁻¹). La chacra se desarrollaba bajo un sistema de agricultura continua en siembra directa desde hace más de 20 años. El área experimental fue de 5,5 ha y fueron referenciados 54 puntos de muestreo, donde se determinaron atributos físicos y químicos del suelo, el estatus nutricional del cultivo en floración y el rendimiento. Se relacionaron las propiedades de suelo con el rendimiento de maíz a través del análisis de curva de frontera y considerando la ley del mínimo se identificaron las propiedades limitantes del rendimiento. Los resultados indicaron diferencias en las propiedades físico-químicas del suelo entre zonas de productividad (definidas con mapas de rendimiento antecedentes), las que limitaron el rendimiento en las zonas de menor productividad. La CAAD (capacidad de almacenaje de agua disponible) y la Dap (densidad aparente) limitaron el rendimiento en el 44 % del área, mientras que el contenido de N foliar, la relación (Ca + Mg) / K y el Na-Int limitaron el rendimiento en 30, 20 y 6 % del área, respectivamente. La respuesta al N y la EUNam varió entre zonas dependiendo de la limitante principal para el rendimiento y el valor de esta. La zona de mayor productividad (AP) tuvo respuesta hasta 160 UN ha⁻¹, permitiendo que la EUNam se mantuviera sin cambios hasta 230 UN ha⁻¹. En la zona de menor productividad (BP) se registró respuesta hasta 160 UN ha⁻¹. La zona intermedia (MP) mostró una baja respuesta al N, con la EUNam más baja. Los cambios provocados en las propiedades físicas, por el uso del paraplow, no modificaron el rendimiento.

Palabras clave: manejo sitio-específico, paraplow, nitrógeno, EUN

DIAGNOSIS AND MANAGEMENT OF THE SPATIAL VARIABILITY OF IRRIGATED CORN YIELD

SUMMARY

The objectives of this research were to: I) identify site-specific yield limitations according to Von Liebig's law (1863); II) determine the relationship between the marginal nitrogen use efficiency (EUNam) and the physical and chemical properties of the soil limiting yield, and III) determine the site-specific response to two doses of nitrogen (N). An experiment was carried out in corn under commercial production conditions under irrigation, applying two tillage treatments (with and without a decompactor) to generate variability in physical properties and three doses of N (80, 160 and 230 UN ha⁻¹). The farm was developed under a continuous agriculture system in direct sowing for more than 20 years. The experimental area was 5,5 ha and 54 sampling points were referenced, where physical and chemical attributes of the soil, the nutritional status of the flowering crop and yield were determined. Soil properties were related to corn yield through boundary curve analysis and considering the law of the minimum, the limiting properties of yield were identified. The results indicated differences in the physical-chemical properties of the soil between productivity zones (defined with antecedent yield maps), which limited yield in the lower productivity zones. CAAD (available water storage capacity) and Dap (apparent density) limited the yield in 44% of the area, while leaf N content, (Ca + Mg) / K ratio and Na-Int limited the yield in 30, 20 and 6% of the area, respectively. The response to N and EUNam varied between zones depending on the main limitation for yield. The area of greatest productivity (AP) had a response up to 160 UN ha⁻¹, allowing the EUNam to remain unchanged up to 230 UN ha⁻¹. In the area of lower productivity (BP), a response of up to 160 UN ha⁻¹ was recorded. The intermediate zone (MP) showed a low response to N, with the lowest EUNam. The changes caused in the physical properties, due to the use of the paraplow, did not modify the performance.

Keywords: site-specific management, paraplow, nitrogen, NUE

1. INTRODUCCIÓN

La producción de alimentos presenta el desafío de satisfacer una demanda creciente, para lo que es necesario optimizar la eficiencia de uso de los insumos (Cassman, 1999). La disponibilidad de agua es la responsable principal de la falta de estabilidad productiva y de la brecha tecnológica relativa (BTR) entre el rendimiento potencial y el obtenido en predios comerciales de cultivos de verano (Giménez, 2019; Rizzo et al., 2021). El maíz sin limitantes hídricas en Uruguay es capaz de alcanzar rendimientos de $15,5 \text{ Mg ha}^{-1}$, mientras la brecha tecnológica respecto a condiciones comerciales en secano es de $8,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Giménez, 2019).

Actualmente el maíz presenta la proporción mayor de área regada (16 %), respecto al área total sembrada (exceptuando el arroz y la caña de azúcar) (DIEA, 2021). No obstante, aun bajo riego, la heterogeneidad de los suelos en cada unidad de manejo (chacra) determina una amplia variabilidad espacial del rendimiento.

La implementación en agricultura de tecnologías de la información como sistemas de posicionamiento global y cosechadoras equipadas con monitor de rendimiento permite cuantificar la variabilidad espacial del rendimiento dentro de las unidades de producción con manejo homogéneo (Bakhsh et al., 2000; Plant, 2001; Lark y Wheeler, 2003). Una vez diferenciadas zonas por su rendimiento, es posible identificar los factores limitantes que las generan y proponer esquemas de manejo sitio-específico (Plant, 2001; Lark y Wheeler, 2003; Kravchenko y Bullock, 2000; Farid et al., 2016).

La generalización de sistemas de agricultura continua genera ambientes con deterioro de las propiedades físicas (Ernst et al., 2018) y menor capacidad de aporte de nitrógeno (N) (Morón et al., 2012). La pérdida de propiedades físicas es uno de los factores que explican la brecha de rendimiento no relacionada con deficiencias de nitrógeno en agricultura continua (Douglas y Crawford, 1993). En Uruguay, no hay antecedentes sobre los efectos del

deterioro de las propiedades físicas en el rendimiento de maíz bajo riego ni su impacto en la eficiencia de uso de los insumos agua y N.

En el contexto nacional, el riego suplementario de cereales se desarrolla a escala productiva hace relativamente pocos años. La investigación en relación con el efecto del riego en la producción de cereales y oleaginosos de verano en Uruguay se ha realizado en su mayoría en parcelas experimentales. En esta situación, existen escasas posibilidades de evaluar la variabilidad geoespacial del rendimiento de los cultivos, dado que el objetivo es controlar dicha variabilidad y evaluar el efecto del riego o distintas prácticas de manejo.

1.1. FACTORES DETERMINANTES DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL

Es frecuente la presencia de variación espacial en atributos del suelo y el terreno dentro de las chacras, lo que resulta en variabilidad del rendimiento de los cultivos (Terra et al., 2006; Kravchenko y Bullock, 2000). Entre las propiedades edáficas relacionadas con variaciones en los rendimientos se menciona la concentración de carbono orgánico (COS), potasio (K), fósforo (P), magnesio (Mg), textura, conductividad eléctrica aparente (CEa) y pH (Terra et al., 2010, Terra et al., 2006, Kaspar et al., 2004; Kravchenko y Bullock, 2000).

Dentro del mismo tipo de suelo, las diferencias en la disponibilidad de agua se rigen por la presencia de procesos de degradación del suelo (por ejemplo: erosión y compactación) y asimismo variación del paisaje (Pierce y Nowak, 1999). Según Sharma y Bali (2017), la disminución de la materia orgánica y la humedad del suelo debido a la degradación estructural puede incrementar las diferencias espaciales en el rendimiento.

Los atributos del terreno que influyen sobre la dinámica superficial del agua de escurrimiento, como elevación, pendiente, curvatura, área específica de cuenca, aspecto e índices derivados de estos, también han sido indicados como fuente de variación espacial del rendimiento (Parent et al., 2008, Kaspar et al., 2004, Green et al., 2007).

Wilding y Drees (1978) clasificaron el coeficiente de variación (CV) de cada variable edáfica como bajo (menos de 15 %) y alto (mayor a 35 %). Las

propiedades del suelo, como el pH, la textura y la materia orgánica del suelo, tuvieron CV bajos (10-16 %), en tanto las propiedades más dinámicas y fuertemente influenciadas por el manejo, como el espesor del horizonte A, COS, conductividad eléctrica aparente (Cea) y N-NO₃ tuvieron CV superiores al 29 %, hasta 122 % (Dobermann, 1994).

El reconocimiento de esta variación dio origen al concepto de agricultura de precisión, en el que se propone variar las medidas de manejo agronómico según características de suelos y cultivos en cada sitio de una chacra (Lark y Wheeler, 2003). Según Plant (2001), la puesta en práctica de este concepto ha sido posible por el acceso a tecnologías como sistemas de posicionamiento global (GPS), sistemas de información geográfica, diversos tipos de sensores, tecnologías de aplicación variable y análisis de datos georreferenciados.

Plant (2001) destaca que uno de los impactos de la agricultura de precisión podría ser en las características de la investigación agrícola. El uso de este tipo de herramientas tecnológicas permite a los investigadores la realización de experimentos a escala de chacra, recabando abundante información de forma práctica, rápida y con gran resolución espacial. Piepho et al. (2011) indican que los experimentos a escala de chacra realizados en campos comerciales son prácticos y válidos, pudiendo igualar en precisión y validez estadística a los experimentos en estaciones experimentales cuando son diseñados adecuadamente.

En la mayoría de los casos es probable que dentro del área abarcada por un experimento exista variabilidad en diversas características del suelo (Bishop y Lark, 2006). La existencia de tal heterogeneidad dentro y entre parcelas experimentales ha llevado al planteo de diversas estrategias para su consideración en los modelos de análisis (Thöle et al., 2013, Piepho et al., 2011). Una de las ventajas de los experimentos a escala de chacra es que la variación espacial de la respuesta a los tratamientos frente a la heterogeneidad de las condiciones del campo puede ser estudiada (Panten et al., 2010, Bishop y Lark 2006).

Von Liebig (1863) propuso la ley del mínimo de los factores limitantes, que establece que el rendimiento se encuentra limitado por el factor disponible en menor cantidad relativa para las plantas. Para determinar qué factor edáfico es la principal limitante bajo condiciones de oferta de radiación y temperatura similares, ha sido propuesta una metodología que evalúa la relación de frontera del rendimiento con cada posible factor limitante. Dicha frontera corresponde a los rendimientos máximos obtenidos para cada nivel de un factor. Los puntos que caen por debajo de la frontera están limitados por otro factor (Webb, 1972). Al superponer el análisis de frontera de todos los factores se puede identificar qué propiedad del suelo es responsable del nivel más bajo de rendimiento (Shatar y McBratney, 2004).

1.2. MANEJO SITIO-ESPECÍFICO DE CULTIVOS

El manejo sitio-específico de cultivos implica implementar el manejo de estos a una escala espacial menor que la chacra en su totalidad (Plant, 2001; Lauzon et al., 2005). Los tres criterios que justifican de mejor manera el manejo sitio-específico según estos autores son: I) la variabilidad espacial en factores que influyen en el rendimiento de los cultivos, II) el hecho de que las causas de esa variabilidad pueden ser identificadas y medidas y III) la posibilidad de modificar las prácticas de manejo para mejorar la rentabilidad o disminuir el impacto ambiental. Además, es necesario que las zonas de manejo tengan consistencia entre años, de lo contrario, las estrategias de manejo de esa variabilidad espacial presentan menor posibilidad de mejorar la rentabilidad de los cultivos (Whelan y McBratney, 2006).

Para el manejo sitio-específico de nutrientes, conocer su posible variabilidad espacial y temporal, y la de los demás factores edafoclimáticos que pueden modificar la probabilidad y la magnitud de la respuesta a la aplicación de estos puede ser de valor para determinar esquemas de manejo de la fertilización sitio-específicos eficientes.

1.3. MANEJO EFICIENTE DEL NITROGENO EN AGRICULTURA

El manejo del (N) de forma sostenible ha sido identificado como uno de los mayores retos ecológicos de la humanidad (Cassman et al., 2002). Solari et al. (2008) atribuyeron la baja eficiencia en el uso de N en cereales a tres causas principales: i) falta de sincronía entre la aplicación de N y la demanda de los cultivos, ii) aplicación de dosis uniformes en campos que tienen demandas y ofertas de N espacialmente variables y iii) cambios temporales en las necesidades de N de los cultivos no diagnosticadas.

Si bien la sincronización se puede lograr parcialmente dividiendo las tasas de N según las etapas de crecimiento (Thöle et al., 2013), satisfacer las necesidades de N de los cultivos que varían espacialmente necesita dosis de N específicas en cada sitio, que optimicen el rendimiento y las ganancias, y minimicen las pérdidas (Cassman, 1999). Por tanto, el manejo sitio-específico de la fertilización nitrogenada es una de las formas de mejorar la EUN en la agricultura (Sharma y Bali, 2017). En este sentido, Trevisan et al. (2019) identificaron respuesta diferencial a la dosis de N en maíz con y sin riego entre zonas de productividad intrachacra en diferentes regiones productoras del medio oeste de los EE. UU.

La identificación sitio-específica de los factores limitantes del rendimiento es información valiosa para determinar zonas homogéneas dentro de las unidades de manejo de mayor tamaño. Cuando estas zonas comparten el factor limitante, son una oportunidad para el manejo diferencial y de hacer un uso eficiente de los recursos (agua, N e insumos).

En este trabajo, la eficiencia de uso del N agronómica marginal (EUNam) se estimó como:

$$EUNam = \frac{Y_{Ni} - Y_{Nmin}}{N_i - N_{min}} \quad (1)$$

donde

EUNam	eficiencia de uso del N agronómica marginal (kg grano/kg N)
Y_{Ni}	rendimiento para la dosis i de N (kg/ha).
Y_{Nmin}	rendimiento para la dosis mínima de N (kg/ha).

1.4. HIPÓTESIS

Las hipótesis del trabajo fueron:

- i) La variabilidad espacial del rendimiento responde a la variabilidad de las propiedades físico-químicas del suelo, lo que afecta la eficiencia de uso del nitrógeno.
- ii) Las zonas de productividad diferencial identificada por mapas de rendimiento antecedentes, coinciden con zonas homogéneas de propiedades del suelo limitantes del rendimiento.
- iii) La fertilización nitrogenada realizada de manera sitio-específica en maíz bajo riego, permite obtener la mayor eficiencia de uso del nutriente en cada zona de manejo.

1.5. OBJETIVOS

El objetivo general del trabajo fue: determinar factores limitantes del rendimiento y de la eficiencia de uso del N asociados a la variabilidad espacial de las propiedades del suelo, en una chacra comercial de maíz manejada con riego suplementario.

Los objetivos específicos fueron:

- i) Determinar el factor limitante para el rendimiento en cada sitio de muestreo.
- ii) Determinar la respuesta a dos dosis de N de manera sitio-específica.
- iii) Determinar la relación entre la eficiencia de uso del N y las propiedades físicas y químicas del suelo.

Los objetivos fueron desarrollados en dos artículos científicos. Ambos fueron redactados según las normas de la revista *Agrociencia Uruguay*. En el primer artículo fue abordada la determinación de las principales limitantes edáficas para el rendimiento de maíz. En el segundo artículo fue tratada la respuesta productiva de la fertilización nitrogenada en distintas zonas de productividad intrachacra y la relación entre la EUNam y las propiedades físicas y químicas del suelo.

2. VARIABILIDAD ESPACIAL DE FACTORES EDAFO-CLIMÁTICOS LIMITANTES DEL RENDIMIENTO EN MAÍZ BAJO RIEGO

Sebben G.^A, Giménez L.^B, Ernst O.^B

^A Regadores Unidos del Uruguay, 18 de Julio 231, Mercedes 75000, Uruguay.

^B Departamento de Producción Vegetal, Facultad de Agronomía, Estación Experimental Mario A. Cassinoni, Universidad de la República, Ruta 3, km 363, Paysandú 60000, Uruguay.

2.1. RESUMEN

La heterogeneidad de los suelos en cada unidad de manejo determina que los rendimientos de maíz bajo riego a escala comercial presenten variabilidad espacial. Identificar los factores limitantes del rendimiento que generan dicha variabilidad permite proponer esquemas de manejo sitio-específico. Las hipótesis de trabajo fueron: i) la variabilidad espacial del rendimiento responde a la variabilidad espacial de las propiedades físico-químicas del suelo y ii) las zonas de productividad diferencial, identificadas por registros previos de monitores de rendimiento, coinciden con zonas homogéneas por propiedades del suelo limitantes del rendimiento. Los objetivos del trabajo fueron: I) determinar limitantes sitio-específicas del rendimiento según la ley de Von Liebig⁽¹⁾ y II) determinar las brechas de rendimiento ocasionadas por las propiedades físicas y químicas del suelo limitantes del rendimiento. Para lograr dichos objetivos, se realizó un ensayo de maíz bajo riego suplementario en condiciones de producción comercial. Se aplicaron dos tratamientos de labranza (con y sin paraplow) y tres dosis de N (80, 160 y 230 UN ha⁻¹) para generar variabilidad en las propiedades físicas y en la disponibilidad de N en las distintas zonas de productividad. Los resultados obtenidos indican que las variaciones en rendimiento se explicaron por distintos factores limitantes entre zonas, aunque se detectó más de una limitante en cada zona. Las propiedades químicas como relación (Ca + Mg) /

K y el porcentaje de N foliar limitaron la mayor proporción de la zona AP, mientras que la capacidad de almacenaje de agua disponible limitó la mayor proporción de la zona BP.

Palabras clave: manejo sitio-específico, brechas de rendimiento, ley del mínimo, propiedades edáficas

2.2. SUMMARY

The heterogeneity of the soils in each management unit determines that corn yields under irrigation on a commercial scale present spatial variability. Differentiating zones by their yield makes it possible to identify the limiting factors of yield that generate said variability, and to propose site-specific management schemes. The working hypotheses were: i) the spatial variability of the yield responds to the physical-chemical properties of the soil and ii) the zones of differential productivity, identified by previous records of yield monitors, they coincide with homogeneous areas due to soil properties that limit performance. The objectives of the work were: I) determine site-specific yield limitations according to von Liebig's law (1863) and II) determine the yield gaps caused by the physical and chemical properties of the soil that limit yield. To achieve these objectives, a corn trial was carried out under supplementary irrigation under commercial production conditions. Two tillage treatments (with and without paraplow) and three doses of N (80, 160 and 230 UN ha⁻¹) were applied to generate variability in physical properties and N availability in the different productivity zones. The results obtained indicate that the variations in performance were explained by different limiting factors between areas, with more than one limiting factor detected in each area. Chemical properties such as the ratio (Ca + Mg) / K and the percentage of foliar N limited the greatest proportion of the AP zone, while the available water storage capacity of the soil limited the greatest proportion of the BP zone.

Keywords: site-specific management, yield gaps, law of the minimum, edaphic properties

2.3. RESUMO

A heterogeneidade dos solos em cada unidade de manejo determina que a produtividade do milho sob irrigação em escala comercial apresente variabilidade espacial. Identificar os fatores limitantes do rendimento que geram essa variabilidade permite propor esquemas de gestão específicos do local. As hipóteses de trabalho foram: i) a variabilidade espacial da produtividade responde à variabilidade espacial das propriedades físico-químicas do solo e ii) as zonas de produtividade diferencial, identificadas por registros prévios de monitores de produtividade, coincidem com áreas homogêneas devido às propriedades do solo que limitam o desempenho. Os objetivos do trabalho foram: I) determinar as limitações de rendimento específicas do local de acordo com a lei de von Liebig (1863) e II) determinar as lacunas de rendimento causadas pelas propriedades físicas e químicas do solo que limitam o rendimento. Para atingir estes objetivos, foi realizado um ensaio de milho sob irrigação suplementar em condições de produção comercial. Dois tratamentos de preparo do solo (com e sem paraplô) e três doses de N (80, 160 e 230 UN ha⁻¹) foram aplicados para gerar variabilidade nas propriedades físicas e na disponibilidade de N nas diferentes zonas de produtividade. Os resultados obtidos indicam que as variações de desempenho foram explicadas por diferentes fatores limitantes entre áreas, sendo detectado mais de um fator limitante em cada área. Propriedades químicas como a relação $(Ca + Mg) / K$ e a porcentagem de N foliar limitaram a maior proporção da zona AP, enquanto a capacidade de armazenamento de água disponível do solo limitou a maior proporção da zona BP.

Palavras-chave: manejo específico do local, lacunas de produção, lei do mínimo, propriedades edáficas

2.4. INTRODUCCIÓN

Las interacciones entre topografía, atributos del suelo y prácticas de manejo (homogéneas dentro de las unidades de manejo) generan una alta variabilidad del rendimiento de los cultivos dentro de cada unidad de manejo⁽²⁻³⁾. Esta variabilidad puede ser mapeada, delineando zonas con distinta productividad actual. Estas zonas se caracterizan por rendimientos relativamente homogéneos dentro de cada zona y suficientemente heterogéneos entre las distintas zonas⁽⁴⁻⁵⁾. Una vez delineadas, es posible identificar los factores limitantes del rendimiento que generan su variabilidad espacial y proponer esquemas de manejo sitio-específico⁽⁴⁾⁽⁶⁻⁸⁾.

El manejo sitio-específico de cultivos es el manejo de estos a una escala espacial menor que la unidad de manejo original, lo que se define como zona de manejo⁽⁴⁻⁵⁾. Los tres criterios que justifican este manejo sitio-específico según estos autores son: I) la variabilidad espacial en factores que influyen en el rendimiento de los cultivos, II) las causas de esa variabilidad que pueden ser identificadas y medidas y III) las posibilidades de modificar las prácticas de manejo para mejorar la rentabilidad y/o disminuir el impacto ambiental.

El manejo sitio-específico se vuelve relevante cuando la unidad de manejo es grande, lo que se traduce en variabilidad de rendimiento de magnitud suficiente para justificarlo económica y ambientalmente⁽⁹⁾.

Los sistemas de posicionamiento global corregidos diferencialmente (DGPS) y los monitores de rendimiento permiten obtener el rendimiento de los cultivos georreferenciados de forma rápida y precisa. Esto también brinda la oportunidad de realizar experimentos a gran escala en las mismas situaciones de producción⁽⁴⁾⁽¹⁰⁾. Una de las ventajas de este tipo de experimentos es que puede ser estudiado el impacto de la variabilidad espacial en condiciones de campo y la respuesta a los tratamientos que se implementen⁽¹¹⁻¹²⁾.

Piepho et al.⁽¹³⁾ indican que los experimentos realizados en campos comerciales son prácticos y válidos. Cuando son diseñados adecuadamente pueden igualar en precisión y validez estadística a los experimentos realizados en microparcels en estaciones experimentales. En estos

experimentos, las unidades experimentales usualmente son grandes parcelas en las que se toman numerosas medidas georreferenciadas dentro de cada una de ellas.

Las propiedades físicas y químicas del suelo son uno de los factores que más afectan los rendimientos⁽¹⁴⁻¹⁶⁾. La variabilidad intrínseca del suelo está determinada por varios factores que incluyen material parental, relieve, clima, organismos y tiempo⁽¹⁷⁾. Por otro lado, la variabilidad extrínseca del suelo se define principalmente por el manejo previo del campo⁽¹⁶⁾. Para cuantificar la variabilidad espacial de las propiedades edáficas como pH, COS, textura, densidad aparente (Dap), N-NO₃⁻, P, K y profundidad, se requiere de una alta densidad de muestreo en grilla⁽¹⁸⁾.

Wilding y Drees⁽¹⁹⁾ clasificaron el coeficiente de variación (CV) de cada variable edáfica como bajo cuando los valores son menores a 15 % y alto cuando son mayores a 35 %. Las propiedades del suelo, como pH, textura y concentración de carbono orgánico del suelo (COS), tuvieron CV pequeños, entre 10-16 %, en tanto las propiedades más dinámicas y fuertemente influenciadas por el manejo, como espesor del horizonte A, COS, conductividad eléctrica aparente (CEa) y N-NO₃⁻, tuvieron CV superiores a 29 % hasta 122 %⁽¹⁸⁾.

En el mismo tipo de suelo, las diferencias en la disponibilidad de agua se rigen por la presencia de procesos de degradación del suelo (por ejemplo: erosión, compactación, etc.) y variación del paisaje⁽²⁰⁾. Según Sharma y Bali⁽²¹⁾, la disminución de la materia orgánica y la humedad del suelo debido a la degradación estructural pueden provocar que se intensifiquen las diferencias espaciales.

En la mayoría de los casos, es probable que dentro del área de un experimento exista variabilidad en diversas características del suelo⁽¹²⁾. La existencia de heterogeneidad ha llevado al planteo de diversas estrategias para su consideración en los modelos de análisis⁽²²⁾⁽¹³⁾.

Von Liebig⁽¹⁾ propuso la ley del mínimo de los factores limitantes, que establece que el rendimiento se encuentra limitado por el factor disponible

para las plantas en la menor cantidad relativa. Para determinar el factor edafoclimático que es limitante principal bajo condiciones de oferta de radiación y temperatura similares, ha sido propuesta una metodología que estudia la relación entre la frontera de rendimiento de un cultivo con cada posible factor limitante del rendimiento. Dicha frontera corresponde a los rendimientos máximos obtenidos para cada nivel de un factor. Los puntos que se ubican por debajo de la frontera están limitados por otro factor⁽²³⁾. Al superponer el análisis de frontera de todos los factores se puede identificar qué propiedad del suelo es responsable del nivel más bajo de rendimiento⁽²⁴⁾.

La agricultura continua sin laboreo puede generar condiciones físicas del suelo restrictivas, que limitan el ingreso de agua a este y la exploración radicular, lo que genera limitantes para la absorción de agua y nutrientes por las plantas. En trigo, la reducción de la infiltración del agua y estabilidad de agregados del suelo generada por agricultura continua determinó un incremento en la brecha de rendimiento no atribuible al suministro de nutrientes, reduciendo la EUN⁽²⁵⁾.

El efecto de la compactación del suelo sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos puede dividirse en (i) reducción de la captura de recursos, lo cual tendría dos componentes, (a) captura de agua y (b) captura de radiación, y (ii) eficiencia de uso del agua y nutrientes disponibles en el suelo más eficiencia de uso de la radiación⁽²⁶⁾. Para estas situaciones se propone como medida correctiva la descompactación subsuperficial.

En este trabajo se plantearon las siguientes hipótesis: I) la variabilidad espacial del rendimiento de maíz responde a la variabilidad espacial natural y/o al deterioro diferencial de las propiedades físico-químicas del suelo y II) las zonas de productividad diferencial identificadas por registros previos de mapas de rendimiento pueden explicarse por la distribución espacial de propiedades del suelo que actúan como factores limitantes del rendimiento.

El objetivo general del trabajo fue determinar los factores limitantes del rendimiento asociados a la variabilidad espacial de las propiedades del suelo en una chacra comercial de maíz con riego suplementario, cuyos mapas de

rendimiento de cultivos previos de maíz y soja bajo riego presentaron una notoria variabilidad espacial del rendimiento.

2.5. MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en una chacra comercial de maíz bajo riego suplementario, de la que se dispuso de registros de rendimiento de cultivos anteriores colectados con cosechadora equipada con monitor de rendimiento georreferenciado. La superficie del experimento fue de 5,5 ha, incorporando la variabilidad natural del campo, la generada por el uso del paraplow como herramienta de descompactación subsuperficial del suelo y la generada por aplicación de distintas dosis de fertilizante nitrogenado.

2.5.1. Sitio experimental

El trabajo se realizó en el año agrícola 2019-2020 dentro de una chacra de 60 ha, ubicada en ruta 21 km 328, (S -33° 28' 01,17"; O -58° 11' 47,4"), en Dolores, Departamento de Soriano, Uruguay. La chacra estuvo bajo agricultura continua, sin labranza desde hace más de 20 años. Los suelos dominantes son brunosoles éutricos típicos (argiudoles típicos) de la unidad de suelos Bequeló, según la Carta de Reconocimiento de Suelos de Colonia y Soriano⁽²⁷⁾. El área en estudio se encuentra en su totalidad bajo un pívot central de riego. El cultivo antecesor a la siembra de maíz fue *Vicia villosa* en el invierno 2019.

2.5.2. Estrategia experimental

La base de datos consiste de registros de 54 sitios georreferenciados dentro de una grilla de 30 x 34 metros, totalizando 5,5 ha. Dentro de ella se combinaron tres zonas de productividad (alta = AP, media = MP y baja productividad = BP), por dos tratamientos de labranza (descompactación subsuperficial = D, siembra directa = SD), dispuestos de manera transversal a las zonas. De esta manera, se combinó la variabilidad espacial de propiedades químicas y atributos del suelo con un gradiente de propiedades físicas del suelo generadas por descompactación mecánica subsuperficial.

Dentro de estas fajas se sortearon tres niveles de fertilización nitrogenada (80, 160 y 230 UN ha⁻¹ totales), con lo que se generó variabilidad en la disponibilidad del nutriente en las distintas zonas de manejo (Figura 2.1C).

Las tres zonas estaban identificadas previo al inicio del trabajo con base en el análisis de cuatro mapas de rendimiento previos de cultivos bajo riego, dos años de maíz (2010-2011 y 2016-2017) y dos años de soja (2015-2016 y 2017-2018). Las zonas se generaron previo al inicio del trabajo con un análisis de clúster con la metodología de K-means, con una resolución espacial de 10 m x 10 m en el software SAGA GIS.

La descompactación se realizó el 15 de julio de 2019, previo a la siembra de maíz, con una profundidad de trabajo de 0,35 metros, en franjas de 270 metros de largo y 34 metros de ancho, con tres repeticiones apareadas, cruzando las tres zonas de productividad (Figura 2.1A).

Los tratamientos de fertilización nitrogenada fueron distribuidos al azar con 18 repeticiones en parcelas de 30 x 34 metros (Figura 2.1C), restringidas para que se repitieran en las distintas zonas y tratamientos de descompactación. Las dosis se aplicaron de manera fraccionada (en 4 aplicaciones) entre V6 y V10⁽²⁸⁾ con 80, 160 y 230 UN ha⁻¹ totales.

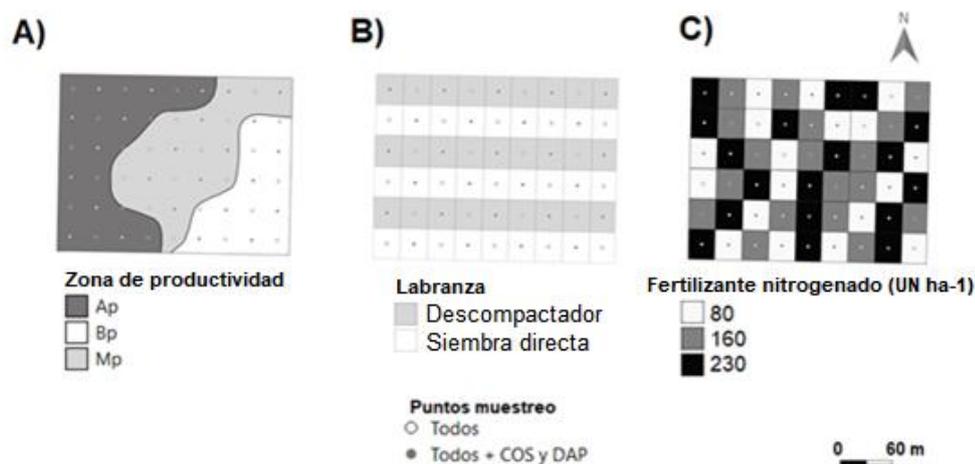


Figura 2.1. A) Zonas de productividad, **B)** tratamientos con y sin descompactación, **C)** tratamientos de fertilización nitrogenada.

AP = alta productividad; BP = baja productividad; MP = media productividad; todos = todos los parámetros de suelo y cultivo medidos a excepción de

carbono orgánico de suelo (COS) y densidad aparente (DAP); todos + COS y DAP = todos los parámetros de suelo y cultivo medidos incluyendo carbono orgánico de suelo (COS) y densidad aparente (DAP).

La siembra se realizó el 1/10/2019 con el híbrido P1845YR, a una densidad de 100.000 semillas ha⁻¹ a 0,76 m de distancia entre hileras.

2.5.3. Determinaciones

2.5.3.1. Determinaciones en el suelo

Se tomaron muestras compuestas por diez submuestras de suelo a una profundidad de 20 cm, ubicadas en un radio de 5 metros alrededor del centro de cada parcela (Figura 2.1). En estas muestras se determinó: P Bray 1⁽²⁹⁾ CIC (con Ca, Mg, K, Na y acidez titulable)⁽³⁰⁾, y pH⁽³¹⁾. De igual forma, se realizó un muestreo en el estadio V6 del maíz⁽²⁸⁾ en el que se determinó la concentración de N-NO₃⁻ (ppm) a una profundidad de 0-20 cm⁽³²⁾.

La resistencia a la penetración (RP) se midió en la misma grilla de muestreo (Figura 2.1), tomando cinco mediciones por sitio de muestreo, hasta los 40 cm de profundidad. Estas se realizaron con un penetrológico marca Eijkelkamp, con un cono de 60 ° y 1 cm² de área de cono, cuando el suelo se encontró con un contenido de agua próximo a capacidad de campo, evitando sobreestimar esta medida debido a la falta de humedad.

A los 15 días después de la siembra, se realizó un muestreo a dos profundidades (0-10 y 10-20 cm) para determinar: Dap, COS⁽³³⁾ y textura. Con esta información se estimó la cantidad de COS a masa constante. Dichos muestreos se llevaron a cabo solamente en las parcelas de orden impar, por lo que se realizaron 27 sitios de muestreo intercalados (Figura 2.1).

Luego de la cosecha de maíz, se midió la conductividad eléctrica aparente (CEa del suelo) con una sonda Veris 3100, con 7 metros entre pasadas a una velocidad de 4 km/hora, para registrar la CEa superficial y profunda del suelo (30 y 90 cm).

Se utilizó un modelo digital de terreno hidrológicamente consistente (MDTHC) para determinar los atributos primarios del terreno: pendiente y área

específica de cuenca⁽³⁴⁾ y los atributos secundarios: índice topográfico de humedad (TWI), índice de poder de escorrentía (SPI) y factor LS de la ecuación USLE/RUSLE⁽³⁵⁾. El MDTHC es producto de imágenes digitales de un levantamiento aerofotogramétrico con la cámara UltraCam Eagle Prime con tamaño del píxel de 32 cm.

2.5.3.2. Determinaciones en el cultivo

En el estadio R1 del maíz⁽²⁸⁾, se realizó un muestreo foliar en grilla para determinar el N foliar (%) de la hoja opuesta por debajo de la espiga⁽³⁶⁾. El muestreo se realizó el 24/12/2019 tomando 20 muestras por sitio de muestreo (Figura 2.1).

La cosecha se realizó con una cosechadora comercial John Deere S680 equipada con monitor de rendimiento y DGPS. El mapa de rendimiento fue procesado siguiendo la metodología propuesta por Albarenque y Velez⁽³⁷⁾ con los softwares GIS SMS advanced 18.5 y QGIS 3.0. Por último, se eliminaron los datos de un búfer de 5 metros alrededor de cada huella del equipo de riego. El valor de rendimiento de cada parcela se obtuvo promediando los puntos de un búfer de 10 metros de radio desde el centro de cada parcela.

2.5.3.3. Estatus hídrico del cultivo

Se realizó un balance hídrico de suelo de paso diario durante todo el ciclo del cultivo (Figura 2.2). Para esto, se utilizó la metodología propuesta por Allen et al.⁽³⁸⁾, la cual considera que el balance hídrico de paso diario en la zona radicular, expresado en términos de agotamiento al final del día, es:

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P - RO)_i - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \quad (1)$$

donde

$D_{r,i}$ agotamiento de humedad en la zona radicular del suelo al final del día i (mm),

$D_{r,i-1}$ contenido de humedad en la zona radicular al final del día anterior, $i-1$ (mm),

P_i precipitación en el día i (mm),

RO_i escurrimiento superficial en el día i (mm),

- I_i lámina neta de riego en el día i que infiltra en el suelo (mm),
- CR_i ascenso capilar proveniente de la masa de agua subterránea en el día i (mm),
- $ET_{c,i}$ evapotranspiración del cultivo en el día i (mm),
- DP_i pérdidas de agua de la zona radicular por percolación profunda en el día i (mm).

La capacidad de almacenaje de agua disponible (CAAD) y la conductividad hidráulica en flujo saturado del suelo (K_{sat}) fueron calculadas mediante funciones de pedotransferencia⁽³⁹⁾ utilizando el porcentaje de MO, textura y D_{ap} . Se tomó la CAAD (165 mm) y la profundidad del suelo (78 cm) promedio para realizar el balance hídrico de paso diario (Figura 2.2). La evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) se calculó mediante Penman y Monteith como detallan Allen et al.⁽³⁸⁾. Los datos climáticos para dicho cálculo se obtuvieron de una estación meteorológica marca Davis, ubicada a 5 km del sitio experimental (S -33° 26' 07,47"; O -58° 14' 11,20") y las precipitaciones fueron registradas en el sitio experimental.

2.5.4. Análisis estadístico

2.5.4.1. Autocorrelación espacial

Se realizaron interpolaciones de todas las variables mediante el procedimiento geoestadístico Kriging ordinario, siguiendo los pasos indicados por Webster y Oliver⁽⁴⁰⁾. Se utilizó el paquete geoR del software estadístico RStudio (2019), pudiendo generar mapas consistentes para todas las variables. Los modelos utilizados para el ajuste de los semivariogramas de los mapas interpolados fueron el gaussiano, el exponencial y el esférico, para seleccionar el modelo con menor suma de cuadrados del error e índice de akaike (AIC). En la Figura 2.8 (Anexos) se muestra los semivariogramas y mapas interpolados de CAAD, profundidad del suelo y D_{ap} .

2.5.4.2. Factores limitantes del rendimiento

Para determinar el factor limitante del rendimiento de maíz, en cada sitio, se adoptó el esquema propuesto por Shatar y McBratney⁽²⁴⁾. (i) Se estimó la relación entre el rendimiento y cada variable del suelo (N-NO₃- en V6, pH, P Bray I (ppm), K int (meq/100g), Na-int (meq/100g), porcentaje de saturación de bases, (Ca + Mg) / K, CIC, COS 0-10 cm, COS 10-20 cm, Dap 0-10 cm, Dap 10-20 cm, RP 10-20 cm, RP 20-30 cm, CEa 30 cm y CEa 90 cm) y del cultivo (N foliar en R1, plantas ha⁻¹) de manera independiente mediante el ajuste de la regresión cuantílica en el percentil 90. Para ello, previa depuración de valores atípicos con distancias de Mahalanobis mayores al 5 %⁽²⁴⁾, se ajustaron funciones de primer y segundo orden con uno o dos grados de libertad, utilizando el paquete *quantreg* del software RStudio. (ii) Se seleccionó la función con menores índices bayesianos y de Akaike. (iii) Asumiendo que estas funciones representan el rendimiento alcanzable para cada nivel de cada propiedad del suelo en ausencia de otras limitantes, rendimientos menores a los estimados con cada función están limitados por otro factor. (iv) Siguiendo la ley de Von Liebieg⁽¹⁾, el rendimiento de cada sitio es el mínimo rendimiento predicho para cada sitio por alguna de las funciones ajustadas.

Siguiendo la metodología propuesta por Casanova et al.⁽⁴¹⁾ se estimaron brechas de rendimiento identificadas (Brecha ID), definidas como las atribuibles a factores limitantes identificados, y las brechas no identificadas (Brecha no ID), definidas como aquellas no atribuibles a los factores cuantificados en este trabajo:

$$\text{Brecha ID} = Y_{\text{alc}} - Y_{(x)} \quad (3)$$

$$\text{Brecha no ID} = Y_{(x)} - Y_{\text{obs}} \quad (4)$$

Donde:

Y_{alc}	rendimiento máximo observado en el experimento
$Y_{(x)}$	menor valor predicho de rendimiento en cada sitio de muestreo
Y_{obs}	rendimiento observado

En la Figura 2.2 se observa que existieron deficiencias hídricas durante el periodo más crítico, para la determinación del rendimiento (10 de diciembre al 10 de enero). En el ciclo del cultivo se regaron 160 mm, mientras que las precipitaciones registradas fueron 447 mm (Anexos, Cuadro 2.6).

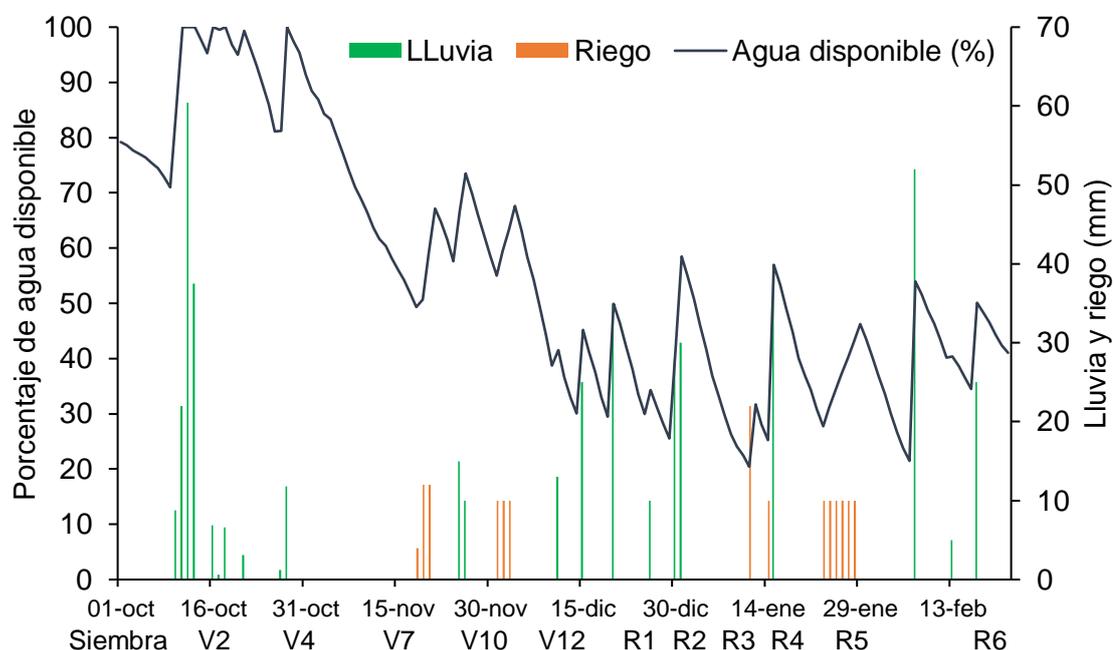


Figura 2.2. Evolución del porcentaje de agua disponible diaria de siembra a madurez fisiológica.

En el eje horizontal se referencia la fecha y la sucesión de estadios fenológicos de la escala de maíz de Ritchie y Hanway⁽²⁸⁾. En el eje vertical secundario se expresan las precipitaciones y riegos en mm.

2.6. RESULTADOS

2.6.1. Estadísticas descriptivas

Se cuantificó una variabilidad elevada (CV de 23 a 26 %) en la disponibilidad de N-NO₃- a V6, P Bray 1 a la siembra y el Na-int, mientras que el K int y la relación (Ca +Mg) / K presentaron un CV intermedio (15-17 %) (Cuadro 2.1). El pH del suelo, CIC, porcentaje de saturación de bases, Dap, COS, CAAD (mm/m), porcentaje de limo y arcilla, profundidad del suelo, CAAD (mm), rendimiento y N foliar presentaron un CV bajo (inferior a 14 %), mientras que RP, CEa y Ksat tuvieron CV entre 17 y 25 % (Cuadro 2.1).

Cuadro 2.1. Estadísticas descriptivas de las propiedades del suelo y del cultivo cuantificadas.

<i>Variable</i>	<i>Media</i>	<i>CV (%)</i>	<i>Mín</i>	<i>Máx</i>
Rendimiento (Mg ha ⁻¹)	11,950	11	8,400	14,200
EUNam (kg grano UN ha ⁻¹)	6	145	-10	34
Plantas ha ⁻¹	94396	10	78947	115789
Porcentaje de N Foliar en R1	2,65	9	2	3
N-NO ₃ ⁻ (µg N/g) - V6	20	27	11	36
pH	5,73	1,88	5,48	5,94
P Bray I (ppm)	24	26	15	40
K int (meq/100 g)	0,4	14,85	0,29	0,56
Na-int (meq/100 g)	0,78	23,15	0,4	0,99
CIC pH 7(meq/100 g)	17,1	8,7	14,5	21,2
Porcentaje de saturación de bases (Ca + Mg) / K	30,5	16,9	20,8	44,1
CEa Sh(mS/m)	28,1	24,8	15,5	52,5
CEa D(mS/m)	83	18,9	40	111,7
CEa. Ratio (D/Sh)	3	13,7	2	5
RP (MPA) 10-20 cm	1,22	21,7	0,75	1,88
RP (MPA) 20-30 cm	1,15	17	0,88	1,63
Pendiente (%)	0,72	51	0,06	1,48
Factor LS	0,09	48,7	0,004	0,16
SPI	0,04	44,1	0,003	0,07
TWI	9,5	11,3	7,8	11,3
Dap (g/cm ³) 0-10 cm	1,12	3,87	1,04	1,2
Dap (g/cm ³) 10-20 cm	1,26	1,78	1,23	1,3
COS (gC/kg suelo) 0-10 cm	27,1	5,1	24,5	29,5
COS (gC/kg suelo) 10-20 cm	21,8	8,1	18,5	24,9
CAAD (mm/m)	165	3,65	152	179
Profundidad del suelo (cm)	78	11,4	62	97
CAAD (mm)	129	13,5	99	167
K sat (mm/hr)	12,8	22,9	6,2	19
Porcentaje de limo 0-20 cm	47	4,8	42	52
Porcentaje de arena 0-20 cm	19	13	14	26
Porcentaje de arcilla 0-20 cm	34	4,9	30	38

EUNam = eficiencia de uso del nitrógeno agronómica marginal sobre la dosis mínima (kg grano UN ha⁻¹ adicional sobre las 80 UN ha⁻¹); N = nitrógeno; COS = carbono orgánico del suelo; RP = resistencia a la penetración; CEa (mS/m) Sh = conductividad eléctrica aparente del suelo a los 30 cm de profundidad; CEa (mS/m) Sh = conductividad eléctrica aparente del suelo a los 90 cm de profundidad; LS = factor LS de la ecuación USLE/RUSLE; SPI = índice de poder de escorrentía; TWI = índice topográfico de humedad; CEa. Ratio (D/Sh) = cociente D/Sh; CAAD (mm/m) = capacidad de almacenaje de agua disponible del suelo estimada por unidad de profundidad; CAAD (mm) = capacidad de almacenaje agua disponible del suelo estimada; K sat = conductividad hidráulica en flujo saturado (mm hr⁻¹) estimada; Dap (g/cm³) = densidad aparente del suelo.

2.6.2. Respuesta del rendimiento a variables del suelo y del cultivo

Se ajustaron funciones significativas para la relación entre rendimiento de maíz y CAAD (mm), Dap 10-20 cm, Na-int, K int, población lograda (plantas ha⁻¹), (Ca + Mg) / K y N foliar (Figura 2.3). El rendimiento aumentó con mayor contenido de N foliar hasta un umbral de 2,6 %, sobre el que no se produjeron cambios en el rendimiento. Los sitios con 230 UN ha⁻¹ se encontraron sobre dicho umbral (Figura 2.3A). Por otro lado, sitios con mayor CAAD obtuvieron rendimientos mayores, aunque sobre 131 mm hubo pocos cambios (Figura 2.3B). Por debajo de dicho valor predominan sitios de las zonas BP y MP, en donde la CAAD se encontró limitando el rendimiento (Figura 2.3B).

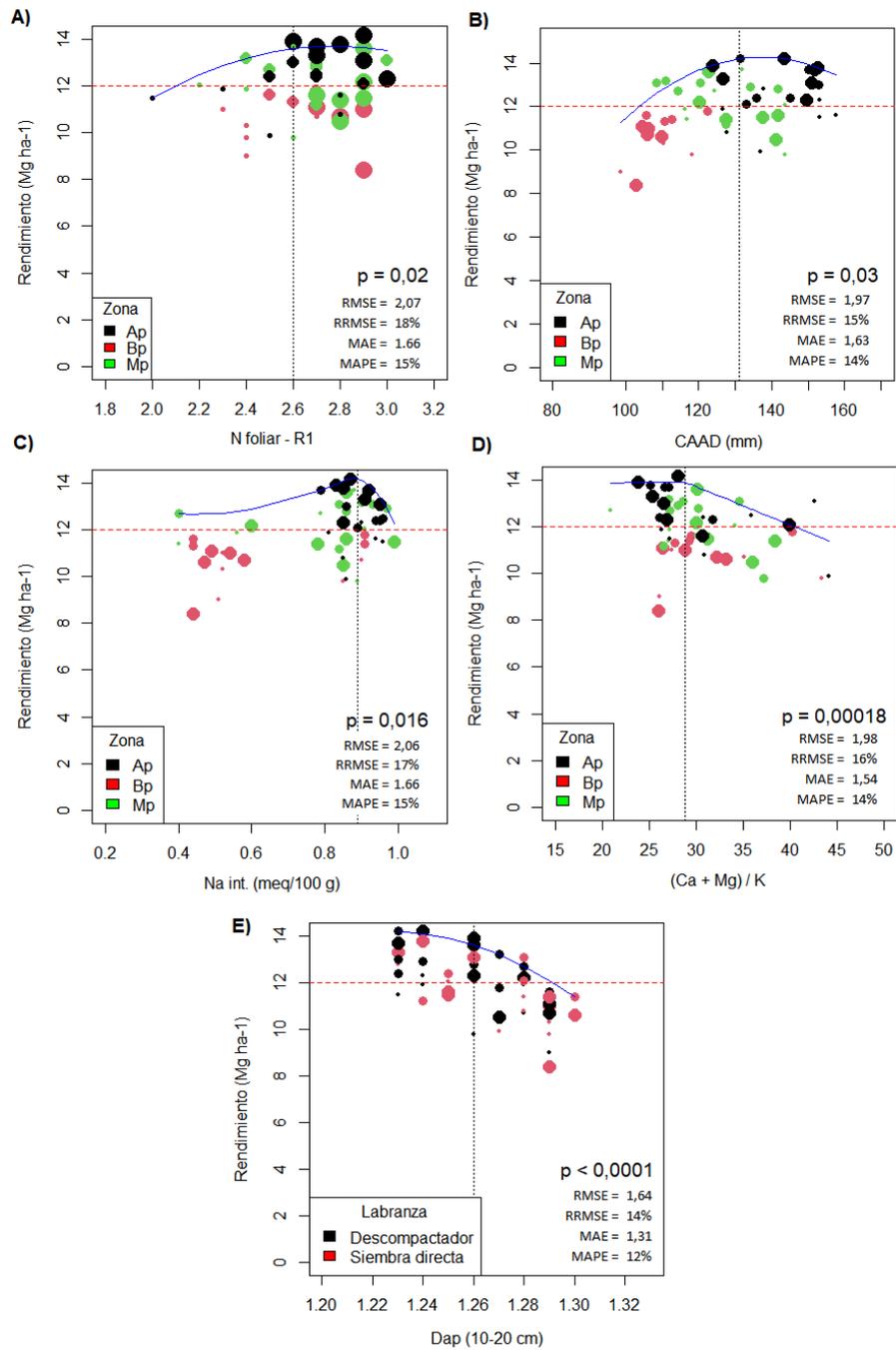


Figura 2.3. Relaciones de frontera entre el rendimiento y **A)** porcentaje de nitrógeno foliar, **B)** capacidad de almacenaje de agua disponible (mm), **C)** sodio intercambiable (Na-int), **D)** relación de bases ((Ca + Mg) / K) y **E)** densidad aparente 10-20 cm (g/cm³).

RMSE: error cuadrático medio; RRMSE: error cuadrático medio relativo; MAE: error absoluto medio; MAPE: promedio de los errores porcentuales.

Zona = zona de productividad; AP = alta productividad; BP = baja productividad; MP = media productividad; el tamaño de los círculos varía según la dosis de nitrógeno aplicada, siendo más chicos el T1 = 80 UN ha⁻¹, intermedios el T2 = 160 UN ha⁻¹ y grandes el T3 = 230 UN ha⁻¹; línea horizontal roja punteada indica un rendimiento de maíz de 12 ton ha⁻¹; línea vertical negra punteada indica el cambio de función de la relación de frontera entre ambas variables; línea gris indica la relación de frontera entre ambas variables.

La distribución de Na-int. se caracterizó por presentar valores inferiores a 0,7 meq/100 g como dominantes en la zona BP (Figura 2.3C). Las zonas AP y MP con valores mayores de Na-int presentaron descensos crecientes del rendimiento con el aumento de la concentración de Na-int del suelo a partir de 0,88 meq/100 g (Figura 2.3C). Por otro lado, la relación (Ca + Mg) / K no provocó cambios en rendimiento hasta un umbral de 28,8. Los valores superiores a 28,8 mostraron disminuciones lineales en el rendimiento, sin una tendencia clara a que los sitios ubicados en ese rango pertenezcan a una de las zonas clasificadas en particular (Figura 2.3D).

Existió un umbral sobre el que la Dap limitó el rendimiento en forma significativa. Dichos umbrales fueron 1,1 g/cm³ de 0-10 cm y 1,25 g/cm³ de 10-20 cm (Figuras 3E, 8A y 8B).

2.6.3. Limitantes sitio-específicas del rendimiento

El rendimiento máximo obtenido en el sitio experimental (Y_{alc}) fue 14,2 Mg ha⁻¹ (Cuadro 2.1) en dos sitios ubicados en la zona AP. La brecha ID media fue de 1,5 Mg ha⁻¹, mientras la brecha no ID fue de 0,8 Mg ha⁻¹ (Cuadro 2.2). Las limitantes para el rendimiento identificadas fueron el N foliar (30 % de los sitios), Dap 10-20 cm (31 % de los sitios), CAAD (mm) (13 % de los sitios), Na-int. (6 % de los sitios) y la relación (Ca + Mg) / K (20 % de los sitios) (Figura 2.4).

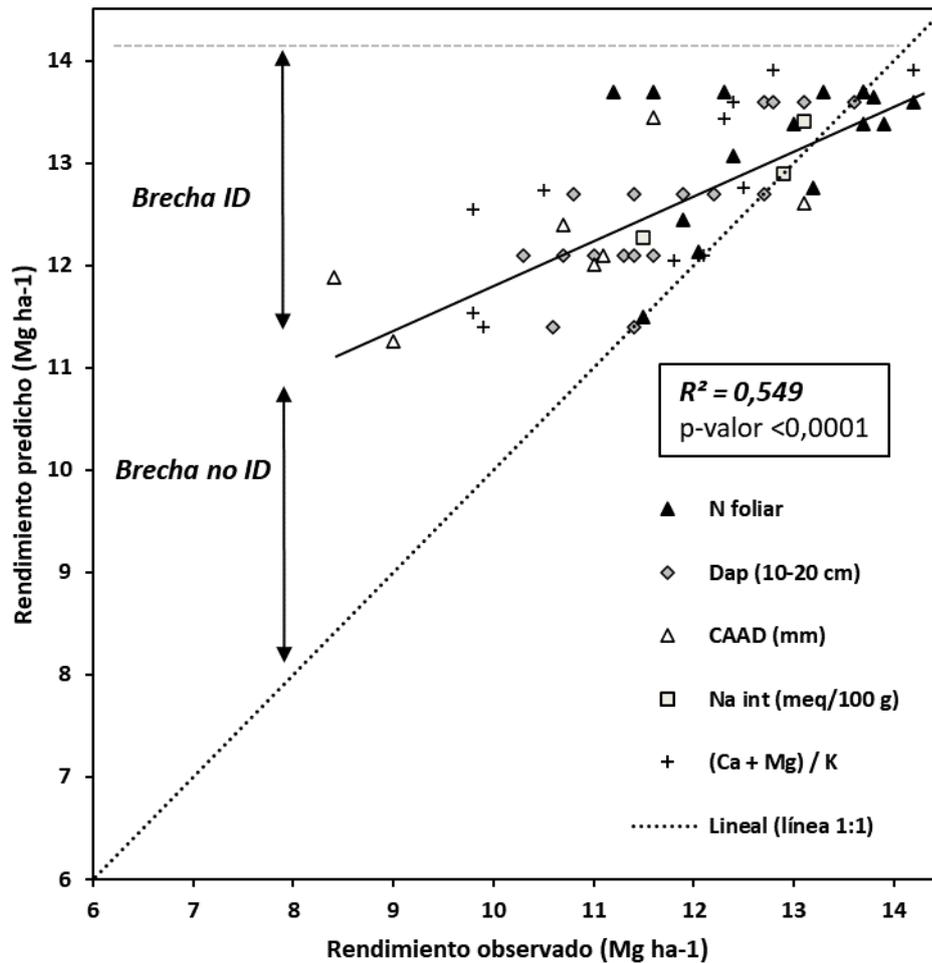


Figura 2.4. Relación entre rendimientos observados y predichos por el modelo de análisis de frontera con los parámetros de suelo y cultivo.

Na-int.= sodio intercambiable (meq/100 g); (Ca + Mg) / K = relación de bases; Dap = densidad aparente (g/cm^3) 10-20 cm; CAAD (mm) = capacidad de almacenaje de agua disponible del suelo estimada; N = nitrógeno. La línea punteada roja indica la pendiente 1:1 entre ambas variables; la línea negra indica la relación lineal entre ambas variables; línea horizontal gris punteada indica el rendimiento alcanzable; brecha ID = brecha de rendimiento identificada (rendimiento alcanzable - predicho); brecha no ID = brecha de rendimiento no identificada (rendimientos predichos - observados).

Cuadro 2.2. Brechas de rendimiento identificadas y no identificadas (Mg ha⁻¹) por factor limitante.

Factor limitante	Brecha ID	Brecha no ID
CAAD (mm)	2,0	1,5
Dap 10-20 cm	1,7	0,8
(Ca + Mg) / K	1,5	1,1
Na-int (meq/100 g)	1,4	0,4
Porcentaje de N foliar	1,0	0,4
Promedio	1,5	0,8

Brecha ID = brecha de rendimiento identificada; brecha no ID = brecha de rendimiento no identificada; CAAD (mm) = capacidad de almacenaje agua disponible del suelo estimada; Dap = densidad aparente (g/ cm³) 10-20 cm; (Ca + Mg) / K = relación de bases; Na = sodio intercambiable (meq/100 g).

2.6.4. Distribución espacial de los factores limitantes

Las zonas de productividad caracterizadas mediante su productividad antecedente no presentaron un único factor limitante en toda su extensión (Figura 2.5). A su vez, los factores más limitantes para el rendimiento fueron distintos entre zonas de productividad, tanto en su presencia o ausencia como en la proporción del área en la que se encuentran limitando el rendimiento (Figura 2.5 y Cuadro 2.3).

La zona BP presentó como factores más limitantes para el rendimiento a la CAAD y la Dap del suelo, las que aditivamente se encuentran limitando el rendimiento en el 86 % del área (Cuadro 2.3 y Figura 2.5). En la zona AP, N foliar limitó el rendimiento en forma principal en un 52 % de esta, seguido de la relación (Ca + Mg) / K con el 24 % del área. El área limitada por la CAAD y la Dap en forma principal fue la menor en la zona AP respecto a las restantes zonas (Cuadro 2.3). En la zona MP, la Dap y el N foliar limitaron en forma principal la mayor proporción del área. El Na-int y la relación de bases fueron limitantes principales en el 11 % del área (c/u) de dicha zona (Cuadro 2.3).

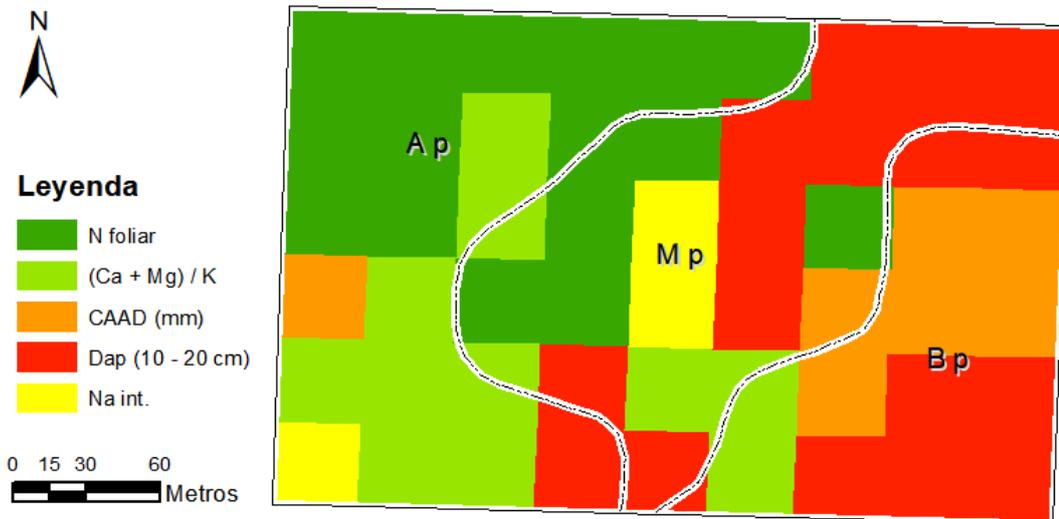


Figura 2.5. Mapa de factores limitantes del rendimiento.

AP = alta productividad; BP = baja productividad; MP = media productividad; Na-int.= sodio intercambiable (meq/100 g); (Ca + Mg) / K = relación de bases; Dap = densidad aparente (g/cm^3) 10-20 cm; CAAD (mm) = capacidad de almacenaje de agua disponible del suelo estimada; N = nitrógeno. Las líneas punteadas negras con borde blanco recuadran las zonas de productividad a las que hacen referencia las siglas dentro de cada polígono.

Cuadro 2.3. Porcentaje de sitios con principales limitantes por zona.

Factor limitante	BP	MP	AP	Total
CAAD (mm)	36	5	5	13
Dap 10-20 cm	50	47	5	31
(Ca + Mg) / K	14	11	33	20
Na-int (meq/100 g)		11	5	6
Porcentaje de N foliar		26	52	30
Total	100	100	100	100

AP = alta productividad; BP = baja productividad; MP = media productividad; CAAD (mm) = capacidad de almacenaje de agua disponible del suelo estimada; Dap = densidad aparente (g/cm^3) 10-20 cm; (Ca + Mg) / K = relación de bases; Na = sodio intercambiable (meq/100g).

2.6.5. Brechas de rendimiento explicadas por factores limitantes según zonas de productividad

La brecha de rendimiento media fue superior en la zona BP respecto a las restantes zonas y la zona MP tuvo una brecha levemente superior a la zona AP. Además, la proporción de la brecha de rendimiento no identificada por el modelo aumentó en la medida que la productividad de la zona disminuyó (Cuadro 2.4). Esto también se observa en el ajuste del modelo de la Figura 2.4.

En la zona BP, la CAAD y la Dap del suelo generaron una brecha del rendimiento de 16 %. En la zona AP, la Dap y la relación $(Ca + Mg) / K$ generaron las mayores brechas de rendimiento, seguidas del N foliar (Cuadro 2.3), aunque la proporción de esta zona limitada por Dap fue baja (Cuadro 2.2). En la zona MP los factores Na-int, CAAD y la relación $(Ca + Mg) / K$ generaron las mayores brechas de rendimiento (Cuadro 2.4), aunque la CAAD limitó en forma principal una baja proporción de dicha zona (Cuadro 2.3).

La brecha de rendimiento identificada varió entre zonas de productividad para un mismo factor limitante. La brecha identificada para la CAAD disminuyó en la medida en que la productividad de la zona aumentó (de AP a BP). De igual forma, la Dap presentó una mayor brecha en la zona BP respecto a las restantes zonas (Cuadro 2.4). Por lo tanto, la magnitud de las limitantes impuestas por deficiencias hídricas (CAAD) y por las propiedades físicas presentaron una tendencia a aumentar desde la zona AP a la zona BP (Cuadro 2.4), al igual que la proporción del área que ocupan (Cuadro 2.3).

Cuadro 2.4. Brechas de rendimiento (%) identificadas y no identificadas por zona de productividad.

Factor limitante	BP	MP	AP	Total
Brecha no ID	9,0	5,4	3,7	5,7
CAAD (mm)	16,1	11,3	5,4	13,9
Dap 10-20 cm	16,3	8,3	10,6	11,7
(Ca + Mg) / K	17,1	11,1	8,4	10,5
Na-int (meq/100 g)		11,5	5,6	9,5
Porcentaje de N foliar		7,6	6,7	7,0
Total	16,3	8,9	7,4	10,2

AP = alta productividad; BP = baja productividad; MP = media productividad; CAAD (mm) = capacidad de almacenaje de agua disponible del suelo estimada; Dap = densidad aparente (g/cm^3) 10-20 cm; (Ca + Mg) / K = relación de bases; Na = sodio intercambiable (meq/100 g); brecha no ID = brecha de rendimiento no identificada (en porcentaje).

Las brechas de rendimiento no identificadas (Cuadro 2.4 y Figura 2.5) y, por lo tanto, no atribuibles a los factores más limitantes considerados en este estudio según la ley del mínimo de Von Liebig (1863) pueden deberse a otras propiedades del suelo.

La proporción de las zonas fuera del rango de suficiencia para la CAAD y la Dap aumentaron desde la zona AP hasta la zona BP (Cuadro 2.5 y Figura 2.8). En sentido opuesto, cuando dichos factores disminuyeron su proporción fuera del umbral de suficiencia, el Na-int tomó más relevancia en cuando a dicha proporción (Cuadro 2.5). El N foliar no presentó grandes cambios entre zonas de productividad en cuanto al área ubicada debajo del umbral crítico, aunque la zona MP tuvo menos sitios por debajo de este (Cuadro 2.5).

Cuadro 2.5. Nivel crítico de limitantes del rendimiento y porcentaje de puntos que limitan por zona de productividad.

Factor limitante	Nivel crítico	BP	MP	AP	Total
CAAD (mm)	<131	100	58	19	54
Dap 10-20 cm	>1,25	100	68	33	63
(Ca + Mg) / K	>30	36	47	38	41
Na-int (meq/100 g)	>0,88	21	32	52	37
Porcentaje de N foliar	<2,6	36	21	29	28

AP = alta productividad; BP = baja productividad; MP = media productividad; CAAD (mm) = capacidad de almacenaje de agua disponible del suelo estimada; Dap = densidad aparente (g/cm³) 10-20 cm; (Ca + Mg) / K = relación de bases; Na = sodio intercambiable (meq/100 g).

2.7. DISCUSIÓN

El rendimiento máximo del sitio experimental fue 14,2 Mg ha⁻¹ (Cuadro 2.1), obtenido en dos sitios ubicados en la zona AP. Este rendimiento es un 8 % menor al reportado en Uruguay como rendimiento potencial para maíz sin limitantes hídricas⁽⁴²⁾. Esta brecha se explica por el manejo del riego suplementario realizado en el sitio, el que determinó la existencia de deficiencias hídricas durante el período crítico para la determinación del rendimiento (el agua disponible se encontró entre 20 y 40 % durante la mayor parte de esta etapa) (Figura 2.2). Esta brecha se incrementó al 21 % en MP y 32 % en BP, lo que demostró la utilidad de delinear zonas de productividad actual diferente a partir de monitores de rendimiento georreferenciados. Pero, si bien las zonas se diferenciaron por la CAAD de suelo y presentaron deficiencias hídricas crecientes, no fue el único factor limitante ni dentro ni entre zonas (Figura 2.5 y Cuadro 2.2). Por tanto, el manejo necesario para levantar las limitantes impuestas por las propiedades y atributos del suelo será diferente para cada zona, pero también dentro de las zonas identificadas *a priori*.

Dentro de la zona BP, en el 86 % de los sitios se identificó la CAAD y la Dap entre 10 y 20 cm como factores limitantes del rendimiento y el 100 % de

la superficie estuvo por debajo de los valores críticos definidos (menor a 131 mm y mayor a $1,25 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente) (Cuadros 2.3 y 2.5). Si bien la CAAD es una limitante estructural, no modificable por manejo en el corto plazo, sí implicaría la posibilidad de un manejo específico del riego suplementario, de manera de levantar la limitante en el suministro de agua. Por otro lado, la Dap sí podría modificarse por manejo tanto en el corto como en el mediano plazo.

En la medida en que las propiedades físicas e hidrológicas del suelo no limitaron el consumo de agua ni el rendimiento (zona AP), las propiedades químicas fueron las limitantes principales (relación $(\text{Ca} + \text{Mg}) / \text{K}$, porcentaje de N foliar a R1 y Na int.). En la zona AP, las limitantes del rendimiento cumplen con los tres requisitos establecidos para la aplicación de un manejo sitio (zona) específico: I) la variabilidad espacial en factores que influyen en el rendimiento de los cultivos, II) que las causas de esa variabilidad puedan ser identificadas y medidas y III) la posibilidad de modificar las prácticas de manejo para mejorar la rentabilidad o disminuir el impacto ambiental. En este caso, la zona AP estuvo compuesta por dos subzonas con rendimiento limitado por nutrientes, pero en una por N (52 %) y en otra por la relación de bases (23 %) (Figura 2.5 y Cuadro 2.3).

Además de la CAAD, el N foliar, Dap 10-20 cm, Na-int. y la relación $(\text{Ca} + \text{Mg}) / \text{K}$, se identificaron como factores limitantes del rendimiento (Figura 2.5). Cabe destacar que Etcheberry⁽⁴³⁾ reportó la relación $(\text{Ca} + \text{Mg}) / \text{K}$ como limitante sitio-específica para el rendimiento de una secuencia de cultivos. El N foliar mostró aumentos de rendimiento hasta el 2,6 %, y se encontró que todas las zonas de productividad registraron valores inferiores y superiores a dicho umbral, aunque no se encontraron sitios con 230 UN ha^{-1} por debajo de este (Figura 2.3A). Dicho umbral fue inferior al 2,8 % reportado por Campbell y Plank⁽³⁶⁾. El nivel crítico para Na-int. fue $0,88 \text{ meq/100 g}$ (5,5 % de la CIC), sobre el que el rendimiento fue limitado (Figura 2.3C). Seifert et al.⁽⁴⁴⁾ detectaron una disminución del rendimiento a partir de 6 % de saturación

de la CIC por Na, mientras que la definición común de suelos sódicos es por encima de 15 %.

En caso de tomar como referencia el rendimiento alcanzable bajo el manejo del riego efectuado, la brecha de rendimiento media explicada por propiedades y atributos del suelo fue de $1,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ (10,5 %) y la no identificada de $0,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ (5,6%) (Cuadro 2.2). Considerando que, por definición, el rendimiento alcanzable bajo manejo comercial es un 80 % del rendimiento potencial ($15,5 \text{ Mg ha}^{-1}$), este trabajo muestra poco margen de mejora del rendimiento por aplicación de estrategias de manejo sitio-específico. Sin embargo, considerando la posibilidad de delinear zonas de productividad actual diferente, la brecha identificada varió entre 16,3 % (BP) y 7,4 % (AP) (Cuadro 2.4). Por el tipo de limitante, la estrategia de riego, tanto en cantidad como en frecuencia, sería una práctica con capacidad de modificar la restricción hídrica impuesta por la CAAD y la Dap, en tanto, en la zona AP, el manejo de la fertilización nitrogenada y ajustar la relación de bases acortarían la brecha y/o podrían modificar la eficiencia de uso del N suministrado.

2.8. CONCLUSIONES

La estrategia planteada permitió identificar las propiedades del suelo que limitaron el rendimiento de maíz en ambientes de distinta productividad actual. Mientras que los factores nutricionales (porcentaje de N foliar y relación $(\text{Ca} + \text{Mg}) / \text{K}$) fueron los más importantes en AP, la CAAD y Dap lo fueron en BP. Por tanto, para levantar las limitantes del rendimiento en cada zona se requieren medidas de manejo diferentes. De esta forma, la CAAD que limitó el rendimiento en BP podría categorizarse como una limitante estructural o fija, debido a su baja posibilidad de ser mejorada mediante manejo del suelo, siendo necesaria una mayor lámina de riego en dicha zona para disminuir su impacto en el cultivo. Por otro lado, las limitantes identificadas en AP (limitantes temporales) pueden ser mejoradas mediante manejo de la nutrición nitrogenada y del balance de cationes en el complejo de intercambio del suelo.

2.9. AGRADECIMIENTOS

La información fue recopilada en el proyecto *Diagnóstico de limitantes y herramientas para la mejora de la productividad de sistemas regados de cereales, oleaginosos y pasturas*, impulsado por la Agencia Nacional de Desarrollo en el marco del instrumento Bienes Públicos Sectoriales ANDE 2017 y ejecutado por Regadores Unidos del Uruguay (RUU), por lo que se agradece especialmente a la ANDE y a los productores y empresas socios RUU.

Transparencia de los datos

Datos disponibles: Todo el conjunto de datos que respalda los resultados de este estudio se publicó en el propio artículo.

Declaración de contribución de los autores

Todos los autores contribuyeron igualmente al contenido.

2.10. BIBLIOGRAFÍA

1. Von Liebig JF, Blyth J. The natural laws of husbandry. Walton & Maberly; 1863.
2. Urricariet S, Niborski M, Kvolek CM. Atributos del suelo y paisaje asociados a la variabilidad de rendimientos de maíz en la pampa arenosa. *Ciencia del Suelo*. 2011;29(1):49–59.
3. Bakhsh A, Colvin TS, Jaynes DB, Kanwar RS, Tim US. Using soil attributes and GIS for interpretation of spatial variability in yield. *American Society of Agricultural Engineers*. 2000;43(4):819–28.
4. Plant RE. Site-specific management: the application of information technology to crop production. *Comput Electron Agric* [Internet]. 2001;30(1–3):9–29. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0168-1699\(00\)00152-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0168-1699(00)00152-6)
5. Lauzon JD, O'Halloran IP, Fallow DJ, von Bertoldi AP, Aspinall D. Spatial variability of soil test phosphorus, potassium, and pH of Ontario soils.

- Agron J [Internet]. 2005;97(2):524–32. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2005.0524>
6. Lark RM, Wheeler HC. A method to investigate within-field variation of the response of combinable crops to an input. Agron J [Internet]. 2003;95(5):1093–104. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2003.1093>
 7. Kravchenko AN, Bullock DG. Spatial variability; correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. Agronomy Journal. 2000;92(1):75–83.
 8. Farid HU, Bakhsh A, Ahmad N, Ahmad A, Mahmood-Khan Z. Delineating site-specific management zones for precision agriculture. J Agric Sci [Internet]. 2016;154(2):273–86. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1017/s0021859615000143>
 9. Cassman KG. Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture. Proc Natl Acad Sci U S A [Internet]. 1999;96(11):5952–9. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.96.11.5952>
 10. Hernandez JA, Mulla DJ. Comparing classical and spatial statistical analysis methods for landscape scale experimental designs. En: En: 6th International Conference on Precision Agriculture. 2002. p. 763–73.
 11. Panten K, Bramley RGV, Lark RM, Bishop TFA. Enhancing the value of field experimentation through whole-of-block designs. Precis Agric [Internet]. 2010;11(2):198–213. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s11119-009-9128-y>
 12. Bishop TFA, Lark RM, Piepho HP, Richter C, Spilke J, Hartung K, et al. Spatial variation of soil properties and rice yield on recently cleared land. Soil Science Society of America Journal. 1987;133(9):668–74.
 13. Piepho H-P, Richter C, Spilke J, Hartung K, Kunick A, Thöle H. Statistical aspects of on-farm experimentation. Crop Pasture Sci [Internet]. 2011;62(9):721. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1071/cp11175>

14. Trangmar BB, Yost RS, Wade MK, Uehara G, Sudjadi M. Spatial variation of soil properties and rice yield on recently cleared land. *Soil Sci Soc Am J* [Internet]. 1987;51(3):NP-NP. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100030059x>
15. Cambardella CA, Moorman TB, Novak JM, Parkin TB, Karlen DL, Turco RF, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci Soc Am J* [Internet]. 1994;58(5):1501–11. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>
16. Ortega R, Flores L, Inia CQ, De Recursos Naturales D, Ambiente M. Agricultura de Precisión: Introducción al manejo sitio-específico. Ministerio de Agricultura, Instituto de investigaciones agropecuarias. CRI Quilamapu. 1999;13–46.
17. Jenny H. Factors of soil formation: A system of quantitative pedology. Courier Corporation; 1994.
18. Dobermann A. Factors causing field variation of direct-seeded flooded rice. *Geoderma* [Internet]. 1994;62(1–3):125–50. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0016706194900329>
19. Wilding LP, Drees LR. Spatial variability: a pedologist's view point. *Diversity of Soils in the Tropics ASA Spec Publ No.* 1978;34:1–12.
20. Pierce FJ, Nowak P. Aspects of Precision Agriculture. En: *Advances in Agronomy*. Elsevier; 1999. p. 1–85.
21. Sharma L, Bali S. A review of methods to improve nitrogen use efficiency in agriculture. *Sustainability* [Internet]. 2017 [citado el 20 de noviembre de 2023];10(2):51. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/1/51>
22. Thöle H, Richter C, Ehlert D. Strategy of statistical model selection for precision farming on-farm experiments. *Precis Agric* [Internet]. 2013;14(4):434–49. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s11119-013-9306-9>

23. Webb RA. Use of the Boundary Line in the analysis of biological data. *J Hortic Sci* [Internet]. 1972;47(3):309–19. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1080/00221589.1972.11514472>
24. Shatar TM, Mcbratney AB. Boundary-line analysis of field-scale yield response to soil properties. *J Agric Sci* [Internet]. 2004;142(5):553–60. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1017/s0021859604004642>
25. Ernst OR, Dogliotti S, Cadenazzi M, Kemanian AR. Shifting crop-pasture rotations to no-till annual cropping reduces soil quality and wheat yield. *Field Crops Res* [Internet]. 2018;217:180–7. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2017.11.014>
26. Sadras VO. A quantitative top-down view of interactions between stresses: theory and analysis of nitrogen-water co-limitation in Mediterranean agro-ecosystems. *Australian Journal of Agricultural Research*. 2005;56(11):1151–7.
27. MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). Informe de la carta de reconocimiento de suelos de Colonia y Soriano Escala 1:200.000. 1992. Disponible en https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/Comunicaciones/1628_carta_de_reconocimiento_de_suelos_colonia_y_soriano_0.pdf
28. Ritchie SW, Hanway JJ. How a Corn Plant Develops. Special. Iowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service. Report No. 48. 1982.
29. Bray RH, Kurtz LT. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci* [Internet]. 1945;59(1):39–46. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-194501000-00006>
30. Jackson ML. Análisis químico de suelos. Ediciones Omega S A Barcelona. 1964;662.
31. Beretta A, Bssahún D Teorres Deborah Musselli Raquel, García L. Acidez titulable a pH = 7 estimada a partir del pH de una mezcla suelo: buffer. *Agrociencia*. 2017;1:105–8.

32. Gelderman RH, Beegle D. Recommended chemical soil testing procedures for the North Central Region. Brown JR, editor. 1998;17–20.
33. Wright AF, Bailey JS. Organic carbon, total carbon, and total nitrogen determinations in soils of variable calcium carbonate contents using a Leco CN-2000 dry combustion analyzer. Commun Soil Sci Plant Anal [Internet]. 2001;32(19–20):3243–58. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1081/css-120001118>
34. Wilson JP, Gallant JC. Digital terrain analysis. Terrain analysis: Principles and applications. 2000;6(12), 1-27.
35. Moore ID, Gessler PE, Nielsen GA, Peterson GA. Soil attribute prediction using terrain analysis. Soil Sci Soc Am J [Internet]. 1993;57(2):443–52. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700020026x>
36. Campbell CR, CO Plank. Reference sufficiency ranges, field crops: Corn. N.C. Department of Agriculture and Consumer Services. 2000. Disponible en: <http://www.ncagr.gov/agronomi>
37. Albarenque SM, Vélez JP. Técnicas para el procesamiento de mapas de rendimiento- 1.a ed. Yuto: Ediciones INTA, 2011.
38. Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: FAO. 2006;298(0).
39. Saxton KE, Rawls WJ. Estimaciones de las características del agua del suelo por textura y materia orgánica para soluciones hidrológicas. Revista de la Sociedad de Ciencia del Suelo de América. 2006;70:1569–78.
40. Webster R, Oliver MA. Geostatistics for environmental scientists. In: Senn S, Scott M, Barnett V, editors. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons Ltd; 2007. p. 153-194.
41. Casanova D, Goudriaan J, Bouma J, Epema GF. Yield gap analysis in relation to soil properties in direct-seeded flooded rice. Geoderma

- [Internet]. 1999;91(3–4):191–216. Disponible en:
[http://dx.doi.org/10.1016/s0016-7061\(99\)00005-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0016-7061(99)00005-1)
42. Giménez L. Rendimientos de maíz y soja: un desafío que provoca... La información experimental y la producción comercial. Cangüé, (42), 2019. 7-12. Disponible en:
https://r.search.yahoo.com/_ylt=AwrFQ2pNFytkEk4IZ.rrFAx.;_ylu=Y29sbwNiZjEEcG9zAzQEdnRpZAMEc2VjA3Ny/RV=2/RE=1680574413/RO=10/RU=http%3a%2f%2fwww.eemac.edu.uy%2fcangue%2fimages%2frevistas%2frevista_42%2fC42_3%2520rendimientos%2520maiz%2520soja.pdf/RK=2/RS=zTv2TAVWOvRxqomnurmqtmkhYRY-
43. Etchegoimberry P. Identificación de factores limitantes del rendimiento de una secuencia de cultivos. En: Tesis Magíster en Ciencias Agrarias Opción Ciencias Vegetales. Montevideo, Uruguay; 2019.
44. Seifert C, Ortiz-Monasterio JI, Lobell DB. Satellite-based detection of salinity and sodicity impacts on wheat production in the Mexicali valley. *Soil Sci Soc Am J* [Internet]. 2011;75(2):699–707. Disponible en:
<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2010.0233>

2.11. ANEXOS

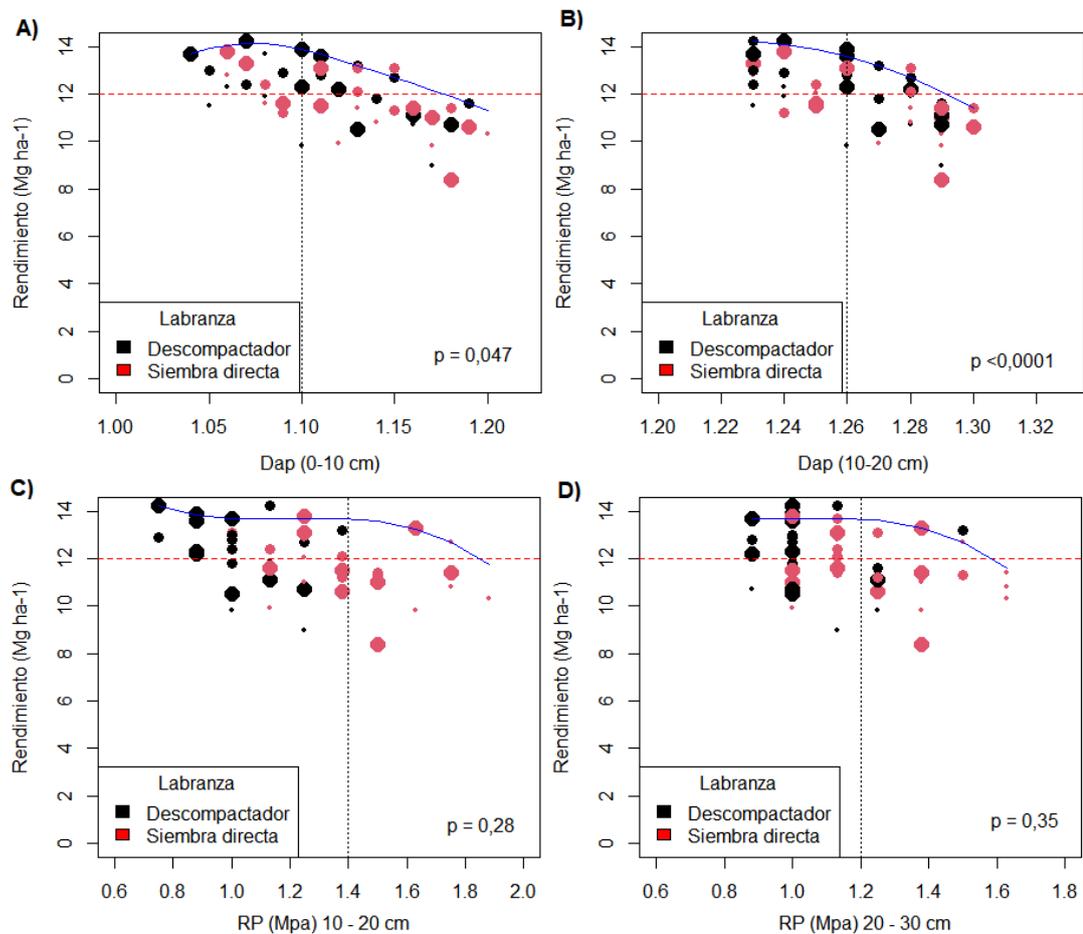


Figura 2.6. Relaciones de frontera entre el rendimiento y **A)** densidad aparente 0-10 cm (g/cm^3); **B)** densidad aparente 10-20 cm (g/cm^3); **C)** resistencia a la penetración (RP) en MPa de 10 a 20 cm y **D)** resistencia a la penetración (RP) en MPa de 20 a 30 cm.

Dap = densidad aparente (g/cm^3); El tamaño de los círculos varía según la dosis de nitrógeno aplicada, siendo más chicos el T1 = 80 UN ha^{-1} , intermedios el T2 = 160 UN ha^{-1} y grandes el T3 = 230 UN ha^{-1} ; línea horizontal roja punteada indica un rendimiento de maíz de 12 ton ha^{-1} ; línea vertical negra punteada indica el cambio de función de la relación de frontera entre ambas variables; línea gris indica la relación de frontera entre ambas variables.

Cuadro 2.6. Precipitaciones y riego acumulados mensuales (mm)

Mes	Precipitaciones (mm)	Riego (mm)	Total
Octubre	159	0	159
Noviembre	25	28	53
Diciembre	141	30	171
Enero	40	92	132
Febrero	82	0	82
Total	447	150	597

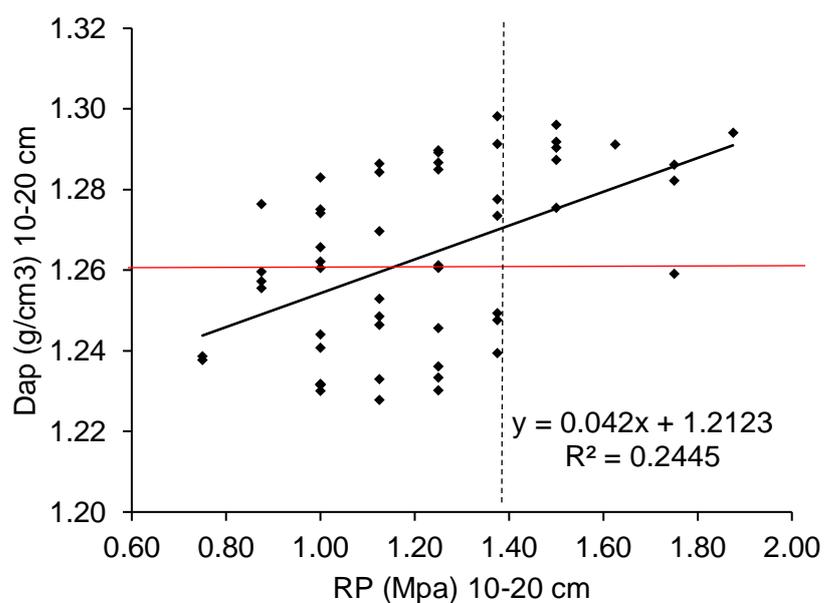


Figura 2.7. Relación entre resistencia a la penetración (RP) y la densidad aparente del suelo de 10 a 20 cm de profundidad.

Línea horizontal roja indica una Dap de 1,26 g/cm³; Línea vertical negra punteada indica una RP de 1,38 Mpa.

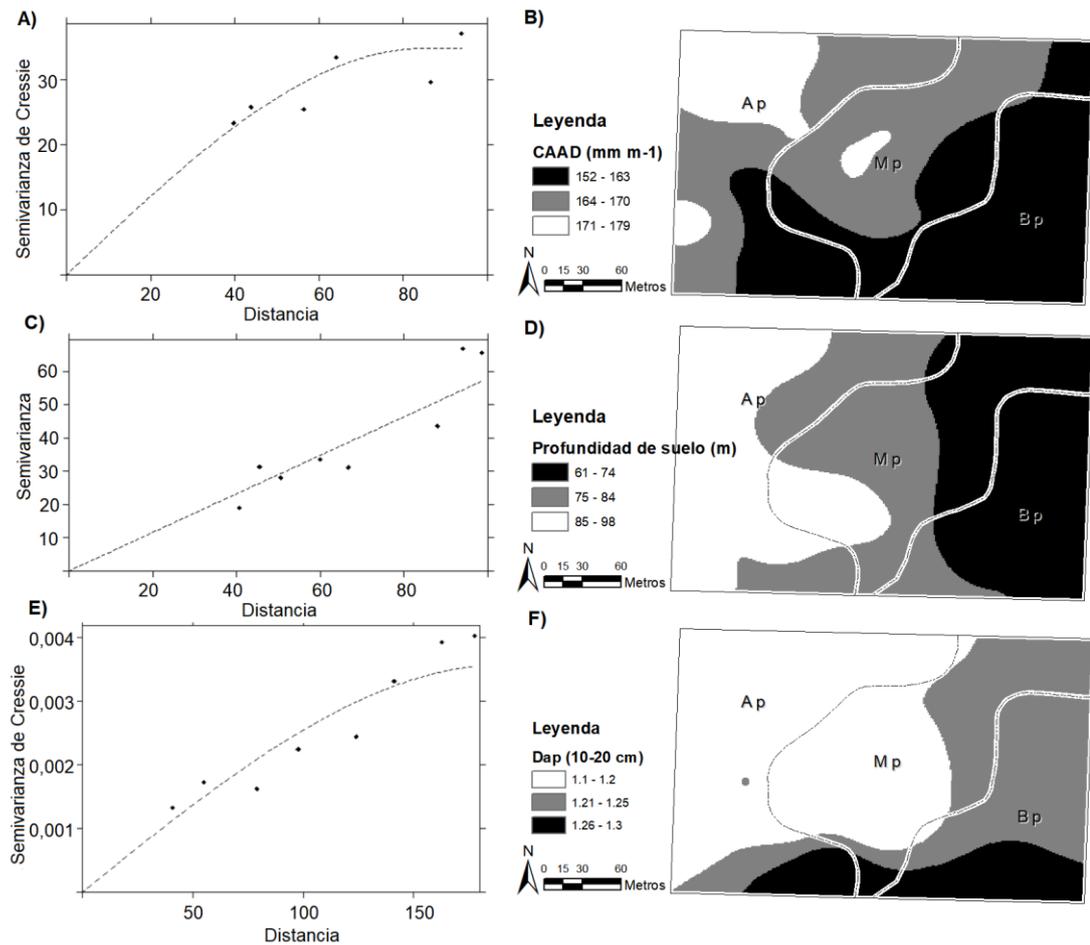


Figura 2.8. **A)** Semivariograma de Cressie-Hawkins de CAAD (mm m^{-1}); **B)** mapa interpolado de CAAD (mm m^{-1}); **C)** Semivariograma de Cressie-Hawkins de profundidad de suelo (m); **D)** mapa interpolado de profundidad de suelo (m); **E)** semivariograma de Cressie-Hawkins de Dap (10-20 cm) y **F)** mapa interpolado de Dap (10-20 cm).

CAAD = capacidad de almacenamiento de agua disponible del suelo (mm); Dap = densidad aparente (g cm^{-3}) 10-20 cm.

3. RESPUESTA SITIO-ESPECÍFICA A LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN MAÍZ BAJO RIEGO

Sebben G.^A, Giménez L.^B, Ernst O.^B

^A Regadores Unidos del Uruguay, 18 de Julio 231, Mercedes 75000, Uruguay.

^B Departamento de Producción Vegetal, Facultad de Agronomía, Estación Experimental Mario A. Cassinoni, Universidad de la República, Ruta 3, km 363, Paysandú 60000, Uruguay.

3.1. RESUMEN

La heterogeneidad de los suelos dentro de cada chacra determina que, bajo el mismo manejo, el rendimiento de maíz bajo riego presente variabilidad espacial. La diferenciación por zonas de rendimiento permite identificar factores limitantes del rendimiento que generan dicha variabilidad y proponer esquemas de manejo de fertilización sitio-específico. La hipótesis de trabajo fue que la fertilización nitrogenada realizada de manera sitio-específica en maíz bajo riego, contemplando la variabilidad espacial de las propiedades físico-químicas del suelo que limitan los rendimientos, permite obtener la mayor eficiencia de uso del nutriente en cada zona de manejo. Los objetivos del trabajo fueron: I) determinar la respuesta sitio-específica a dos dosis de nitrógeno (N) y II) determinar la relación entre la eficiencia de uso del N (EUNam) y las propiedades físicas y químicas del suelo. Para lograr dichos objetivos se realizó un ensayo de maíz bajo riego suplementario, en condiciones comerciales. El sitio experimental presentó variabilidad espacial en el rendimiento antecedente de cultivos con riego. Se evaluaron tres dosis de N (80, 160 y 230 UN ha⁻¹) y se aplicaron dos tratamientos de labranza (con y sin descompactación subsuperficial) para generar variabilidad en las propiedades físicas del suelo. Los resultados obtenidos indicaron que las zonas de productividad antecedente maximizaron el rendimiento con diferentes dosis de N y presentaron diferencias en EUNam. Se encontraron

diferencias en las propiedades físicas entre zonas de productividad, con poca variación de estas con el uso de descompactador, manteniéndose como limitante de la EUNam en la zona de menor productividad.

Palabras clave: manejo sitio-específico, paraplow, nitrógeno, EUN

3.2. SUMMARY

The heterogeneity of the soils within each farm determines that, under the same management, corn yield under irrigation presents spatial variability. Differentiation by yield zones makes it possible to identify yield-limiting factors that generate said variability and propose site-specific fertilization management schemes. The working hypothesis was that nitrogen fertilization carried out in a site-specific manner in irrigated corn, contemplating the spatial variability of the physical-chemical properties of the soil that limit yields, allows obtaining the greatest efficiency of use of the nutrient in each area of production. The objectives of the work were: I) determine the site-specific response to two doses of nitrogen (N) and II) determine the relationship between the efficiency of N use (EUNam) and the physical and chemical properties of the soil. To achieve these objectives, a corn trial was carried out under supplementary irrigation, under commercial conditions. The experimental site presented spatial variability in the antecedent yield of irrigated crops. Three doses of N were evaluated (80, 160 and 230 UN ha⁻¹) and two tillage treatments were applied (with and without subsurface decompaction) to generate variability in the physical properties of the soil. The results obtained indicated that the antecedent productivity zones maximized yield with different N doses and presented differences in EUNam. Differences in physical properties were found between productivity zones, with little variation in these with the use of decompactor, remaining as a limiter of the EUNam in the zone of lower productivity.

Keywords: site-specific management, paraplow, nitrogen, EUN

3.3. RESUMO

A heterogeneidade dos solos dentro de cada fazenda determina que, sob um mesmo manejo, a produtividade do milho irrigado apresente variabilidade espacial. A diferenciação por zonas de rendimento permite identificar os factores limitantes do rendimento que geram essa variabilidade e propor esquemas de gestão da fertilização específicos do local. A hipótese de trabalho foi que a adubação nitrogenada realizada de forma site-specific no milho irrigado, contemplando a variabilidade espacial das propriedades físico-químicas do solo que limitam a produtividade, permite obter a maior eficiência de utilização do nutriente em cada área de produção. Os objetivos do trabalho foram: I) determinar a resposta específica do local a duas doses de nitrogênio (N) e II) determinar a relação entre a eficiência de uso do N (EUNam) e as propriedades físicas e químicas do solo. Para atingir estes objetivos foi realizado um ensaio de milho sob irrigação suplementar, em condições comerciais. O local experimental apresentou variabilidade espacial na produtividade antecedente das culturas irrigadas. Foram avaliadas três doses de N (80, 160 e 230 UN ha⁻¹) e aplicados dois tratamentos de preparo (com e sem descompactação subterrânea) para gerar variabilidade nas propriedades físicas do solo. Os resultados obtidos indicaram que as zonas de produtividade antecedentes maximizaram a produtividade com diferentes doses de N e apresentaram diferenças na EUNam. Foram encontradas diferenças nas propriedades físicas entre as zonas de produtividade, com pouca variação nestas com o uso do descompactador, permanecendo como limitador do EUNam na zona de menor produtividade.

Palavras-chave: manejo específico do local, paraplough, nitrogênio, EUN

3.4. INTRODUCCIÓN

La producción de alimentos presenta el desafío de satisfacer una demanda creciente optimizando la eficiencia de uso de los insumos⁽¹⁾. La disponibilidad de agua es la responsable principal de la falta de estabilidad productiva y de la brecha tecnológica relativa entre el rendimiento potencial y el obtenido a nivel comercial, en cultivos de verano⁽²⁻³⁾. El maíz sin limitantes hídricas en Uruguay es capaz de alcanzar rendimientos de 15,5 Mg ha⁻¹, mientras la brecha tecnológica respecto a condiciones comerciales en seco es de 8,5 Mg ha⁻¹⁽²⁾.

Actualmente, el maíz presenta la mayor proporción de área regada respecto al área total sembrada con el 16 % (exceptuando arroz y caña de azúcar)⁽⁴⁾. No obstante, aún bajo riego, la heterogeneidad de los suelos en cada unidad de manejo (chacra) determina una amplia variabilidad espacial del rendimiento.

La implementación en agricultura de tecnologías de la información, como sistemas de posicionamiento global y cosechadoras equipadas con monitor de rendimiento, permite cuantificar la variabilidad espacial del rendimiento dentro de las unidades de producción con manejo homogéneo⁽⁵⁻⁷⁾. Una vez diferenciadas zonas por su rendimiento, es posible identificar los factores limitantes que las generan y proponer esquemas de manejo sitio-específico⁽⁶⁻⁹⁾.

El manejo sitio-específico de cultivos implica implementar su manejo a una escala espacial menor que la chacra en su totalidad⁽⁶⁾⁽¹⁰⁾. Los tres criterios que justifican de mejor manera el manejo sitio-específico según estos autores son: I) la variabilidad espacial en factores que influyen en el rendimiento de los cultivos, II) las causas de esa variabilidad que pueden ser identificadas y medidas y III) las posibilidades de modificar las prácticas de manejo para mejorar la rentabilidad o disminuir el impacto ambiental.

La calidad del suelo fue definida por Doran y Parkin⁽¹¹⁾ como la capacidad para sostener la productividad biológica, mantener la calidad ambiental y

promover la salud de las plantas y los animales. El concepto implica cuantificar propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, generalmente muy correlacionadas entre sí, con el manejo del cultivo y la respuesta vegetal⁽¹²⁾.

La importancia de cuantificar la calidad del suelo, radica en que la respuesta al manejo del suelo y a los insumos dependen de ella. Si bien el concepto fue desarrollado por Cassman⁽¹⁾, quien representó la relación teórica entre el rendimiento y los requerimientos de insumos influenciados por la calidad del suelo como el sustento para la agricultura de precisión, la alta correlación que existe entre las propiedades del suelo genera un problema metodológico para cuantificarla. Por tanto, integrarlas en índices basados en una combinación de propiedades resulta un mejor estimador que cada propiedad por separado⁽¹³⁾.

La propuesta desarrollada para calificar la calidad del suelo es reducir la información al mínimo número de propiedades que representan al conjunto. La selección de las variables se realiza mediante análisis multivariados⁽¹⁴⁻¹⁵⁾. Entre estos métodos, el análisis factorial es uno de uso común debido a su capacidad para agrupar propiedades del suelo relacionadas en una pequeña cantidad de factores independientes, para reducir la información redundante en el conjunto de datos originales.

El manejo del N, en forma sostenible, ha sido identificado como uno de los mayores retos ecológicos de la humanidad⁽¹⁶⁾. Las diferencias en la calidad del suelo implican que se necesitaran dosis de N específicas en cada sitio para optimizar el rendimiento y las ganancias y para minimizar las pérdidas de N⁽¹⁾. Por tanto, el manejo sitio-específico de la fertilización nitrogenada es una de las formas de mejorar la eficiencia de uso del N en la agricultura⁽¹⁷⁾. Dado que es probable que la variabilidad en la fertilidad del suelo afecte la productividad de la tierra, la eficiencia de captura y utilización de la luz, el agua y los nutrientes, su existencia conduce necesariamente a gradientes de eficiencia en el uso de los recursos e insumos⁽¹⁸⁾.

Trevisan et al.⁽¹⁹⁾ identificaron respuestas diferenciales entre zonas de productividad intrachacra a la dosis de N en maíz con y sin riego. Para la

determinación de la dosis óptima en cada zona de manejo, el rendimiento potencial por sí solo podría no ser un buen predictor de las tasas óptimas, ya que las propiedades edáficas pueden afectar el rendimiento y la eficiencia de uso del N.

La hipótesis del trabajo es que la fertilización nitrogenada realizada por zonas de productividad en maíz bajo riego, contemplando la variabilidad espacial de las propiedades físico-químicas del suelo que limitan los rendimientos, permite mejorar la eficiencia de uso del nutriente en cada zona de manejo.

Los objetivos del trabajo fueron: I) determinar la respuesta sitio-específica a dos dosis de N y II) determinar la relación entre la eficiencia de uso del N y las propiedades físicas y químicas del suelo.

3.5. MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó dentro de una chacra comercial de maíz bajo riego suplementario, de la que se dispuso de registros de rendimiento de cultivos anteriores colectados con cosechadora equipada con monitor de rendimiento georreferenciado. La superficie del experimento fue de 5,5 ha, incorporando a la variabilidad natural del campo, la generada por el uso del paraplow como herramienta de descompactación subsuperficial del suelo y la generada por aplicación de distintas dosis de fertilizante nitrogenado.

3.5.1. Sitio experimental

El trabajo se realizó en la zafra 2019-20 dentro de una chacra de 60 ha, ubicada en ruta 21 km 328, (S -33° 28' 01,17"; O -58° 11' 47,4"), en Dolores, Departamento de Soriano, Uruguay. La chacra estuvo bajo agricultura continua sin labranza desde hace más de 20 años. Los suelos dominantes son brunosoles éutricos típicos (argiudoles típicos) de la unidad de suelos Bequeló, según la Carta de Reconocimiento de Suelos de Colonia y Soriano⁽²⁰⁾. El área en estudio se encuentra en su totalidad bajo un pívot central de riego (Cuadro 3.1). El cultivo antecesor a la siembra de maíz fue *Vicia villosa* en el invierno 2019.

Cuadro 3.1. Precipitaciones y riego acumulados mensuales (mm)

Mes	Precipitaciones (mm)	Riego (mm)	Total
<i>Octubre</i>	159	0	159
<i>Noviembre</i>	25	28	53
<i>Diciembre</i>	141	30	171
<i>Enero</i>	40	92	132
<i>Febrero</i>	82	0	82
Total	447	150	597

3.5.2. Estrategia experimental

El experimento consistió en una combinación de tres zonas de productividad (alta = AP, media = MP y baja productividad = BP), por dos tratamientos de labranza (descompactación subsuperficial = D, siembra directa = SD), dispuestos de manera transversal a las zonas. De esta manera, se combinó la variabilidad espacial de propiedades químicas y atributos del suelo con un gradiente de propiedades físicas generadas por descompactación mecánica subsuperficial. Dentro de estas fajas, se sortearon tres niveles de fertilización nitrogenada (80, 160 y 230 UN ha⁻¹ totales) para generar variabilidad en la disponibilidad del nutriente en las distintas zonas de manejo (Figura 3.1C).

Las tres zonas estaban identificadas previo al inicio del trabajo con base en el análisis de cuatro mapas de rendimiento previos, dos años de maíz (2010-2011 y 2016-2017) y dos años de soja (2015-2016 y 2017-2018). Las zonas se generaron con un análisis de clúster con la metodología de K-means, con una resolución espacial de 10 m x 10 m en el software SAGA GIS.

La descompactación se realizó el 15 de julio de 2019, previo a la siembra de maíz, con una profundidad de trabajo de 0,35 metros, en franjas de 270 metros de largo y 34 metros de ancho, con tres repeticiones apareadas, cruzando las tres zonas de productividad (Figura 3.1A).

Los tratamientos de fertilización nitrogenada fueron distribuidas al azar con 18 repeticiones en parcelas de 30 x 34 metros (Figura 3.1C), restringidas

para que se repitan en las distintas zonas y tratamientos de labranza. Las dosis de N se aplicaron de manera fraccionada (en 4 aplicaciones) entre V6 y V10⁽²¹⁾ con 80, 160 y 230 UN ha⁻¹ totales.

La unidad experimental corresponde a una grilla de 30 x 34 m, totalizando 5,5 ha con 54 puntos de muestreo georreferenciados ubicados en el centro de cada parcela (Figura 3.1). La siembra se realizó el 1/10/2019 con el híbrido de maíz P1845YR y a una densidad de 100.000 semillas ha⁻¹ a 0,76 m de distancia entre hileras.

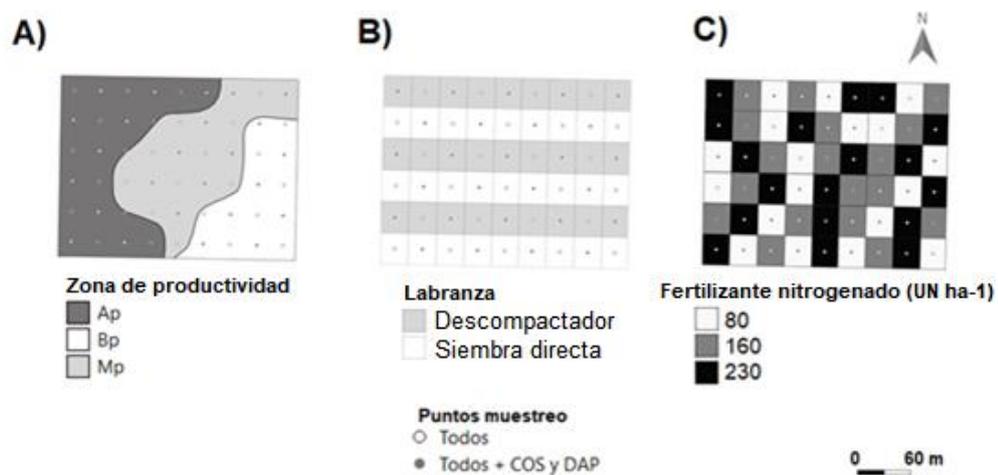


Figura 3.1. **A)** Zonas de productividad, **B)** tratamientos con y sin descompactación, **C)** tratamientos de fertilización nitrogenada.

AP = alta productividad; BP = baja productividad; MP = media productividad; todos = todos los parámetros de suelo y cultivo medidos a excepción de carbono orgánico de suelo (COS) y densidad aparente (DAP); todos + COS y DAP = todos los parámetros de suelo y cultivo medidos incluyendo carbono orgánico de suelo (COS) y densidad aparente (DAP).

3.5.3. Determinaciones

3.5.3.1. Determinaciones en el suelo

Cada sitio fue caracterizado por sus propiedades químicas y físicas, aporte de nitrógeno (N) y disponibilidad hídrica. Para ello se tomaron diez submuestras en un radio de 5 metros alrededor del centro de cada parcela a una profundidad de 0,20 m.

3.5.3.1.1. Estimadores de propiedades químicas

- Previo a la siembra se determinó: P Bray 1⁽²²⁾, CIC (con Ca, Mg, K, Na y acidez titulable)⁽²³⁾, y pH⁽²⁴⁾.
- Aporte de N: el estadio V6 del maíz⁽²¹⁾ se determinó la concentración de N-NO₃⁻ (ppm)⁽²⁵⁾.
- Carbono orgánico del suelo (COS). El muestreo se realizó a dos profundidades (0-10 y 10-20 cm) en las parcelas de orden impar, por lo que se realizaron 27 sitios de muestreo intercalados (Figura 3.1)⁽²⁶⁾.

3.5.3.1.2. Propiedades físicas

- Resistencia a la penetración (RP): se midió en la misma grilla utilizada para P Bray, CIC y pH, tomando cinco mediciones por sitio de muestreo, hasta los 40 cm de profundidad. Estas se realizaron con un penetrológico marca Eijkelkamp, con un cono de 60 ° y 1 cm² de área de cono, cuando el suelo se encontró con un contenido de agua próximo a capacidad de campo, evitando sobreestimar esta medida debido a la falta de humedad⁽²⁷⁾.
- Densidad aparente (Dap) y textura: se determinaron 15 días posteriores a la siembra, se muestreó a dos profundidades (0-10 y 10-20 cm) en las parcelas impares (Figura 3.1).
- Conductividad eléctrica aparente (CEa del suelo): se determinó con una sonda Veris 3100, con 7 metros entre pasadas a una velocidad de 4 km hora⁻¹, se registró la CEa superficial y profunda del suelo (30 y 90 cm).

3.5.3.1.3. Variables que caracterizan el aporte de agua

- Capacidad de almacenaje de agua disponible (CAAD) y la conductividad hidráulica en flujo saturado del suelo (Ksat) fueron calculadas mediante las funciones de pedotransferencia⁽²⁸⁾, utilizando el porcentaje de MO, textura y Dap.

- Modelo digital de terreno hidrológicamente consistente (MDTHC) para determinar los atributos primarios del terreno: pendiente y área específica de cuenca⁽²⁹⁾ y los atributos secundarios: índice topográfico de humedad (TWI), índice de poder de escorrentía (SPI) y factor LS de USLE/RUSLE (LS)⁽³⁰⁾. El MDTHC es producto de la adquisición de imágenes digitales de un levantamiento aerofotogramétrico con la cámara UltraCam Eagle Prime con tamaño del píxel de 32 cm.

3.5.3.2. Determinaciones en el cultivo

En el estadio R1 del maíz se realizó un muestreo foliar en grilla para determinar el N foliar (%) de la hoja opuesta por debajo de la espiga⁽³¹⁾. El muestreo se realizó el 24/12/2019 tomando 20 muestras por sitio de muestreo en las 54 parcelas (Figura 3.1).

La cosecha se realizó con una cosechadora comercial John Deere S680 equipada con monitor de rendimiento y DGPS. El mapa de rendimiento fue procesado con los softwares GIS SMS advanced 18.5 y QGIS 3.0 y bajo la metodología propuesta por Albarenque y Velez⁽³²⁾. Por último, se eliminaron los datos de un búfer de 5 metros alrededor de cada huella del equipo de riego. El valor de rendimiento de cada parcela se obtuvo promediando los puntos dentro de un búfer de 10 metros de radio desde el centro.

3.5.3.2.1. Estatus hídrico del cultivo

Se realizó un balance hídrico de suelo de paso diario durante todo el ciclo (anexos: Figura 3.8). Para esto, se utilizó la metodología propuesta por Allen et al.⁽³³⁾, la cual considera que el balance hídrico diario en la zona radicular, expresado en términos de agotamiento al final del día, es:

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P - RO)_i - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \quad (1)$$

donde

$D_{r,i}$ agotamiento de humedad en la zona radicular del suelo al final del día i (mm),

$D_{r,i-1}$ contenido de humedad en la zona radicular al final del día

- anterior, $i-1$ (mm),
- P_i precipitación en el día i (mm),
- RO_i escurrimiento superficial en el día i (mm),
- I_i lámina neta de riego en el día i que infiltra en el suelo (mm),
- CR_i ascenso capilar proveniente de la masa de agua subterránea en el día i (mm),
- $ET_{c,i}$ evapotranspiración del cultivo en el día i (mm),
- DP_i pérdidas de agua de la zona radicular por percolación profunda en el día i [mm].

Se tomó la CAAD (165 mm) y la profundidad del suelo (78 cm) promedio para realizar el balance hídrico de paso diario. La evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) se calculó mediante Penman y Monteith como detallan Allen et al.⁽³⁸⁾. Los datos climáticos para dicho cálculo se obtuvieron de una estación meteorológica marca Davis, ubicada a 5 km del sitio experimental (S $-33^\circ 26' 07,47''$; O $-58^\circ 14' 11,20''$) y las precipitaciones fueron registradas en el sitio experimental.

Por otro lado, se obtuvieron cuatro imágenes satelitales de evapotranspiración ajustada del cultivo (ET_c aj) y cuatro de temperatura de la superficie, con el objetivo de evaluar el estatus hídrico del cultivo en forma relativa para cada parcela, a través del balance de energía de las capas inferiores de la atmósfera (SEBALI)⁽³⁵⁾. Las imágenes fueron procesadas mediante la metodología propuesta por Irmak et al.⁽³⁴⁾, con las que se determinó el promedio del 1 al 25 de diciembre con cuatro imágenes satelitales, sin realizar un ajuste local de los valores extremos (Figura 11.B).

3.5.3.2.2. El Cuantificación de la eficiencia de uso del nitrógeno.

La eficiencia de uso del N agronómica marginal (EUN_{am}) se estimó como:

$$EUN_{am} = \frac{Y_{N_i} - Y_{N_{min}}}{N_i - N_{min}} \quad (2)$$

donde

EUNam	eficiencia de uso del N agronómica marginal (kg grano/kg N)
\underline{Y}_{Ni}	rendimiento para la dosis i de N (kg/ha).
\underline{Y}_{Nmin}	rendimiento para la dosis mínima de N (kg/ha).
N_i	dosis i de N (kg/ha).
N_{min}	dosis mínima de N (kg/ha).

3.5.4. Análisis estadístico

3.5.4.1. Autocorrelación espacial

Se realizaron interpolaciones de todas las variables mediante el procedimiento geoestadístico Kriging ordinario⁽³⁶⁾. Se utilizó el paquete geoR del software estadístico Rstudio (2019), pudiendo generar mapas consistentes para todas las variables, a excepción del número de granos m⁻². Los modelos utilizados para el ajuste de los semivariogramas de los mapas interpolados fueron gaussiano, exponencial y esférico, para seleccionar el modelo con menor suma de cuadrados del error y menor índice de akaike (AIC).

3.5.4.2. Análisis de componentes principales

Se realizó un análisis de componentes principales (CP) para estudiar la relación entre las propiedades físicas del suelo medidas (profundidad, textura, Dap 10-20 cm y RP 10-20 cm), CEa 30 cm, propiedades hidrológicas del suelo estimadas por funciones de pedotransferencia (CAAD, CAAD por unidad de profundidad) y la EUNam, con el fin de evaluar las relaciones entre las propiedades físicas e hidrológicas del suelo y la EUNam. A este análisis además se agregaron los variables del cultivo determinados satelitalmente (ETc aj y temperatura de la superficie), debido a la mayor facilidad para la obtención de la información respecto a las propiedades de suelo medidas.

Además, se realizó un análisis de CP entre las propiedades químicas del suelo (pH, P Bray 1, K int, Na int, relación (Ca + Mg) / K, COS, N-NO₃- en V6), Cea 30 cm y la EUNam, con el fin de evaluar las relaciones entre las propiedades químicas del suelo y la EUNam. En ambos análisis de CP se

incluyeron elipsoides para identificar las zonas de productividad, los cuales aglomeran más del 90 % de los puntos de cada zona y manejo de labranza. A su vez, se evaluó la intersección de los elipsoides y la ubicación de los puntos que se encontraron en elipsoides correspondientes a otras zonas. En el análisis de CP de las propiedades físicas e hidrológicas del suelo, además se incluyeron elipsoides para identificar los tratamientos de labranza (D y SD).

3.5.4.3. Efectos de los tratamientos y su interacción

Con el fin de evaluar el efecto de las dosis de N sobre el rendimiento, componentes y subcomponentes del rendimiento, porcentaje de N foliar, EUNam y CP1 de las propiedades físicas e hidrológicas del suelo, se ajustaron modelos lineales mixtos (MLM). Se utilizó la estrategia de selección de modelos propuesta por Di Renzo et al.⁽³⁷⁾ para experimentos a escala de campo para determinar el mejor modelo. Los modelos mixtos permiten analizar la información en ausencia de los supuestos de homocedasticidad e independencia entre mediciones⁽³⁷⁾.

Por la naturaleza de la variable dosis de N, esta se declaró como efecto fijo en todos los MLM, al igual que la interacción con las zonas de productividad debido a la naturaleza de estas. La zona de productividad se declaró como efectos fijos (para determinar la interacción de los tratamientos con las mismas). Las parcelas, cuando fueron declaradas, se consideraron como efectos aleatorios. Se evaluó la correlación entre los errores de las parcelas, ajustando MLM con errores independientes y otros con correlación espacial, donde se probaron los modelos esférico, exponencial y gaussiano. La heterocedasticidad se evaluó probando modelos considerando homocedasticidad y otros con varianzas distintas en la interacción N por zona de productividad.

Los MLM fueron analizados en el software estadístico Infostat, tomando como criterio de selección el AIC y el índice de información bayesiano (BIC) y la relación entre los residuales y las variables de interés. Luego, para los factores que presentaron diferencias significativas se realizaron pruebas de

comparación de medias de tratamientos con test LSD de Fisher (p-valor <0,05).

3.5.4.4. Regresión entre propiedades físicas y EUNam

Se realizó un análisis de regresión lineal entre la EUNam y las propiedades físicas del suelo a través del CP1 de las propiedades físicas e hidrológicas del suelo. A su vez, dentro de este, con el fin de evaluar la interacción con los tratamientos de labranza, se creó una variable auxiliar dummy, la cual categorizó los tratamientos en SD = 1 y D = 0. El objetivo de este análisis fue determinar si el conjunto de propiedades físicas del suelo asociadas a dicho CP tuvo relación con la EUNam y si los tratamientos de labranza variaron dicha relación. La regresión se graficó en cuantiles, representados por los percentiles 10, 50 y 90 de EUNam para cada valor de CP1.

3.6. RESULTADOS

El rendimiento medio de maíz obtenido fue de 11.950 kg ha⁻¹. Los rendimientos mínimos promedios de los puntos del mapa de rendimiento por parcela presentaron una brecha del 42 %, respecto al rendimiento máximo. El rendimiento, los componentes numéricos del rendimiento y el N foliar presentaron coeficientes de variación (CV) entre parcelas de 8 a 11 % (Cuadro 3.2).

Cuadro 3.2. Estadísticas descriptivas de las propiedades del suelo y del cultivo cuantificadas.

<i>Variable</i>	<i>Media</i>	<i>CV (%)</i>	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>
Rendimiento (Mg ha ⁻¹)	11,950	11	8,400	14,200
Granos m ⁻²	4346	8	3563	5179
PMG (g)	294	10	227	361
EUNam (kg grano UN ha ⁻¹)	6,0	145	-10	34,4
Plantas ha ⁻¹	94396	10	78947	115789
Biomasa (Mg MS ha ⁻¹)	8,983	18	6,181	13,733
Porcentaje de N foliar	2,65	9	2	3
Altura planta (m)	1,85	5	1,6	2
Índice de cosecha	0,58	6	0,47	0,64
N-NO ₃ - (µg N/g) - V6	20	26,5	10,7	35,5
pH	5,73	1,88	5,48	5,94
P Bray I (ppm)	24	26	15	40
K int (meq/100g)	0,4	14,9	0,29	0,56
Na-int (meq/100g)	0,78	23	0,4	0,99
CIC pH 7(meq/100g)	17	8,65	14,5	21,2
Porcentaje de saturación de bases	77	2,9	73	84
(Ca + Mg) / K	30,5	17	20,8	44,1
CEa Sh(mS/m)	28,1	24,8	15,5	52,5
CEa D(mS/m)	83	18,8	40,4	111,7
CEa. Ratio (D/Sh)	3	13,7	2	5
RP (MPA) 10-20 cm	1,22	21,7	0,75	1,88
RP (MPA) 20-30 cm	1,15	17	0,88	1,63
Pendiente (%)	0,72	51	0,06	1,48
Factor LS	0,09	48,7	0,004	0,16
SPI	0,04	44	0,003	0,07
TWI	9,5	11	7,7	11,3
Dap (g/cm ³) 0-10 cm	1,12	3,87	1,04	1,2
Dap (g/cm ³) 10-20 cm	1,26	1,78	1,23	1,3
COS (gC/kg suelo) 0-10 cm	27	5,1	24,5	29,5
COS (gC/kg suelo) 10-20 cm	21,7	8,1	18,5	24,9
CAAD (mm/m)	165	3,65	152	179
Profundidad del suelo (cm)	78	11,4	62	97
CAAD (mm)	129	13,5	99	167
K sat (mm/hr)	12,8	22,9	6,2	19
Porcentaje de limo 0-20 cm	46,9	4,8	42,4	52,3
Porcentaje de arena 0-20 cm	18,8	13	14,3	25,8
Porcentaje de arcilla 0-20 cm	34,1	4,9	30,1	37,9

PMG = peso de mil granos; EUNam = eficiencia de uso del nitrógeno agronómica marginal sobre la dosis mínima (kg grano UN ha⁻¹ adicional sobre las 80 UN ha⁻¹); N = nitrógeno; COS = carbono orgánico del suelo; RP = resistencia a la penetración; CEa (mS/m) Sh =

conductividad eléctrica aparente del suelo a los 30 cm de profundidad; CEa (mS/m) Sh = conductividad eléctrica aparente del suelo a los 90 cm de profundidad; LS = factor LS de USLE/RUSLE; SPI = índice de poder de escorrentía; TWI = índice topográfico de humedad; CEa. ratio (D/Sh) = cociente D/Sh; CAAD (mm/m) = capacidad de almacenaje de agua disponible del suelo estimada por unidad de profundidad; CAAD (mm) = capacidad de almacenaje de agua disponible del suelo estimada; K sat = conductividad hidráulica en flujo saturado (mm hr⁻¹) estimada; Dap = densidad aparente del suelo.

La disponibilidad de N-NO₃⁻ en V6, P Bray 1 a la siembra y el Na-int tuvieron un alto CV (23-26 %), mientras que el K int y la relación (Ca + Mg) / K tuvieron un CV intermedio (15-17 %). El pH del suelo, CIC, porcentaje de saturación de bases, Dap, COS, CAAD (mm/m), porcentaje de limo, porcentaje de arcilla, profundidad del suelo, CAAD (mm), rendimiento y N foliar presentaron un CV bajo (inferior al 14 %), mientras que RP, CEa y Ksat tuvieron CV entre 17 y 25 % (Cuadro 3.2).

3.6.1. Respuesta sitio-específica al nitrógeno

El MLM que presentó mejor ajuste para explicar la respuesta en rendimiento, componentes de rendimiento, biomasa, N foliar y EUNam a los tratamientos de N, fue el que consideró como efectos fijos las dosis de N, zona de productividad y la interacción entre estas variables, sin efectos aleatorios declarados (a excepción de biomasa). Para el caso de N foliar y EUNam el modelo mejoró considerando correlación espacial entre mediciones, mediante un modelo exponencial.

La biomasa a cosecha y el N foliar presentaron diferencias según la dosis de N y no variaron entre sistemas de labranza ni zonas de productividad (Cuadro 3.3). La biomasa fue 15,4 % inferior con 80 UN ha⁻¹ comparado con 230 UN ha⁻¹. Si bien la biomasa no tubo diferencias entre 160 UN ha⁻¹ y 230 UN ha⁻¹ (Cuadro 3.3), la dosis de 230 UN ha⁻¹ logró mejorar la concentración de N foliar (Cuadro 3.3 y Figura 3.2A).

Cuadro 3.3. Biomasa a cosecha y porcentaje de nitrógeno foliar por tratamiento de nitrógeno

Nitrógeno	Biomasa (Mg MS ha⁻¹)		N Foliar a R1 (%)	
80 UN ha ⁻¹	7,947	b	2,47	c
160 UN ha ⁻¹	9,305	a	2,67	b
230 UN ha ⁻¹	9,476	a	2,82	a
<i>P-valor</i>	0,0017		<0,0001	
<i>DMS</i>	1,118		0,11	

DMS = diferencia mínima significativa; para cada variable, medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

La relación de frontera entre el N foliar y el rendimiento (percentil 90 de rendimiento para cada valor de N foliar) muestra que esta variable se tradujo en una limitante para el logro de los máximos rendimientos cuando fue inferior a 2,6 (Figura 3.3B).

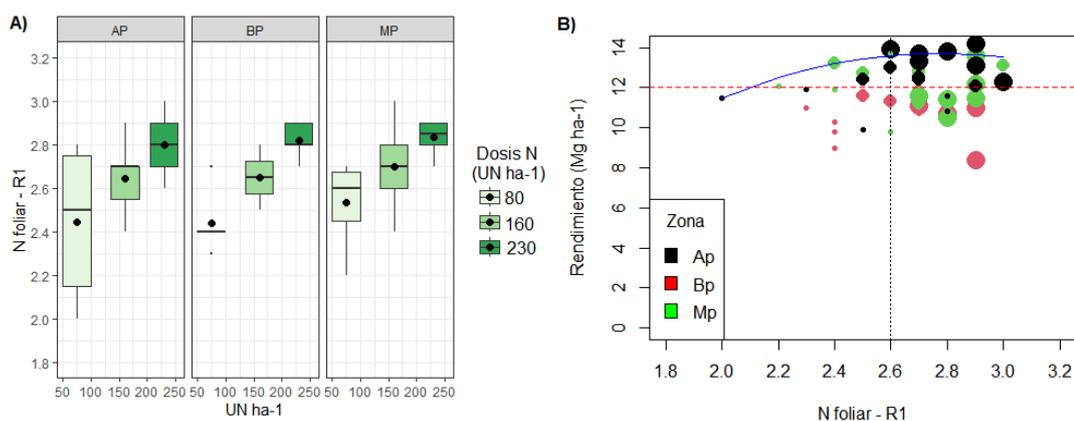


Figura 3.2. A) Boxplot de porcentaje de nitrógeno foliar en R1 y B) relación de frontera entre porcentaje de nitrógeno foliar y rendimiento de maíz.

AP = alta productividad; BP = baja productividad; MP = media productividad. El tamaño de los círculos varía según la dosis de nitrógeno aplicada, siendo más chicos con 80 UN ha⁻¹ más y grandes con 230 UN ha⁻¹; línea horizontal roja punteada indica un rendimiento de maíz de 12 ton ha⁻¹; línea vertical negra punteada indica el cambio de función de la relación de frontera entre

ambas variables; línea gris indica la relación de frontera entre ambas variables.

El rendimiento de maíz, sus componentes numéricos (granos m^{-2} y PMG) y la EUNam presentaron diferencias (p -valor $<0,05$) entre tratamientos de N y entre zonas de productividad (Cuadro 3.4). La interacción N*ZP tuvo una tendencia significativa (p -valor $<0,1$) en el rendimiento, PMG y EUNam (Cuadro 3.4).

Cuadro 3.4. Rendimiento, granos m^{-2} , peso de mil granos (g) y eficiencia de uso del nitrógeno agronómica por zona y tratamiento de nitrógeno.

Zona de Productividad	Nitrógeno	Rendimiento (Mg ha^{-1})	Granos m^{-2}	PMG (g)	EUNam (kg kg^{-1})
BP	80 UN ha^{-1}	10,130 e	4046 b	265 d	- -
	160 UN ha^{-1}	11,490 cd	4552 ab	280 abcd	13,6 a
	230 UN ha^{-1}	10,440 de	4335 b	276 bcd	1,5 bc
MP	80 UN ha^{-1}	11,930 bc	3974 b	294 abc	- -
	160 UN ha^{-1}	12,680 abc	4356 b	309 ab	8,4 ab
	230 UN ha^{-1}	11,810 bc	4380 b	300 abc	-0,7 c
AP	80 UN ha^{-1}	11,590 cd	4244 b	275 cd	- -
	160 UN ha^{-1}	12,880 ab	4537 ab	308 ab	15,3 a
	230 UN ha^{-1}	13,470 a	4666 a	325 a	12,2 a
<i>P-valor - nitrógeno</i>		0,0054	0,0024	0,0071	$<0,0001$
<i>P-valor - ZP</i>		$<0,0001$	0,0261	0,0258	0,0172
<i>P-valor - N*ZP</i>		0,0762	0,8133	0,0907	0,0696
<i>DMS - N*ZP</i>		1,130	392	32	7,3

AP = alta productividad; BP = baja productividad; MP = media productividad; PMG = peso de mil granos (g); N = nitrógeno; ZP = zona de productividad; N*ZP = interacción nitrógeno por zona de productividad; DMS = diferencia mínima significativa; EUNam = eficiencia de uso del nitrógeno agronómica marginal sobre la dosis mínima (kg grano UN ha^{-1} adicional sobre las 80 UN ha^{-1}); Para cada variable, medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p >0,05$).

El rendimiento medio de BP fue significativamente menor que en MP y AP (10687, 12140 y 12647 kg ha^{-1} , respectivamente) y hubo interacción significativa ($p = 0,07$) entre la respuesta a la fertilización nitrogenada y la zona

de productividad. Mientras que en AP y BP el rendimiento se incrementó significativamente hasta 160 UN ha⁻¹, en MP no hubo respuesta significativa. Esta respuesta diferencial entre zonas implicó cambios en la EUNam. Hasta 160 UN ha⁻¹ fue similar entre zonas (en promedio, 12,4 kg kg⁻¹), manteniéndose sin cambios significativos hasta 230 UN ha⁻¹ solamente en AP. El comportamiento diferencial de la EUNam en AP resulta de que la respuesta a N, si bien no alcanzó a ser significativa (590 kg ha⁻¹ de diferencia entre 160 y 230 UN ha⁻¹, respecto al DMS de 1130 kg ha⁻¹), se mantuvo hasta 230 UN ha⁻¹ (Cuadro 3.4 y Figura 3.3).

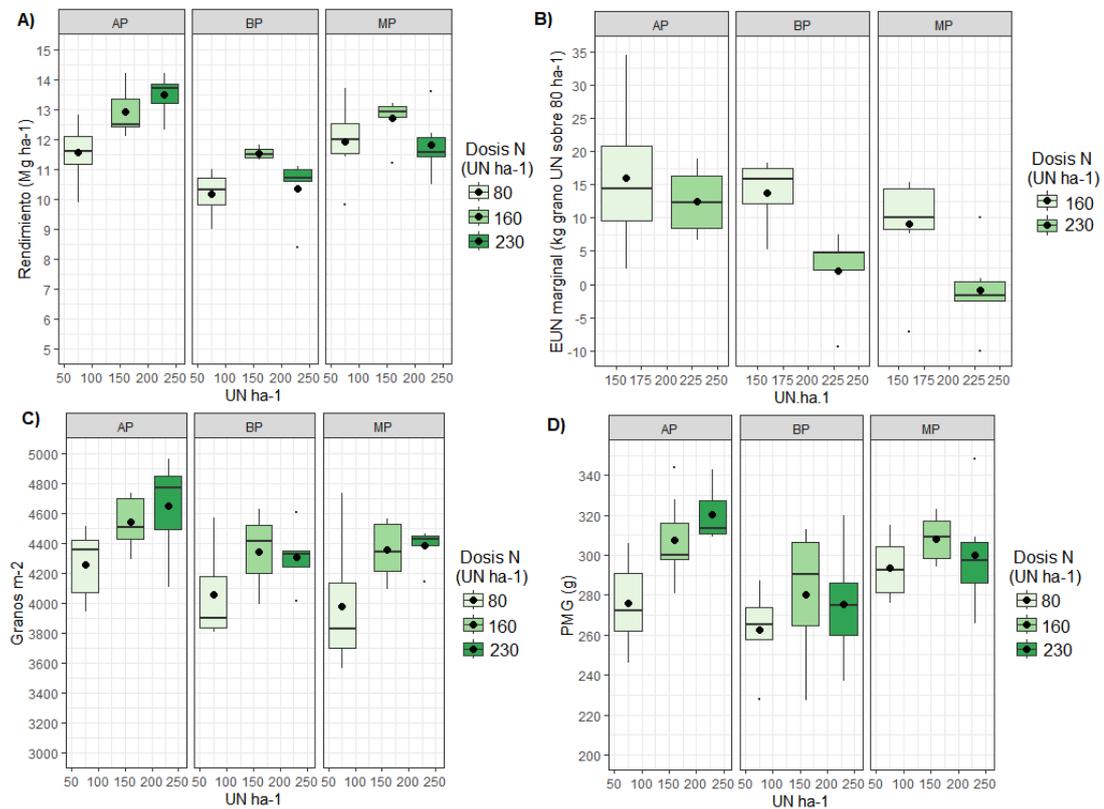


Figura 3.3. Boxplot de **A)** rendimiento, **B)** eficiencia de uso agronómica marginal del fertilizante nitrogenado sobre la dosis mínima de nitrógeno (EUNam), **C)** gramos m⁻² y **D)** peso de mil granos (PMG).

AP = alta productividad; BP = baja productividad; MP = media productividad.

3.6.1. Relación entre propiedades físicas e hídricas del suelo y eficiencia de uso de nitrógeno

En la Figura 3.4A, se muestra el biplot que resultó del análisis de CP incluyendo propiedades físicas del suelo (profundidad, textura, Dap 10-20 cm, RP 10-20 cm, CEa 30 cm, CAAD, CAAD por unidad de profundidad), las variables indicadoras del estatus hídrico del cultivo (ETc aj y temperatura de la superficie) y la EUNam. Los CP 1 y 2 explicaron en conjunto un 64 % de la varianza. El CP1 (50 % de la varianza) presentó alta correlación negativa con la Dap 10-20 cm y la temperatura de la superficie (Figuras 3.4 y 3.10). A su vez, la CAAD (mm/m) y la ETc aj tuvieron una asociación negativa con la Dap y la RP de 10-20 cm. El CP2 correlacionó positivamente con el porcentaje de MO y porcentaje de arena y negativamente con el de arcilla.

El CP1 separó sitios por alta CAAD y ETc aj durante diciembre de sitios con alta temperatura de la superficie y Dap 10-20 cm; por tanto, separó por suministro de agua al cultivo. En tanto el CP2 lo hizo por variables asociadas a la CAAD (textura y MO).

Los elipsoides de la figura 3.4A muestran que mientras el CP1 separó la zona AP de la BP, la MP tuvo propiedades similares a ambas (Figuras 3.4A y 3.5). También se muestra que ninguno de los dos CP separó SD de D (Figura 3.4B), aunque existió diferencia significativa en CP1 entre estos manejos (Cuadro 3.5).

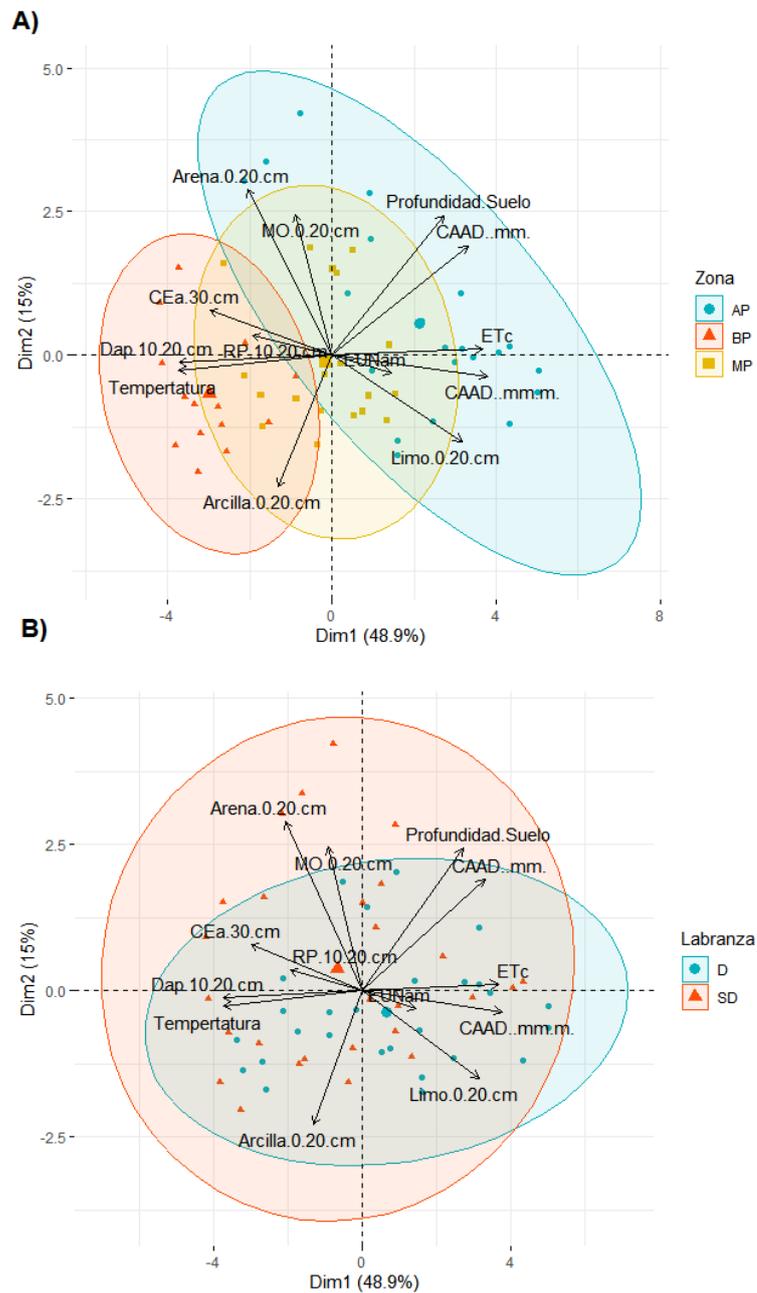


Figura 3.4. Biplot de componentes principales 1 y 2 de propiedades físicas del suelo, variables hídricas del cultivo, CEa y EUNam **A)** con elipsoides de zonas de productividad y **B)** con elipsoides de tratamientos de labranza. Dim = componente principal; Dap = densidad aparente (g/cm^3); RP = resistencia a la penetración (Mpa); ETC aj diciembre = evapotranspiración del cultivo del 1 al 25 de diciembre de 2019; CAAD (mm/m) = capacidad de almacenaje agua disponible del suelo estimada por unidad de profundidad;

CAAD (mm) = capacidad de almacenaje agua disponible del suelo; CEa = conductividad eléctrica aparente del suelo de 0-30 cm de profundidad (mS/m); MO = materia orgánica (%) 0-20 cm; EUNam = eficiencia de uso del nitrógeno agronómica marginal sobre la dosis mínima (kg grano UN ha⁻¹ adicional sobre las 80 UN ha⁻¹); AP = alta productividad; BP = baja productividad; MP = media productividad; D = con descompactador; SD = sin descompactador

Por tanto, si bien las propiedades físicas del suelo e hídricas del cultivo fueron diferentes entre las zonas de productividad, solo lograron ser modificadas en pequeña magnitud por la descompactación mecánica subsuperficial del suelo (Figura 3.5, Cuadro 3.5). El 100 % de los sitios de BP tuvieron valores negativos del CP1, siendo más negativos en SD que en D, en tanto, en AP, el CP1 tuvo valores con una tendencia a incrementarse bajo el manejo D.

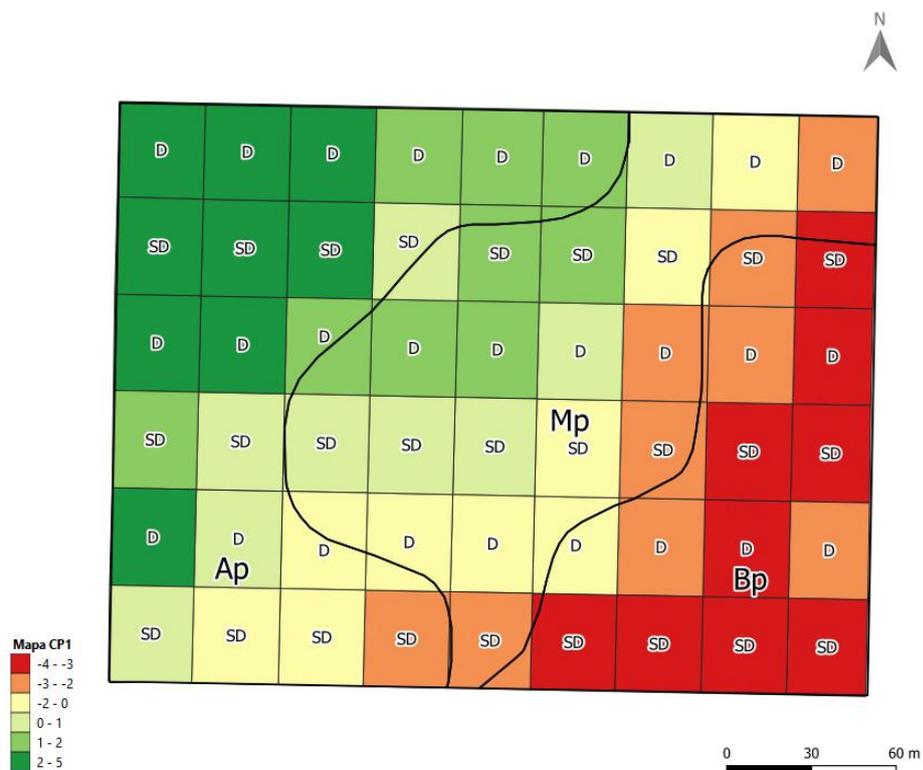


Figura 3.5. Mapa de CP1 de análisis de CP entre propiedades físicas e hidrológicas del suelo, variables hídricas del cultivo, CEa y EUNa.

D = descompactación; SD = siembra directa.

Cuadro 3.5. Comparación de medias de CP1 de análisis de CP entre propiedades físicas e hidrológicas del suelo, variables hídricas del cultivo, CEa y EUNa por zonas de productividad y por descompactador.

Zona de productividad	CP1	Descompactador	CP1
p-valor	<0,0001		0,028
AP	2,02 a	Con	0,12 a
MP	-0,08 b	Sin	-0,78 b
BP	-2,92 c		

AP = alta productividad; BP = baja productividad; MP = media productividad; para cada variable, medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

La EUNam mejoró significativamente con el CP1 (Figura 3.6), aunque la correlación entre ambas variables fue negativa y baja ($R^2 = 0,36$). Las pequeñas mejoras en el CP1 generadas por descompactación mecánica (Figura 3.4B) no fueron de magnitud y consistencia suficiente como para modificar la EUNam (Cuadro 3.5 y Figura 3.5).

Cuadro 3.6. Anova de regresión lineal entre CP1 y EUNam con descompactador como variable DUMMY.

Parámetros	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	530,2	3	176,75	2,28	0,098
CP 1	328,2	1	328,17	4,24	0,048
Dummy (sin)	59,98	1	59,98	0,77	0,385
Dummy * EUNam (sin)	62,16	1	62,16	0,8	0,377
Error	2478	32	77,43		
Total	3008	35			

CP1 = componente principal 1 del análisis de propiedades físicas, hídricas y la EUNam; EUNam = eficiencia de uso del nitrógeno agronómica marginal sobre la dosis mínima ($\text{kg grano UN ha}^{-1}$ adicional sobre las 80 UN ha^{-1} ; dummy = variable categórica dummy (valor 1 = sin descompactador).

La regresión de cuantiles entre CP1 y EUNam (Figura 3.5) muestra que si bien aumentos del CP1 se tradujeron en pequeños aumentos promedios de EUNam (pendiente = 1,2), el mayor efecto se manifestó en la reducción de la variabilidad. En el caso en que CP1 tuvo valores negativos, la EUNam fue muy variable y aumentos en CP1 se relacionaron con alta EUNam y una

disminución de su variabilidad. La relación resultó de los altos valores que tomó CP1 en la zona AP (Figura 3.6B), lo que no ocurrió en respuesta a la descompactación (Figura 3.6A).

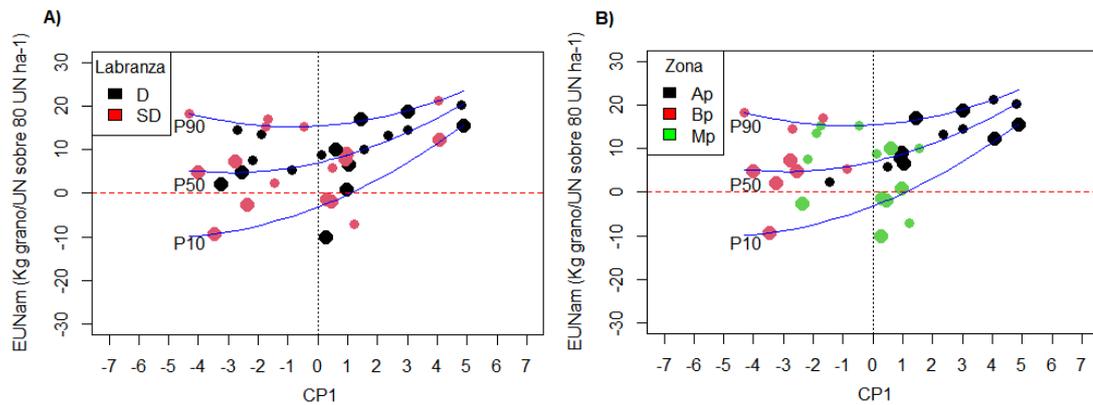


Figura 3.6. Regresión de cuantiles entre CP1 y EUNam para el efecto descompactación **(A)** y zona de productividad **(B)**.

CP1 = componente principal 1 del análisis de propiedades físicas, hídricas y la EUNam; EUNam = eficiencia de uso del nitrógeno agronómica marginal sobre la dosis mínima ($\text{kg grano UN ha}^{-1}$ adicional sobre las 80 UN ha^{-1}); AP = alta productividad; BP = baja productividad; MP = media productividad; D = con descompactador; SD = sin descompactador; P90 = percentil 90; P50 = percentil 50; P10 = percentil 10. Las líneas azules refieren a las correlaciones entre las variables para cada percentil del CP1.

3.6.1. Relación entre propiedades químicas del suelo y eficiencia de uso de nitrógeno

En la figura 3.7, se muestra el biplot del análisis de CP entre las propiedades químicas del suelo, la CEa 30 cm y la EUNam. Ambos componentes, explicaron proporciones similares de la variabilidad de las propiedades químicas, existiendo un alto grado de solapamiento entre las zonas de productividad. Por tanto, las variables integradas en el CP1 (CEa, pH, N-NO_3^- en el suelo y la EUNam) y en CP2 (K int. y la relación de bases) no discriminaron entre zonas (Figuras 3.7 y 3.13). La concentración de N-NO_3^-

fue alta en todas las zonas de productividad y con escasa variación entre las mismas (Figura 3.9 y Cuadro 3.7).

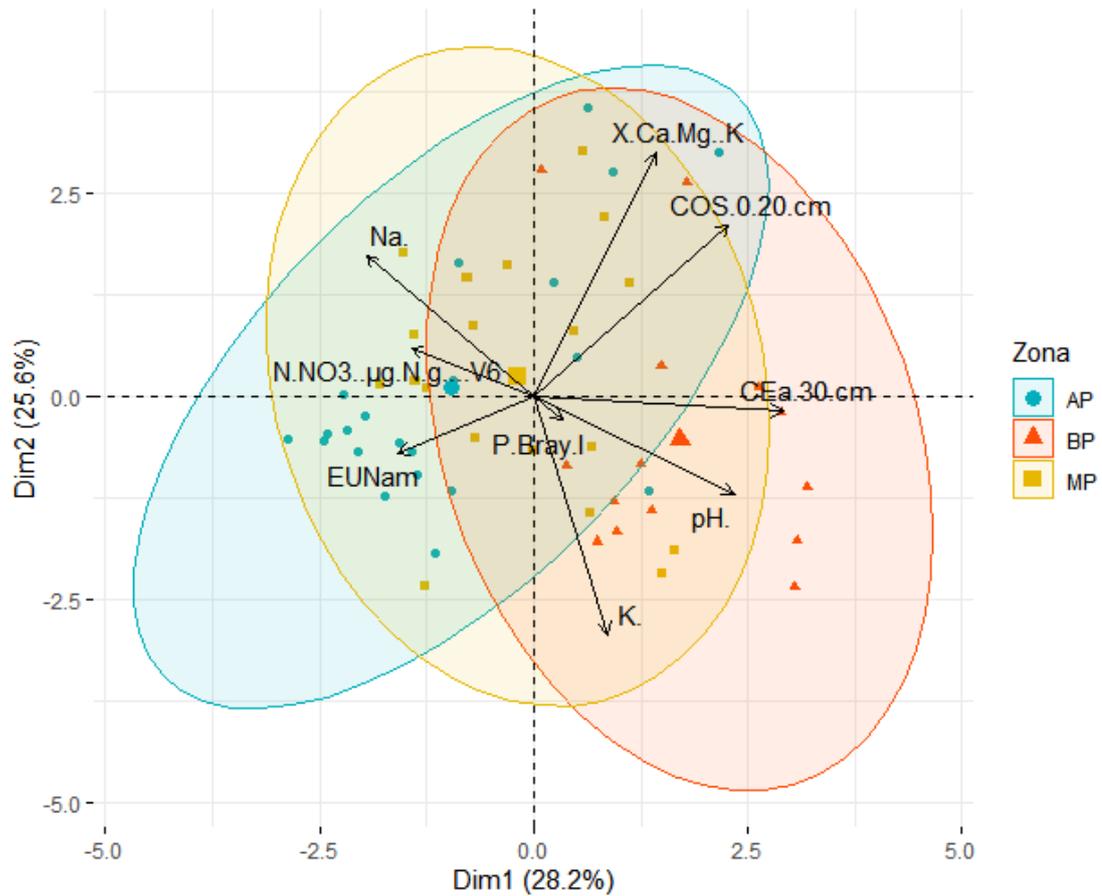


Figura 3.7. Biplot de componentes principales 1 y 2 de propiedades químicas del suelo, CEa y EUNam.

Dim = componente principal; CEa = conductividad eléctrica aparente del suelo de 0-30 cm de profundidad (mS/m); COS 0,20.cm.int = carbono orgánico del suelo de 0-20 cm (g/kg); EUNam = eficiencia de uso del nitrógeno agronómica marginal sobre la dosis mínima (kg grano UN ha⁻¹ adicional sobre las 80 UN ha⁻¹); AP = alta productividad; BP = baja productividad; MP = media productividad.

3.7. DISCUSIÓN

Los resultados confirman la hipótesis de que la respuesta de maíz a N y la EUNam difiere entre zonas de productividad contrastante. La EUNam promedio para 160 UN ha⁻¹ fue de 12,4 kg de grano por kg de N agregado, reduciendo a 4 kg de grano por kg de N para 230 UN ha⁻¹ (Cuadro 3.4). Por tanto, para un manejo homogéneo, la dosis a manejar para el sitio y disponibilidad hídrica sería de 160 UN ha⁻¹. Al considerar las zonas de productividad, 160 UN ha⁻¹ maximizó el rendimiento en AP y BP (Cuadro 3.4; 12880 y 11490 kg ha⁻¹, respectivamente), pero en la zona MP no hubo respuesta a dosis superiores a 80 UN ha⁻¹.

Los resultados presentados en la Figuras 3.3A y 3.3B sugieren una mayor respuesta al N en AP, manteniendo una alta EUNam hasta una dosis 230 UN ha⁻¹. Sin embargo, la estrategia experimental contempló solo 3 dosis de fertilización nitrogenada y el testigo no fue cero absoluto, sino la dosis 80 UN ha⁻¹. Por tanto, si bien no fue posible ajustar funciones de respuesta a la fertilización por zona que permitan discriminar esta posible respuesta diferencial y sugerir una dosis óptima, la EUNam se mantuvo entre los dos tramos de respuesta, tomando como base de cálculo 80 UN ha⁻¹. Para clarificar la existencia de esta posible interacción se requiere de experimentos que incluyan un testigo absoluto y al menos cuatro dosis de fertilización. No menor es contemplar el posible efecto de la estrategia de fertilización, tanto en momento como en fuente y forma de aplicación.

Las propiedades físicas e hidrológicas del suelo fueron determinantes de las zonas de productividad y se lograron los mejores valores de EUNam y menos variables en la zona con menos limitantes en estas propiedades (Figura 3.6A), lo cual también argumenta en favor de profundizar en la respuesta a N bajo ambientes con productividad actual diferencial. Adicionalmente, las limitantes no fueron modificadas por la descompactación subsuperficial del suelo en una magnitud suficiente como para levantar las limitantes de MP y BP (Figuras 3.4B). Por tanto, las propiedades físicas, representadas en el CP1 por la Dap 10-20 cm y la RP de 10-20 cm de

profundidad, e hidrológicas, resumidas en la CAAD (Figuras 3.4 y 3.10), no limitaron el consumo de la oferta hídrica en AP, compuesta por precipitaciones y riegos, lo que permitió mantener la EUNam.

Cabe destacar que el riego fue manejado de manera uniforme y no logró asegurar el bienestar hídrico durante todo el ciclo del cultivo (Figura 3.8). Por tanto, es posible que un manejo diferencial del riego entre zonas de productividad, disminuya las diferencias en rendimiento y EUNam.

Los resultados argumentan a favor de que un manejo zona o sitio-específico acorde a las propiedades y atributos del suelo que limitaron el rendimiento permite mejorar la EUNam. En el caso de la zona BP, las limitantes estuvieron más asociadas a la disponibilidad de agua, por lo que sería necesario evaluar el manejo del riego acorde a estas diferencias, ya que la CAAD se puede considerar como una limitante estructural del suelo con escasas posibilidades de mejora por manejo.

Las variables relacionadas con el status hídrico del cultivo determinadas de manera remota (ET_c aj y temperatura de la superficie), presentaron relación con la CAAD del suelo (Figuras 3.11 y 3.12). En este sentido, la CAAD del suelo requiere un mayor esfuerzo para su determinación respecto a ET_c aj y temperatura de la superficie, por lo que estas últimas podrían resultar una alternativa promisoría para determinar de manera remota, zonas con mayor y menor uso del agua, dentro de las unidades de manejo. No obstante, las diferencias absolutas encontradas en la ET_c aj media por zona de productividad antecedente ($A_p = 6,9$ mm, $M_p = 6,65$ mm y $B_p = 6,5$ mm), fueron menores a las que explicarían las diferencias en rendimiento obtenidas, por lo que se requiere de calibración y validación local de esta metodología.

El cambio en el estatus nutricional del cultivo a R1 (N foliar) reflejó el impacto de la fertilización, y se encontraron diferencias con aumentos sucesivos entre las tres dosis de N en todas las zonas (Cuadro 3.3). Si bien existió un valor crítico a alcanzar (2,6 %, Figura 3.2A), fue una condición necesaria para obtener rendimientos mayores a 12 Mg ha^{-1} , pero no suficiente. En particular, en BP, el rendimiento fue limitado por propiedades y atributos

del suelo de esta zona, lo que también ocurrió en menor medida en MP (Figura 3.2B). Si bien la identificación de zonas con productividad alcanzable diferencial fue útil para implementar un manejo diferencial de N, sigue existiendo variabilidad dentro de zonas (Figura 3.6), lo que justificaría avanzar en el manejo sitio-específico. Esto sería de mayor impacto bajo los ambientes BP y MP, ya que, en AP, la variabilidad en la EUNam fue menor, explicada por sus mejores propiedades y atributos del suelo.

Si bien la D_{ap} y R_p del suelo fueron propiedades físicas que establecieron limitantes al rendimiento, la descompactación subsuperficial no fue una variable de manejo efectiva para levantarlas. En ese sentido, existió una mejora significativa en estas propiedades, aunque no se tradujeron en mejoras del rendimiento ni de la EUNam (Cuadro 3.5 y Figura 3.5). Esto puede visualizarse más claramente en la figura 3.14, en la que se muestra la EUNam cuantificada para cada celda del experimento.

Por lo tanto, existe potencial para ajustar las dosis de N de acuerdo a la respuesta esperada de cada zona dentro de las unidades de manejo agrícolas. Los resultados de este experimento indican que la utilización de una dosis fija en todo el sitio experimental no sería adecuada para maximizar el rendimiento y evitar dosis superiores a las necesarias en forma conjunta para las zonas de productividad identificadas (Cuadro 3.4 y Figura 3.3). Los resultados se enmarcan dentro del esquema propuesto por Cassman⁽¹⁾, para justificar la necesidad de implementar manejos de nutrientes acordes al rendimiento alcanzable por cada zona (suelo). Se necesitan dosis de N específicas en cada sitio para optimizar el rendimiento y las ganancias y para minimizar las pérdidas de N al ambiente.

3.8. CONCLUSIONES

La dosis óptima de N que permitió lograr una mayor EUNam varió entre las distintas zonas de productividad. Las propiedades físicas, hidrológicas y químicas del suelo fueron responsables de dicha variación. En la medida en que las propiedades físicas e hidrológicas del suelo limitaron el consumo de

agua y el rendimiento del cultivo, se vio afectada la EUNam con el aumento de dosis de N.

3.9. AGRADECIMIENTOS

La información fue recopilada en el proyecto denominado *Diagnóstico de limitantes y herramientas para la mejora de la productividad de sistemas regados de cereales, oleaginosos y pasturas*, impulsado por la Agencia Nacional de Desarrollo en el marco del apoyo recibido por el instrumento Bienes Públicos Sectoriales ANDE 2017, y ejecutado por Regadores Unidos del Uruguay (RUU), por lo que se agradece especialmente a la ANDE y a los productores y empresas socios RUU.

Transparencia de los datos

Datos disponibles: Todo el conjunto de datos que respalda los resultados de este estudio se publicó en el propio artículo.

Declaración de contribución de los autores

Todos los autores contribuyeron igualmente al contenido.

3.10. BIBLIOGRAFÍA

1. Cassman KG. Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture. Proc Natl Acad Sci U S A [Internet]. 1999;96(11):5952–9. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.96.11.5952>
2. Giménez L. Rendimientos de maíz y soja: un desafío que provoca... La información experimental y la producción comercial. Cangüé:(42), 2019;7-12. Disponible en: https://r.search.yahoo.com/_ylt=AwrFQ2pNFytkEk4lZ.rrFAx.;_ylu=Y29sbwNiZjEEcG9zAzQEdnRpZAMEc2VjA3Ny/RV=2/RE=1680574413/RO=10/RU=http%3a%2f%2fwww.eemac.edu.uy%2fcangue%2fimages%2frevistas%2frevista_42%2fC42_3%2520rendimientos%2520maiz%2520soja.pdf/RK=2/RS=zTv2TAVWOvRxqomnurmgtmkhYRY-

3. Rizzo G, Monzon JP, Tenorio FA, Howard R, Cassman KG, Grassini P. Contribution of Climate and Improved Technologies to Recent Maize Yield Gains in Favorable Environments. SSSA International Annual Meeting. ASA-CSSA-SSSA, editor. 2021.
4. DIEA (Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). Encuesta Agrícola Invierno 2021. (en línea). Montevideo. 2021; 21 p. Consultado 28 oct. 2023. Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/estadisticas/diea-presenta-resultados-encuesta-agricola-invierno-2021>
5. Bakhsh A, Colvin TS, Jaynes DB, Kanwar RS, Tim US. Using soil attributes and GIS for interpretation of spatial variability in yield. American Society of Agricultural Engineers. 2000;43(4):819–28.
6. Plant RE. Site-specific management: the application of information technology to crop production. Comput Electron Agric [Internet]. 2001;30(1–3):9–29. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0168-1699\(00\)00152-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0168-1699(00)00152-6)
7. Lark RM, Wheeler HC. A method to investigate within-field variation of the response of combinable crops to an input. Agron J [Internet]. 2003;95(5):1093–104. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2003.1093>
8. Kravchenko AN, Bullock DG. Spatial variability; correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. Agronomy Journal. 2000;92(1):75–83.
9. Farid HU, Bakhsh A, Ahmad N, Ahmad A, Mahmood-Khan Z. Delineating site-specific management zones for precision agriculture. J Agric Sci [Internet]. 2016;154(2):273–86. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1017/s0021859615000143>
10. Lauzon JD, O'Halloran IP, Fallow DJ, von Bertoldi AP, Aspinall D. Spatial variability of soil test phosphorus, potassium, and pH of Ontario soils. Agron J [Internet]. 2005;97(2):524–32. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2005.0524>

11. Doran JW, Parkin TB. Defining and assessing soil quality. En: SSSA Special Publications. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy; 2015. p. 1–21.
12. Karlen DL, Mausbach MJ, Doran JW, Cline RG, Harris RF, Schuman GE. Soil Quality: A concept, definition, and framework for evaluation (A guest editorial). *Soil Sci Soc Am J* [Internet]. 1997;61(1):4–10. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x>
13. Karlen DL, Andrews SS, Doran JW. Soil quality: Current concepts and applications. En: *Advances in Agronomy*. Elsevier; 2001. p. 1–40.
14. Wander MM, Walter GL, Nissen TM, Bollero GA, Andrews SS, Cavanaugh-Grant DA. Soil quality: science and process. *Agronomy Journal*. 2002;94(1):23–32.
15. Wander MM, Bollero GA. Soil quality assessment of tillage impacts in Illinois. *Soil Sci Soc Am J* [Internet]. 1999;63(4):961–71. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1999.634961x>
16. Cassman KG, Dobermann A, Walters DT. Agroecosystems, Nitrogen-use Efficiency, and Nitrogen Management. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*. 2002;31(2):132–40.
17. Sharma L, Bali S. A review of methods to improve nitrogen use efficiency in agriculture. *Sustainability* [Internet]. 2017 [citado el 20 de noviembre de 2023];10(2):51. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/1/51>
18. Tittonell P, Zingore S, van Wijk MT, Corbeels M, Giller KE. Nutrient use efficiencies and crop responses to N, P and manure applications in Zimbabwean soils: Exploring management strategies across soil fertility gradients. *Field Crops Res* [Internet]. 2007;100(2–3):348–68. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2006.09.003>
19. Trevisan RG, Bullock DS, Martin NF. Site-Specific Treatment Responses in On-Farm Precision Experimentation. Preprints. 2019.
20. MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). Informe de la carta de

- reconocimiento de suelos de Colonia y Soriano Escala 1:200.000. 1992. Disponible en: [https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/Comunicaciones/1628 carta de reconocimiento de suelos colonia y soriano 0.pdf](https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/Comunicaciones/1628_carta_de_reconocimiento_de_suelos_colonia_y_soriano_0.pdf)
21. Ritchie SW, Hanway JJ. How a Corn Plant Develops. Iowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service. Special Report No. 48; 1982.
 22. Bray RH, Kurtz LT. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. Soil Sci [Internet]. 1945;59(1):39–46. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-194501000-00006>
 23. Jackson ML. Análisis químico de suelos. Ediciones Omega S A Barcelona. 1964;662.
 24. Beretta A, Bssahún D Teorres Deborah Musselli Raquel, García L. Acidez titulable a pH = 7 estimada a partir del pH de una mezcla suelo: buffer. Agrociencia. 2017;1:105–8.
 25. Gelderman RH, Beegle D. Recommended chemical soil testing procedures for the North Central Region. Brown JR, editor. 1998;17–20.
 26. Wright AF, Bailey JS. Organic carbon, total carbon, and total nitrogen determinations in soils of variable calcium carbonate contents using a Leco CN-2000 dry combustion analyzer. Commun Soil Sci Plant Anal [Internet]. 2001;32(19–20):3243–58. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1081/css-120001118>
 27. Cazorla CR, Masiero B. Resistencia a la penetración como indicador de compactación en ensayos de larga duración bajo siembra directa en Marcos Juárez. Díaz Roselló R, editor. Montevideo, PROCISUR; 2006.
 28. Saxton KE, Rawls WJ 2006. Estimaciones de las características del agua del suelo por textura y materia orgánica para soluciones hidrológicas. Revista de la Sociedad de Ciencia del Suelo de América. 2006;70 (5), 1569-1578.
 29. Dietrich WE, Wilson CJ, Montgomery DR, McKean J. Analysis of erosion thresholds, channel networks, and landscape morphology using a digital

- terrain model. J Geol [Internet]. 1993;101(2):259–78. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1086/648220>
30. Moore ID, Gessler PE, Nielsen GA, Peterson GA. Soil attribute prediction using terrain analysis. Soil Sci Soc Am J [Internet]. 1993;57(2):443–52. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700020026x>
 31. Campbell CR, CO. Plank. Reference sufficiency ranges, field crops: Corn. N.C. Department of Agriculture and Consumer Services. 2000. Disponible en: <http://www.ncagr.gov/agronomi>
 32. Albarenque SM, Vélez JP. Técnicas para el procesamiento de mapas de rendimiento- 1.a ed. Yuto: Ediciones INTA, 2011.
 33. Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: FAO, 2006;298(0).
 34. Irmak A, Richard, Kjaersgaard J, Huntington J, Kamble B, Trezza R, et al. Operational remote sensing of ET and challenges. En: Evapotranspiration - Remote Sensing and Modeling. InTech; 2012.
 35. Mhaweji M, Faour G. Open-source Google Earth Engine 30-m evapotranspiration rates retrieval: The SEBALIGEE system. Environ Model Softw [Internet]. 2020;133(104845):104845. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104845>
 36. Webster R, Oliver MA. Geostatistics for environmental scientists. In: Senn S, Scott M, Barnett V, editors. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons Ltd; 2007;153-194.
 37. Di Rienzo J, Balzarini M, Casanoves F, Gonzalez L, Tablada M, Robledo C. InfoStat: software estadístico. Córdoba; 2001.

3.11. ANEXOS

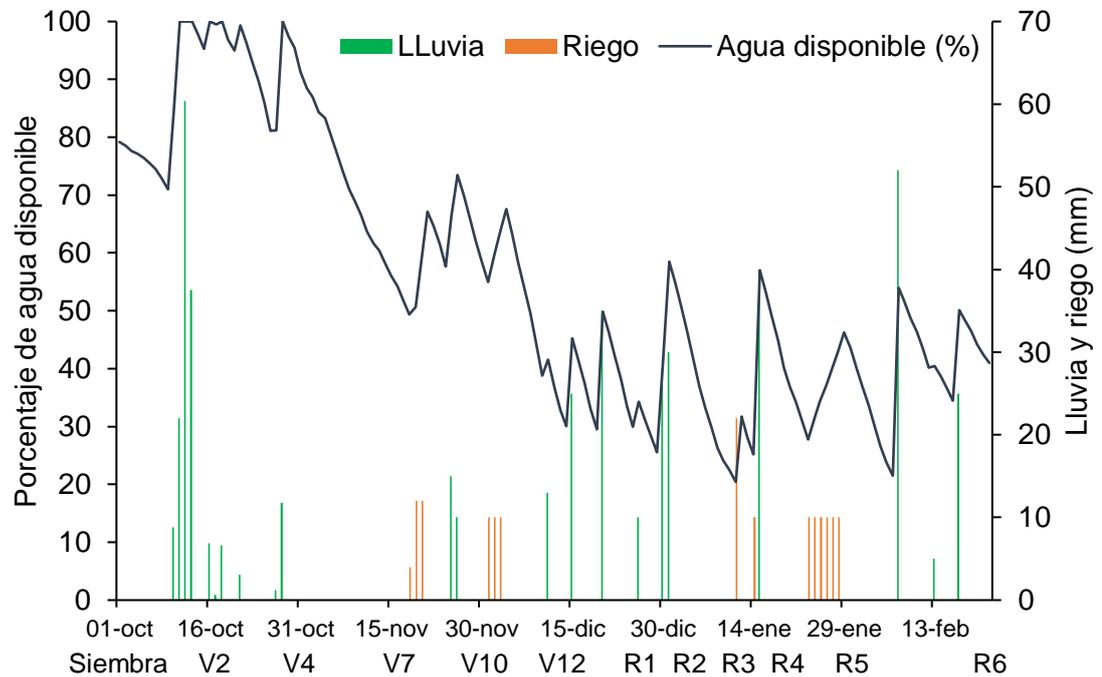


Figura 3.8. Evolución del porcentaje de agua disponible diaria de siembra a madurez fisiológica de maíz.

En el eje horizontal se referencian la fecha y la sucesión de estadios fenológicos de la escala de maíz de Ritchie y Hanway (1982).

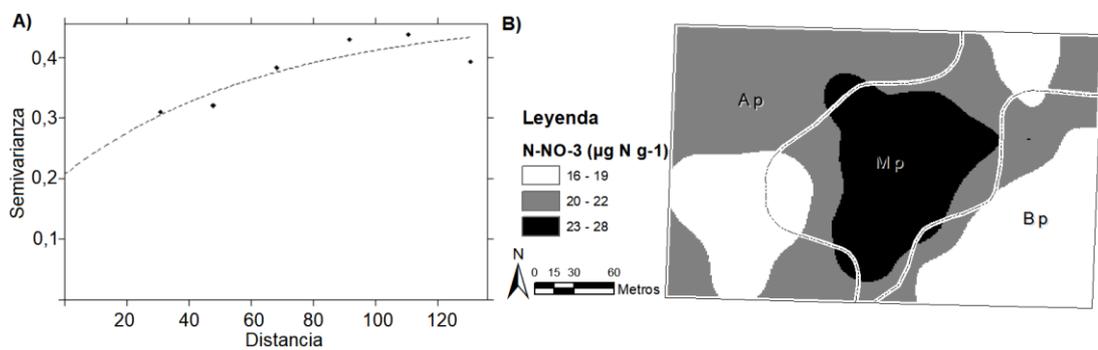


Figura 3.9. A) Semivariograma de $N-NO_3^-$ (ppm) de 0 a 20 cm y **B)** mapa interpolado de $N-NO_3^-$ (ppm) de 0 a 20 cm.

Cuadro 3.7. Nitratos del suelo (ppm) en V6 de 0-20 cm.

Zona de productividad	AP	MP	BP	P-valor	DMS
N-NO ₃ - en V6 0-20 cm (ppm)	20 ab	22 a	18 b	0,086	3,5

AP = alta productividad; BP = baja productividad; MP = media productividad; N = nitrógeno; para cada variable, medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p=0,05$).

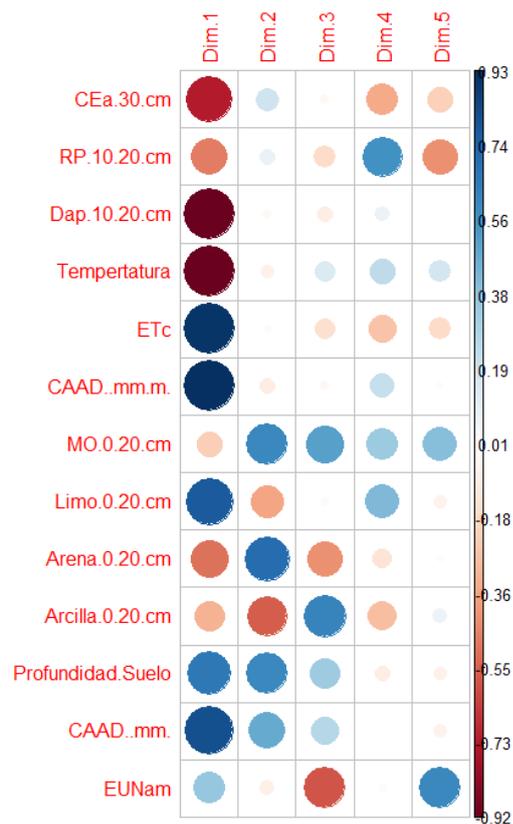


Figura 3.10. Correlación entre componentes principales (Dim) y variables originales del análisis de componentes principales.

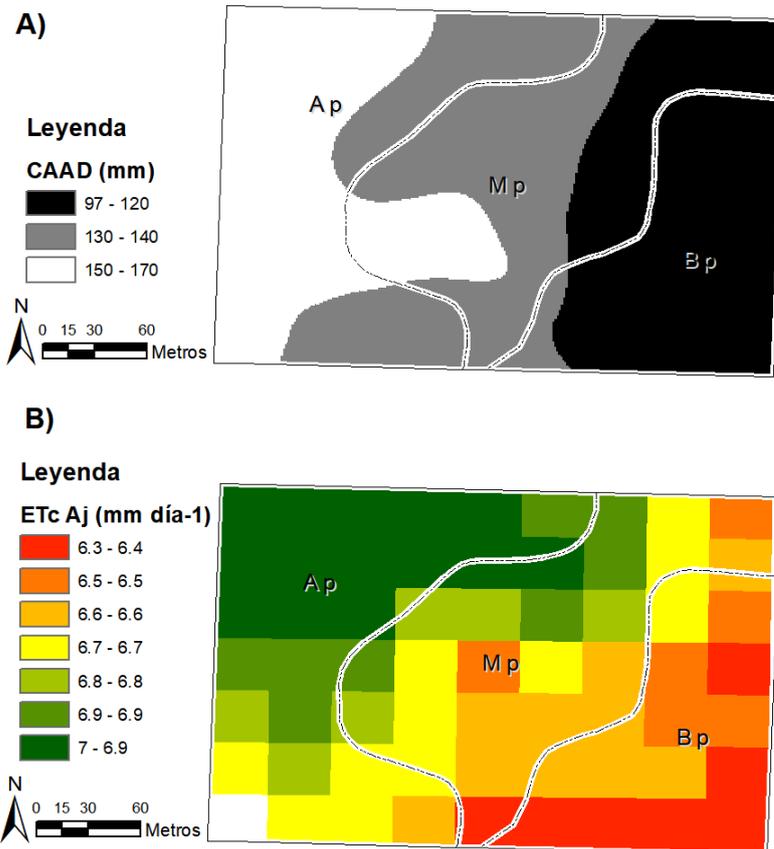


Figura 3.11. Mapas de **A)** capacidad de almacenaje de agua disponible (CAAD) en mm para la profundidad total del suelo, **B)** evapotranspiración del cultivo ajustada (ETc aj) en mm día⁻¹.

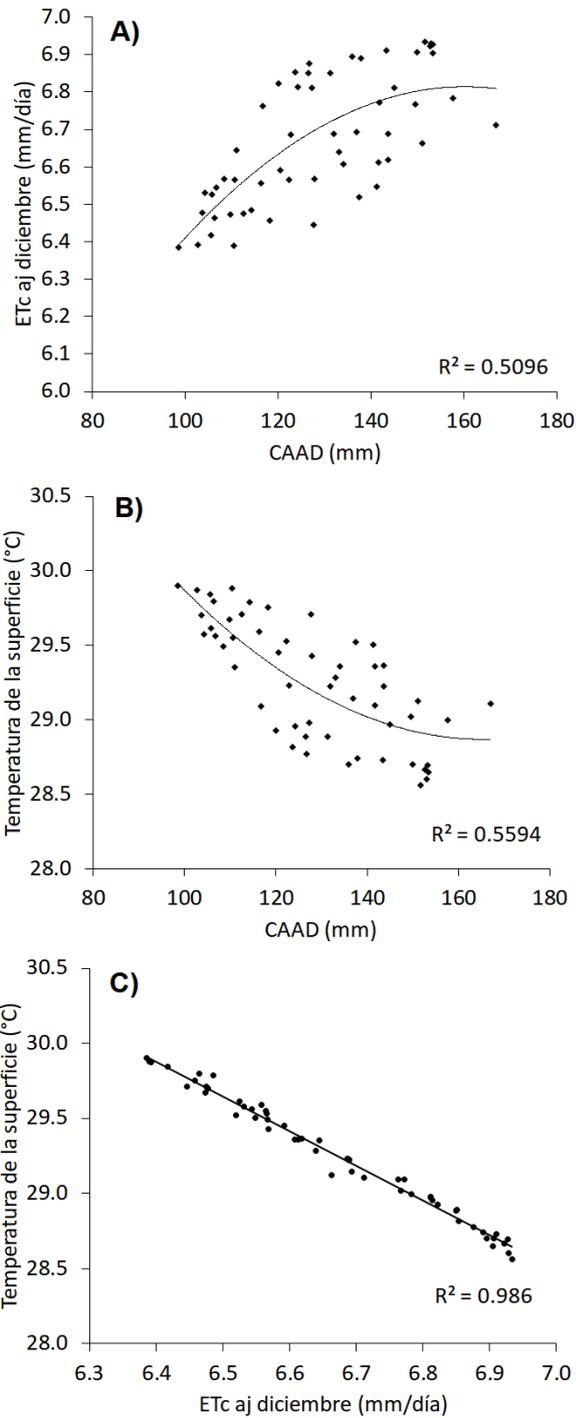


Figura 3.12. A) Relación entre ETC aj media diaria del 1 al 25 de diciembre y la capacidad de almacenaje de agua del suelo (CAAD) en mm, **B)** relación entre temperatura de la superficie (°C) y la CAAD en mm, **C)** ETC aj media diaria del 1 al 25 de diciembre y temperatura de la superficie (°C).

P-valor <0,05 en A, B y C.

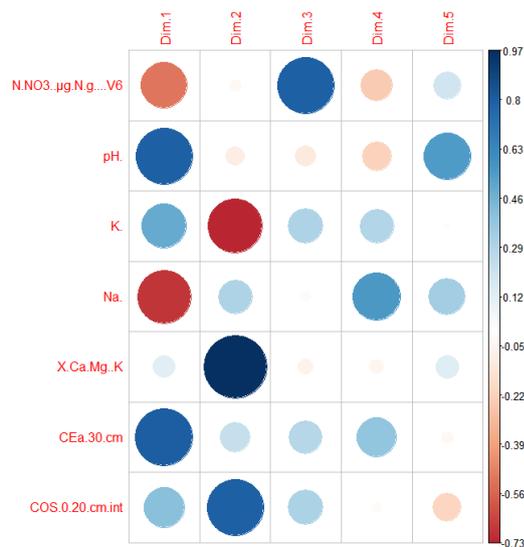


Figura 3.13. Correlación entre componentes principales (Dim) y variables originales del análisis de componentes principales.

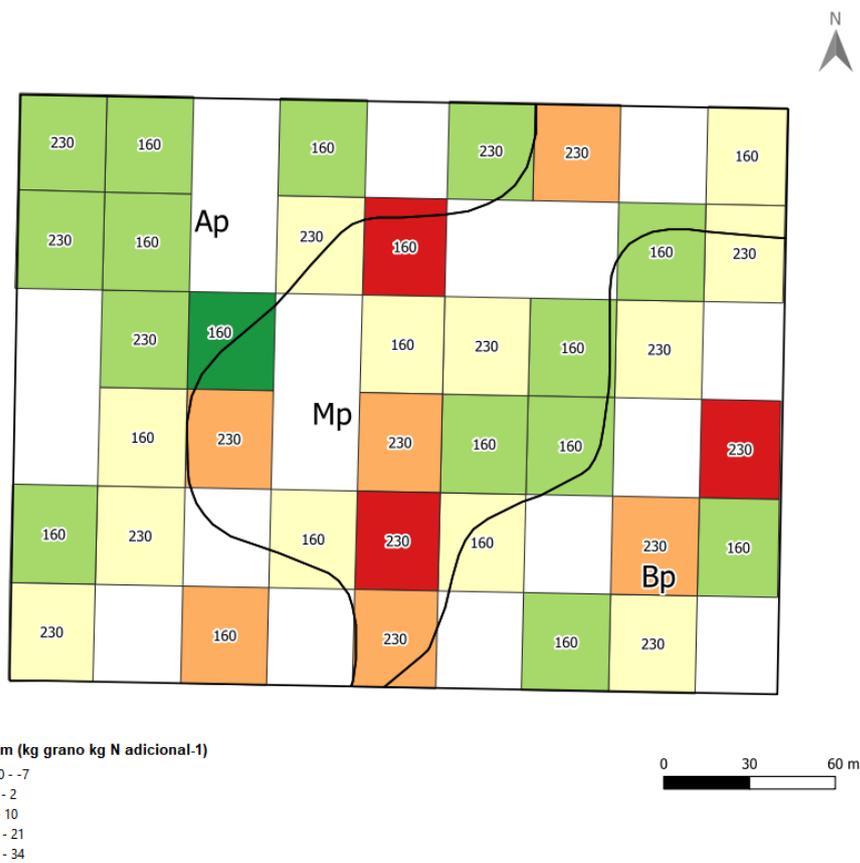


Figura 3.14. Mapa de eficiencia de uso del nitrógeno marginal (EUNam). Los números dentro de cada celda representan la dosis de N (UN ha^{-1}).

4. DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES

El trabajo tuvo como principal objetivo determinar los factores limitantes del rendimiento y de la EUN en maíz bajo riego suplementario, asociados a la variabilidad espacial de las propiedades del suelo. En el sitio, existió variabilidad espacial en propiedades físicas y químicas del suelo, las que se agruparon por la variabilidad espacial del rendimiento de cultivos previos, en tres zonas de productividad diferencial. A esta variabilidad natural se indujo variabilidad en propiedades físicas generadas por descompactación subsuperficial mecánica.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se acepta la primera hipótesis de trabajo, ya que fue posible constatar que la variabilidad en el rendimiento de maíz respondió a la variabilidad de las propiedades físicas y químicas del suelo. En forma contraria, se rechazó la segunda hipótesis de trabajo debido a que las zonas de productividad caracterizadas mediante la información antecedente no presentaron un único factor limitante en toda su extensión (Figura 2.5), lo que demuestra la existencia de variabilidad intrazonas no capturada por el análisis de rendimiento de los cultivos previos.

No obstante, los factores más limitantes para el rendimiento de maíz fueron distintos entre las zonas de productividad, tanto en su presencia-ausencia como en la proporción del área en la que se encuentran limitando el rendimiento (Figura 2.5 y Cuadro 2.3). La mayor brecha de rendimiento en la zona de menor productividad antecedente estuvo explicada principalmente por deficiencias hídricas debido a una menor CAAD y propiedades físicas (Dap) más limitantes.

Adaptando la metodología propuesta por Shatar y McBratney (2004) se logró identificar los factores limitantes del rendimiento en cada zona, su proporción relativa y las brechas de rendimiento generadas por estos. El rendimiento de maíz en BP fue limitado por la CAAD y la Dap en el 86 % del área, lo que explica brechas de rendimiento del 16 % sobre un rendimiento alcanzable de 14,2 Mg ha⁻¹; en tanto en la zona AP se identificaron otros factores limitantes, principalmente el N foliar y la relación (Ca + Mg) / K.

La CAAD presentó una relación cuadrática con las variables ET_c aj y temperatura de la superficie (Figuras 3.11 y 3.12), lo que muestra cómo la CAAD limitó el rendimiento mediante variaciones en el estatus hídrico del cultivo en las distintas zonas. En este sentido, la CAAD del suelo requiere un mayor esfuerzo para su determinación respecto a ET_c aj y temperatura de la superficie, por lo que estas últimas podrían resultar una alternativa promisoría para determinar de manera remota, zonas con mayor y menor uso del agua, dentro de las unidades de manejo. No obstante, se requiere de calibración y validación local de esta metodología ya que las diferencias absolutas encontradas en la ET_c aj media por zona de productividad antecedente ($A_p = 6,9$ mm, $M_p = 6,65$ mm y $B_p = 6,5$ mm), fueron menores a las que explicarían las diferencias en rendimiento obtenidas.

Por otro lado, los resultados confirman la hipótesis de que la respuesta de maíz a N y la EUNam difiere entre zonas de productividad contrastante. La EUNam promedio para 160 UN ha^{-1} fue de $12,4$ kg de grano por kg de N agregado y se redujo a 4 kg de grano por kg de N para 230 UN ha^{-1} (Cuadro 3.4). Por tanto, para un manejo homogéneo, la dosis a manejar para el sitio y la disponibilidad hídrica sería de 160 UN ha^{-1} . Pero al considerar las zonas de productividad, 80 UN ha^{-1} en MP permitieron el mismo rendimiento que dosis superiores, mientras que en AP y BP el rendimiento máximo fue logrado con 160 UN ha^{-1} . No obstante, en AP a pesar de no encontrar respuesta hasta 230 UN ha^{-1} , se mantuvo la EUAam con ese aumento de dosis, mientras en las demás zonas de productividad con 230 UN ha^{-1} la EUAam disminuyó significativamente. Por tanto, los resultados argumentan a favor de que un manejo zona o sitio-específico, acorde a las propiedades y atributos del suelo que limitaron el rendimiento, permite mejorar la EUNam.

En el caso de la zona BP, las limitantes estuvieron más asociadas a la disponibilidad de agua, por lo que sería necesario evaluar el manejo del riego acorde a estas diferencias, ya que la CAAD se puede considerar como una limitante estructural del suelo con escasas posibilidades de mejora por manejo. Cabe destacar que el riego fue manejado de manera uniforme y no

logró asegurar el bienestar hídrico durante todo el ciclo del cultivo (figura 3.8). Por tanto, es posible que un manejo diferencial del riego entre zonas de productividad disminuya las diferencias en productividad y EUNam entre zonas.

Si bien la Dap y la resistencia a la penetración (R_p) del suelo fueron propiedades físicas que establecieron limitantes al rendimiento, la descompactación subsuperficial no fue una variable de manejo efectiva para levantarlas. Esto se dio debido a que existió una mejora significativa en estas propiedades, aunque no se tradujeron en mejoras del rendimiento ni en la EUNam (Cuadro 3.5 y Figura 3.5).

La respuesta al N diferencial demostró el potencial para ajustar las dosis de N de acuerdo a la respuesta esperada de cada zona dentro de las unidades de manejo agrícolas. Los resultados de este experimento indican que la utilización de una dosis fija en todo el sitio experimental no sería adecuada para maximizar el rendimiento y evitar dosis superiores a las necesarias en forma conjunta para las zonas de productividad identificadas (Cuadro 3.4 y Figura 3.3). Los resultados se enmarcan dentro del esquema propuesto por Cassman (1999) para justificar la necesidad de implementar manejos de nutrientes acordes al rendimiento alcanzable por cada zona (suelo). Se necesitan dosis de N específicas en cada sitio para optimizar el rendimiento y las ganancias, y para minimizar las pérdidas de N al ambiente.

Las herramientas necesarias para realizar la dosificación variable de fertilizantes, que permita traducir los resultados del análisis de la variabilidad del rendimiento en medidas de manejo sitio-específicas de nutrientes, están disponibles en condiciones de producción. Contar con un diagnóstico de las limitantes del rendimiento y de la probabilidad de respuesta en cada zona a partir de esas limitantes, permitiría hacer un uso eficiente de los nutrientes.

Por otro lado, la evaluación del impacto de la fertilización sitio-específica de N debe contemplar los posibles efectos medioambientales. En este trabajo, se determinó la EUNam de cada dosis de N por zonas, pudiendo considerarse que aumentos de dosis con disminuciones importantes en la EUNam

producen mayores pérdidas de N al ambiente (zonas MP y BP) respecto a situaciones que mantengan una alta EUNam (AP). No obstante, sería necesario cuantificar la captura de N del fertilizante por el cultivo y las pérdidas de N al ambiente para mejorar el conocimiento de la contribución del manejo sitio-específico en la mitigación de las externalidades medioambientales.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Bakhsh, A., Colvin, T.S., Jaynes, D.B., Kanwar, R.S. y Tim, U.S. (2000). Using soil attributes and GIS for interpretation of spatial variability in yield. *American Society of Agricultural Engineers*. 43(4), 819-828.
- Bishop, T.F.A. y Lark, R.M. (2006). The geostatistical analysis of experiments at the landscape-scale. *Geoderma* 133, 87-106.
- Cassman, K. G., Dobermann, A. y Walters, D. T. (2002). Agroecosystems, Nitrogen-use Efficiency, and Nitrogen Management, *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 31(2), 132-140.
- Cassman, K. G. (1999). Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(11), 5952-5959.
- DIEA (Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). (2021). Encuesta Agrícola Invierno 2021. (en línea). Montevideo. 21 p. Consultado 28 oct. 2023. Disponible en <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/estadisticas/diea-presenta-resultados-encuesta-agricola-invierno-2021>
- Dobermann, A. (1994). Factors causing field variation of direct-seeded flooded rice. *Geoderma*, 62(1-3), 125-150.
- Douglas, J. T., y Crawford, C. E. (1993). The response of a ryegrass sward to wheel traffic and applied nitrogen. *Grass and Forage Science*, 48(2), 91-100.

- Ernst, O. R., Dogliotti, S., Cadenazzi, M. y Kemanian, A. R. (2018). Shifting crop-pasture rotations to no-till annual cropping reduces soil quality and wheat yield. *Field Crops Research*, 217, 180-187.
- Farid, H. U., Bakhsh, A., Ahmad, N., Ahmad, A. y Mahmood-Khan, Z. (2016). Delineating site-specific management zones for precision agriculture. *The Journal of Agricultural Science*, 154(2), 273-286.
- Kaspar T, Pulido D, Fenton T, Colvin T, Karlen D, Jaynes D, Meek D. 2004. Relationship of corn and soybean yield to soil and terrain properties. *Agronomy Journal*, 96(3): 700 - 709.
- Kravchenko, A.N. y Bullock, D.G. (2000). Spatial variability; correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agronomy Journal*, 92(1): 75-83.
- Lark, R. M. y Wheeler, H. C. (2003). A method to investigate within-field variation of the response of combinable crops to an input. *Agronomy Journal*, 95(5), 1093-1104.
- Lauzon, J. D., O'Halloran, I. P., Fallow, D. J., von Bertoldi, A. P. y Aspinall, D. (2005). Spatial Variability of Soil Test Phosphorus, Potassium, and Ph Of Ontario Soils. *Agronomy Journal*, 97(2): 524 - 532.
- Morón, A., Quincke, A., Molfino, J., Ibáñez, W. y García, A. (2012). Soil quality assessment of Uruguayan agricultural soils. *Agrociencia* (sitio en reparación), 16(3), 135-143.
- Panten, K., Bramley, R. G. V., Lark, R. M. y Bishop, T. F. A. (2010). Enhancing the value of field experimentation through whole-of-block designs. *Precision Agriculture*, 11(2), 198-213.
- Piepho, H. P., Richter, C., Spilke, J., Hartung, K., Kunick, A. y Thöle, H. (2011). Statistical aspects of on-farm experimentation. *Crop and Pasture Science*, 62(9), 721-735.
- Pierce, F. J. y Nowak, P. (1999). Aspects of precision agriculture. *Advances in agronomy*, 67, 1-85.

- Plant, R. E. (2001). Site-specific management: the application of information technology to crop production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 30(1-3), 9-29.
- Rizzo, G., Monzon, J. P., Tenorio, F. A., Howard, R., Cassman, K. G. y Grassini, P. (2021). Contribution of Climate and Improved Technologies to Recent Maize Yield Gains in Favorable Environments. In ASA, CSSA, SSSA International Annual Meeting. ASA-CSSA-SSSA.
- Sharma, L. K. y Bali, S. K. (2017). A review of methods to improve nitrogen use efficiency in agriculture. *Sustainability*, 10(1), 1-23.
- Shatar, T.M. y Mcbratney, A.B. (2004). Boundary-line analysis of field-scale yield response to soil properties. *Journal of Agricultural Science*. 142, 553-560.
- Solari, F., Shanahan, J., Ferguson, R., Schepers, J. y Gitelson, A. (2008). Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. *Agronomy Journal*, 100(3), 571-579.
- Terra, J., Melo, D., y Sawchik, J. (2010). Atributos edáficos y topográficos relacionados a los patrones de variación de rendimiento de cultivos agrícolas en Uruguay. 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, 7-17.
- Terra J.A., Shaw J.N., Reeves D.W., Raper R.L., van Santen E., Schwab E.B., Mask P.L. (2006). Soil Management and Landscape Variability Affects Field-Scale Cotton Productivity. *Soil Science Society of America Journal* 70: 98–107.
- Thöle, H., Richter, C. y Ehlert, D. (2013). Strategy of statistical model selection for precision farming on-farm experiments. *Precision Agriculture*, 14: 434-449.

- Trevisan, R.G.; Bullock, D.S. y Martin, N.F. (2019). Site-Specific Treatment Responses in On-Farm Precision Experimentation. Preprints 2019, 2019020007 (doi: 10.20944/preprints201902.0007.v1).
- Webb, R.A. (1972). Use of the boundary line in the analysis of biological data. *Journal of Horticultural Science* 47: 309-319.
- Whelan, B.M., y McBratney, A.B. (2000). The “null hypothesis” of precision agriculture management. *Precision Agriculture*, 2, 265-279.
- Wilding, L.P. y Drees, L.R. (1978). Spatial variability: a pedologist's view point. In: *Diversity of Soils in the Tropics*. ASA Spec. Publ. No. 34, Madison, WI, pp. 1-12.