

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

**EFFECTO DEL FERTIRRIEGO NITROGENADO EN EL RENDIMIENTO DE
MAÍZ**

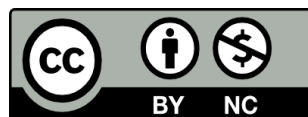
por

Ángel Michel ARBALLO BEZMERTNY
Lucas CASTRO MELO

**Trabajo final de grado
presentado como uno de los
requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo**

PAYSANDÚ
URUGUAY
2026

Este Trabajo Final de Grado se distribuye bajo licencia
“Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial**”.



PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director/a:

Ing. Agr. (Mag.) Mauricio Bustamante

Co-director/a:

Ing. Agr. (Dr.) Luis Giménez

Tribunal:

Ing. Agr. (Mag.) Mauricio Bustamante

Ing. Agr. (Mag.) Nicolás Fassana

Ing. Agr. (Mag.) Maximiliano Verocai

Fecha:

28 de mayo de 2026

Estudiante:

Ángel Michel Arballo Bezmertny

Lucas Castro Melo

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Agr. (Mag.) Mauricio Bustamante, por la tutoría, el acompañamiento permanente y la dedicación brindada durante la realización de la presente tesis, así como por su disposición, orientación y aportes fundamentales a lo largo de todo el proceso.

Al Ing. Agr. Dr. Luis Giménez, por su colaboración como cotutor, así como por sus aportes y orientación en distintas etapas del trabajo.

Al personal de EEMAC, por el apoyo brindado durante el desarrollo del trabajo experimental y por constituir un espacio clave en nuestra formación profesional.

A nuestros compañeros y amigos, por el apoyo constante, el compañerismo y por haber compartido este camino, contribuyendo a que esta etapa fuera no solo de formación profesional, sino también de crecimiento personal.

A nuestras familias, por el apoyo incondicional, la confianza y el acompañamiento permanente a lo largo de toda nuestra formación.

Muchas gracias.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	3
AGRADECIMIENTOS.....	4
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	6
RESUMEN.....	7
ABSTRACT.....	8
1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1 IMPORTANCIA DEL MAÍZ A NIVEL NACIONAL E INTERNACIONAL.....	10
2.1.1 Generalidades del riego en Uruguay y respuesta del maíz al mismo	10
2.2 CARACTERÍSTICAS DE LA ESPECIE	11
2.2.1 Ecofisiología y componentes del rendimiento	11
2.2.2 Subcomponentes del rendimiento	12
2.2.3 Etapas fenológicas del maíz	13
2.3 NITRÓGENO.....	14
2.3.1 Importancia del nitrógeno en las plantas	14
2.3.2 Mecanismos de pérdida de nitrógeno	15
2.3.3 Fraccionamiento del nitrógeno	16
2.3.4 Fertirriego	17
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
3.1 UBICACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL	20
3.2 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO	20
3.3 MEDIDAS REALIZADAS	22
3.4 HIPÓTESIS BIOLÓGICAS	23
3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	23
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
4.1 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS.....	24
4.2 ACUMULACIÓN DE MATERIA SECA.....	27
4.3 RENDIMIENTO EN GRANO Y SUS COMPONENTES	30
4.4 VARIABILIDAD DEL RENDIMIENTO SEGÚN TRATAMIENTO	36
4.5 EFICIENCIA DE USO DEL NITRÓGENO APLICADO (EUN).....	38
4.6 SUBCOMPONENTES DEL RENDIMIENTO.....	41
5. CONCLUSIONES	44
6. BIBLIOGRAFÍA.....	46

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla	Página
<i>Tabla 1 Fechas de las etapas fenológicas más relevantes</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 2 Tratamientos evaluados según nivel de nitrógeno (N), momento de aplicación y riego.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 3 Acumulación de materia seca (MS) al inicio, fin del período crítico y en cosecha</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 4 Rendimiento de grano y componentes según dosis de N en cada régimen hídrico.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 5 Rendimiento de grano y componentes según dosis, momento de aplicación de nitrógeno y régimen hídrico.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 6 Productividad parcial del N según régimen hídrico, dosis de N y momento de aplicación.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 7 Productividad parcial marginal del nitrógeno entre dosis según régimen hídrico y aplicación.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 8 Subcomponentes del rendimiento y largo de espiga según régimen hídrico, dosis y aplicación de N</i>	<i>42</i>
Figura	Página
<i>Figura 1 Precipitaciones en EEMAC (Paysandú) verano 2024-2025 vs promedio histórico 2002-2023</i>	<i>24</i>
<i>Figura 2 Distribución de precipitaciones y riego desde emergencia hasta madurez y aplicación de nitrógeno</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3 Temperaturas promedio EEMAC (Paysandú) verano 2024-2025 vs promedio histórico 2002-2023</i>	<i>26</i>
<i>Figura 4 Radiación solar incidente en EEMAC verano 2024-2025 comparada con promedio histórico 2002-2023.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 5 Materia seca total del cultivo a cosecha según dosis de nitrógeno, aplicación y régimen hídrico.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 6 Rendimiento de grano (kg/ha) según aplicación de N, régimen hídrico y dosis</i>	<i>33</i>
<i>Figura 7 Relación entre rendimiento en grano (kg/ha) y número de granos por unidad de superficie (granos/m²)</i>	<i>34</i>
<i>Figura 8 Relación entre rendimiento (kg ha) y peso de mil granos (PMG, g).....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 9 Rendimiento en grano (kg/ha) y su variabilidad según tratamiento evaluado</i>	<i>37</i>
<i>Figura 10 Beneficio del fraccionamiento del N (UN/ha) expresado como diferencia de rendimiento en grano (Δ) (kg/ha)</i>	<i>40</i>
<i>Figura 11 Relación entre rendimiento en grano y número de granos por hilera y espiga</i>	<i>43</i>

RESUMEN

El maíz (*Zea mays*), es una especie C4 de ciclo estival, que se caracteriza por su alta eficiencia en el uso de la radiación solar y una considerable capacidad para producir biomasa. En Uruguay, este cultivo ha adquirido una relevancia creciente en los sistemas agrícolas, con incrementos del área sembrada y la progresiva incorporación de tecnologías de riego. En este sentido, el nitrógeno emerge como uno de los principales factores que inciden en la determinación del rendimiento. En los sistemas de producción bajo riego, la eficiencia de uso de esta nutriente cobra particular importancia, dadas las potenciales pérdidas por volatilización, lixiviación y desnitrificación. En efecto, el fertirriego se plantea como una estrategia para optimizar su aprovechamiento.

El presente trabajo tuvo como objetivo principal evaluar el efecto del fertirriego nitrogenado sobre el rendimiento del cultivo de maíz, considerando la dosis de nitrógeno, el momento de aplicación y el régimen hídrico. El experimento se llevó a cabo en la Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni (EEMAC), ubicada en Paysandú, durante la zafra 2024–2025. Se implementó un diseño experimental de bloques completos al azar. Se incluyeron en la evaluación tres niveles de dosis de nitrógeno (100, 150 y 200 kg N ha), dos estrategias de aplicación (en una única aplicación en V6 y fraccionada en las etapas V6+V10+V12) y dos condiciones hídricas (riego ajustado por balance hídrico y riego en exceso).

Los resultados revelaron que el rendimiento de grano estuvo principalmente determinado por la dosis de nitrógeno y las condiciones del régimen hídrico. En condiciones de riego normal, no se observaron diferencias entre dosis. No obstante, bajo un régimen de exceso hídrico, la dosis de 100 kg N ha resultó en rendimientos inferiores. El número de granos constituyó el componente de rendimiento más fuertemente correlacionado con el rendimiento. La estrategia de momento de aplicación no produjo diferencias; sin embargo, el fraccionamiento evidenció una tendencia hacia valores de rendimiento ligeramente superiores.

En síntesis, la dosis total de nitrógeno aplicada y las condiciones hídricas representaron los principales factores determinantes del rendimiento, mientras que el fraccionamiento de las aplicaciones puede considerarse una herramienta de ajuste en la producción bajo riego.

Palabras clave: maíz, nitrógeno, fertirriego, fraccionamiento, riego

ABSTRACT

Corn (*Zea mays*) is a C4 summer crop characterized by high efficiency in the use of solar radiation and a considerable capacity to produce biomass. In Uruguay, this crop has gained increasing relevance within agricultural systems, with expansions in cultivated areas and the progressive incorporation of irrigation technologies. In this context, nitrogen emerges as one of the main factors influencing yield determination. In irrigated production systems, this nutrient use efficiency becomes particularly important due to potential losses through volatilization, leaching, and denitrification. Fertigation is therefore proposed as a strategy to optimize nitrogen utilization.

The main objective of this study was to evaluate the effect of nitrogen fertigation on corn yield, considering nitrogen rate, timing of application, and water regime. The experiment was carried out at the “Dr. Mario A. Cassinoni” Experimental Station (EEMAC), located in Paysandú, during the 2024–2025 growing season. A randomized complete block design was implemented. The evaluation included three levels of nitrogen rate (100, 150, and 200 kg N ha⁻¹), two application strategies (a single application at V6 and a split application at V6+V10+V12), and two water regimes (water balance–based irrigation and excess irrigation).

The results revealed that grain yield was mainly determined by nitrogen rate and water regime. Under normal irrigation, no significant differences were observed among rate. However, under excess water conditions, the 100 kg N ha⁻¹ rate resulted in lower yields. The number of grains was the yield component most strongly correlated with productivity. Application timing did not produce difference; nevertheless, split application showed a trend toward slightly higher yields.

In summary, total nitrogen rate applied and water regime represented the main factors determining yield, while split application can be considered an adjustment tool in irrigated corn production.

Keywords: corn, nitrogen, fertigation, split application, irrigation

1. INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.), es un cereal de gran importancia a nivel mundial, originario de México y presenta una amplia variabilidad genética a lo largo de las Américas (Brambilla et al., 2022). En Uruguay, el cultivo alcanzó un hito histórico en la última zafra (2023–2024), con un récord de siembra y un rendimiento promedio nacional de 6 toneladas por hectárea, impulsado por condiciones hídricas favorables (Pizzanelli, 2024). Asimismo, la superficie sembrada ha mostrado un crecimiento sostenido desde la zafra 2017–2018, alcanzando en la actualidad aproximadamente 220.000 hectáreas (Pizzanelli, 2024).

El maíz es un cultivo altamente sensible al déficit hídrico, por lo que el área bajo riego en Uruguay ha aumentado en los últimos años. En condiciones sin limitantes hídricas, se han registrado rendimientos de hasta 15.500 kg ha⁻¹, mientras que en secano estos valores descienden a aproximadamente 7.000 kg ha⁻¹ (Giménez, 2019). En este contexto, una de las principales limitantes para alcanzar altos rendimientos, incluso bajo condiciones hídricas adecuadas, es la disponibilidad de nitrógeno (N). La fertilización nitrogenada aplicada al voleo constituye una de las prácticas tradicionales para la incorporación de N al suelo, pero presenta importantes limitaciones asociadas a la eficiencia de uso del nutriente, debido a las pérdidas que ocurren por volatilización, desnitrificación y lixiviación, así como a la inmovilización del N en formas no inmediatamente disponibles para las plantas. En particular, la aplicación superficial puede aumentar las pérdidas de N por volatilización en comparación con métodos más eficientes de colocación, reduciendo la cantidad de N efectivamente absorbida por el cultivo y traduciendo en menores rendimientos cuando la disponibilidad de N no acompaña la demanda fisiológica del cultivo (Mezbahuddin et al., 2020; Sharma et al., 2025).

Frente a estas limitantes, el fertirriego se presenta como una estrategia de manejo que integra la aplicación simultánea de agua y fertilizantes a través del sistema de riego. Esta práctica permite una distribución más uniforme de los nutrientes en el suelo y facilita su aplicación directa en la zona radicular, contribuyendo a mejorar la eficiencia en el uso del agua y de los fertilizantes, así como a reducir el riesgo de pérdidas y los impactos ambientales asociados a la fertilización convencional (Quemada & Gabriel, 2016; Sánchez, 2000). En los sistemas agrícolas, el fertirriego se ha consolidado como una herramienta de manejo clave para optimizar la utilización conjunta del agua y los nutrientes, particularmente del N. En el cultivo de maíz, esta tecnología permite ajustar la dosis y el momento de aplicación del fertilizante nitrogenado, sincronizando su disponibilidad en el suelo con la demanda fisiológica del cultivo. De este modo, el fertirriego contribuye a mejorar la eficiencia en el uso del agua y del N y a reducir el riesgo de pérdidas de N asociadas a un manejo inadecuado del riego (Ciampitti & Vyn, 2012; Quemada & Gabriel, 2016).

El objetivo general de este experimento es evaluar el efecto del fertirriego nitrogenado en el rendimiento del maíz. Como objetivos específicos, se busca evaluar el efecto de dosis crecientes de N y evaluar el efecto del fraccionamiento o no del N en el rendimiento del maíz, en dos situaciones hídricas diferentes.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 IMPORTANCIA DEL MAÍZ A NIVEL NACIONAL E INTERNACIONAL

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos más antiguos de la humanidad y constituye una especie perteneciente a la familia Poaceae, dentro de la tribu Maydeae, siendo la única especie cultivada de su género (Paliwal, 2001). Este grano es un componente esencial en la alimentación de numerosos países, especialmente en América y Asia. No es sorprendente, entonces, que se haya convertido en el grano más producido a nivel global, manteniendo una cosecha superior a los 1.000 millones de toneladas en la última década. Además, para satisfacer la elevada demanda, su comercialización ha superado los 180 millones de toneladas durante cuatro campañas consecutivas, alcanzando un récord histórico en 2023-2024.

En Uruguay, en la zafra 2024–2025 se registró un rendimiento promedio de 7,4 toneladas por hectárea, constituyendo el valor más alto a nivel nacional, con un área sembrada de 259.931 hectáreas. En este contexto, la producción total alcanzó aproximadamente 2 millones de toneladas, según datos oficiales (Oficina de Estadísticas Agropecuarias, 2025). El área de maíz bajo riego totalizó 27.257 hectáreas, lo que representa un incremento cercano al 22 % respecto a la zafra anterior. En estas condiciones, los rendimientos alcanzaron 12.902 kg por hectárea en maíz de primera y 9.398 kg por hectárea en maíz de segunda (Oficina de Estadísticas Agropecuarias, 2025).

2.1.1 Generalidades del riego en Uruguay y respuesta del maíz al mismo

En los últimos años, el área de riego en Uruguay ha aumentado en forma importante a impulso de varios factores (ej. política pública, ley de inversiones, varios años de sequía, etc.). Si bien hay un crecimiento constante a partir del año 2010, más del 40 % de los equipos fueron adquiridos después de 2021, cuando el país experimentó tres años consecutivos de sequía (García et al., 2025).

El almacenamiento de agua en épocas de excedentes, junto con la implementación de tecnologías de riego, no solo contribuye a optimizar la productividad de los sistemas agropecuarios, sino que también le otorga una mayor sostenibilidad a largo plazo (INIA Uruguay, 2024). Según Giménez (2019), la superficie potencial en Uruguay bajo riego se estima en un total aproximado de 1.760.000 has, de las cuales, actualmente solo se llevan explotadas efectivamente el 15% de estas.

La disponibilidad hídrica constituye uno de los principales factores ambientales que condicionan el crecimiento, el desarrollo y el rendimiento del cultivo de maíz, particularmente en regiones de clima templado húmedo donde la ocurrencia y distribución de las precipitaciones presentan una marcada variabilidad interanual. En los sistemas agrícolas de Uruguay, la limitada capacidad de almacenamiento de agua de los suelos y la alta demanda atmosférica durante el período estival generan frecuentes situaciones de déficit hídrico, aún en campañas con precipitaciones acumuladas cercanas a los valores históricos. En este contexto, el riego suplementario se posiciona como una herramienta clave para reducir el riesgo productivo y estabilizar los rendimientos (Giménez, 2017; Hayashi Tsumura, 2022).

La respuesta del cultivo de maíz al riego depende no solo de la cantidad total de agua aplicada, sino también del momento fenológico en que ocurre la deficiencia hídrica. En particular, la evidencia experimental obtenida en EEMAC (Paysandú) muestra que, cuando las deficiencias de agua se presentan en etapas no críticas para la determinación del rendimiento, la reducción de productividad es relativamente baja; en cambio, los déficits ocurridos en el período crítico se asocian a las mayores pérdidas de rendimiento, por su alta sensibilidad a limitaciones hídricas en esa ventana (Giménez, 2017). Los resultados reportados por Giménez (2017) indican que el período crítico es la fase del ciclo con mayor consumo de agua y, a la vez, la que genera las mayores disminuciones de rendimiento cuando se impone estrés hídrico. Esto sustenta que los déficits alrededor de floración afectan principalmente la determinación del rendimiento (asociada al establecimiento del número de granos), mientras que deficiencias hídricas fuera de esa ventana tienden a tener un efecto relativamente menor, dependiendo de su intensidad y duración (Giménez, 2017).

2.2 CARACTERÍSTICAS DE LA ESPECIE

2.2.1 Ecofisiología y componentes del rendimiento

El maíz es una gramínea C4 de ciclo estival, cuyo desarrollo se extiende entre cuatro y seis meses. Esta especie no presenta fotorrespiración detectable, lo que contribuye a su alta eficiencia en la producción de materia seca, de la cual aproximadamente la mitad se destina a órganos reproductivos. Tal rendimiento se atribuye a su elevada eficiencia fotosintética, al bajo costo energético asociado a la síntesis de biomasa, y a una arquitectura vegetal favorable para el aprovechamiento de los recursos disponibles (Andrade et al., 2023).

La formación de granos cosechables al término del ciclo del cultivo resulta de dos procesos simultáneos y complementarios: desarrollo y crecimiento. El desarrollo implica la secuencia de eventos organogénicos durante el ciclo ontogénico, mientras que el crecimiento se refiere al aumento en el número y tamaño celular de los órganos diferenciados (Otegui, 2023).

El rendimiento del cultivo de maíz puede interpretarse conceptualmente desde el enfoque fuente–destino, donde la fuente está representada por la capacidad del cultivo de producir asimilados a través de la fotosíntesis, y el destino por los órganos en crecimiento, principalmente los granos. Desequilibrios entre ambos componentes, especialmente durante el período crítico alrededor de la floración, pueden provocar aborto de flores y granos, reduciendo el número final de granos por unidad de superficie (Andrade et al., 2023; Hisse et al., 2019; Maddonni & Otegui, 1996).

El rendimiento del cultivo de maíz suele analizarse a partir de dos componentes centrales: la cantidad de granos por unidad de superficie y el peso de cada grano. Estos componentes articulan la respuesta del cultivo ante las condiciones ambientales y las prácticas de manejo agronómico, y en conjunto contribuyen a definir la productividad final del sistema. Diversos trabajos han señalado que el número de granos constituye el componente que, en mayor proporción, da cuenta de las variaciones del rendimiento, en parte por su marcada sensibilidad a las condiciones durante el período crítico del cultivo (Gigena et al., 2023; Otegui & Bonhomme, 1998).

El número de granos se establece principalmente durante el período crítico, que abarca de manera aproximada desde los estadios V12 hasta R1; en esa fase, el cultivo define cuántas estructuras reproductivas, entre las que se han iniciado, tendrán probabilidad de persistir y finalmente constituirse en granos. En este contexto, la disponibilidad de recursos como el nitrógeno y el agua a lo largo de este período se considera un factor determinante para alcanzar el máximo potencial del número final de granos. En contraste, el peso de cada grano se determina principalmente a lo largo del período de llenado y suele estar condicionado por la disponibilidad de asimilados, así como por la duración efectiva de dicha fase (NeSmith & Ritchie, 1992; Otegui & Bonhomme, 1998).

Aunque ambos componentes inciden en el rendimiento final, el peso de los granos suele exhibir una variabilidad más acotada y una menor capacidad de compensación ante modificaciones del ambiente o de las prácticas de manejo. Por consiguiente, en condiciones de campo, las fluctuaciones del rendimiento tienden a estar más vinculadas con cambios en el número de granos que con variaciones en el peso individual de cada grano. Este comportamiento sugiere que el cultivo dispone de una capacidad restringida para amortiguar disminuciones en el número de granos mediante incrementos en el peso individual, lo que pone de relieve la necesidad de mantener condiciones favorables durante el período crítico (Gigena et al., 2023; Otegui & Bonhomme, 1998).

2.2.2 Subcomponentes del rendimiento

El número de granos por unidad de superficie se determina por la interacción de varios subcomponentes; entre los más relevantes se incluyen la densidad de plantas por unidad de área, el número de espigas por planta y la cantidad de granos por espiga. Estos subcomponentes se delimitan en distintas etapas del desarrollo del cultivo y exhiben respuestas diferenciadas tanto frente a las condiciones ambientales como ante el manejo agronómico. En este sentido, el número de granos por espiga se considera uno de los subcomponentes más relevantes, aunque su efecto sobre el rendimiento final depende de su interacción con los demás componentes que determinan el número total de granos por unidad de superficie (Gigena et al., 2023).

A su vez, el número de granos por espiga puede analizarse como el producto del número de hileras por espiga y del número de granos por hilera; ambos subcomponentes se determinan en fases diferenciadas del desarrollo del cultivo. El número de hileras por espiga se establece durante fases vegetativas tempranas. En cambio, el número de granos por hilera se define en las proximidades del período crítico y muestra una marcada sensibilidad frente a condiciones de estrés (Fassio et al., 1998; Otegui & Bonhomme, 1998). Por ello, las variaciones observadas en estos subcomponentes pueden interpretarse como un reflejo directo de la influencia del ambiente y de las prácticas de manejo en la configuración de los destinos reproductivos.

Por otra parte, el peso de los granos puede examinarse mediante subcomponentes asociados a la duración del proceso y a la tasa de llenado. Estos procesos están condicionados por la aptitud del cultivo para captar radiación y, durante la fase reproductiva, mantener un suministro continuo de asimilados hacia los granos.

En este marco, la oferta de nutrientes, en especial de nitrógeno y las condiciones ambientales que prevalecen durante el llenado del grano se consideran factores determinantes para la expresión del peso final de los granos (Fassio et al., 1998; NeSmith & Ritchie, 1992).

2.2.3 Etapas fenológicas del maíz

El desarrollo del cultivo de maíz suele describirse mediante una sucesión de estados fenológicos claramente delimitados, lo que permite caracterizar su crecimiento y vincularlo con los factores ambientales que condicionan el rendimiento. En términos generales, estos estados pueden organizarse en dos fases principales: una fase vegetativa y otra reproductiva. El esquema de clasificación de uso más extendido segmenta el desarrollo en fases vegetativas (V) y reproductivas (R). En este marco, los subestadios vegetativos se denominan desde V1 hasta V(n), donde (n) corresponde a la última hoja completamente expandida antes del panojamiento (VT) para el cultivar considerado (Ritchie et al., 1993).

Durante la fase vegetativa, el cultivo incrementa su área foliar y configura la arquitectura de la planta, la cual condicionará la eficiencia con que intercepta la radiación y, en consecuencia, su potencial de acumulación de biomasa. En fases tempranas del desarrollo, por ejemplo, entre V2 y V6, se establece el número potencial de hileras por espiga. En etapas posteriores, próximas a V10–V12, se definen componentes más estrechamente vinculados con el número de granos, entre ellos el número de flores por espiga (Andrade et al., 2023; Otegui & Bonhomme, 1998).

La transición a la fase reproductiva se asocia con la floración (VT–R1), etapa en la que tiene lugar la emisión de la panoja y se observa la aparición de los estigmas. Este período se considera crítico, en la medida en que durante él se determina el número final de granos por unidad de superficie, que constituye el componente principal del rendimiento en maíz. La sincronía entre la liberación de polen y la receptividad estigmática muestra una marcada sensibilidad frente a condiciones de estrés, en particular al déficit hídrico, lo cual puede traducirse en fallas de fecundación y, en consecuencia, en el aborto floral (Andrade et al., 2023; Otegui & Bonhomme, 1998).

Las fases reproductivas, designadas de R1 a R6, abarcan de manera general la emergencia de estigmas (R1), la denominada fase de ampolla (R2), el estado de grano lechoso (R3), el desarrollo del grano pastoso (R4), la etapa de grano dentado (R5) y, finalmente, la madurez fisiológica (R6). Durante estas etapas se afianzan los procesos de cuajado y de llenado del grano, que suelen ser particularmente sensibles tanto a las condiciones ambientales como a las prácticas de manejo agronómico (Ciampitti & Vyn, 2012; Ritchie et al., 1993). En particular, la fase de llenado de grano condiciona el peso final de los granos, en la medida en que depende tanto de la disponibilidad de fotoasimilados como de la duración de dicho período; ambos aspectos pueden verse modificados bajo condiciones de estrés hídrico o por limitaciones nutricionales (Cirilo & Andrade, 1994).

En el ámbito agronómico, el desarrollo fenológico del maíz depende en gran medida de la temperatura; por ello, el tiempo térmico, usualmente expresado como grados-día, se emplea de forma extendida para anticipar la ocurrencia de los distintos

estados fenológicos. Este enfoque posibilita adecuar las prácticas de manejo al desarrollo del cultivo y, con ello, elevar la eficiencia en el uso de los recursos, en particular en sistemas con riego, donde la sincronización entre la demanda de agua y los estados fenológicos suele ser un factor determinante para maximizar la productividad (Andrade et al., 2023; Ritchie et al., 1993).

2.3 NITRÓGENO

2.3.1 Importancia del nitrógeno en las plantas

El nitrógeno es uno de los macronutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo de los cultivos. En el suelo se encuentra principalmente en forma orgánica y, en menor proporción, en forma mineral, siendo esta última la fracción directamente disponible para la absorción por las plantas. La transformación del nitrógeno orgánico a formas minerales constituye un proceso clave para su disponibilidad en los sistemas agrícolas (Havlin et al., 2017; Weil & Brady, 2017).

El nitrógeno forma parte de las proteínas, enzimas y de la clorofila, por lo que desempeña un rol central en los procesos de síntesis proteica y fotosíntesis. Asimismo, participa activamente en la división y elongación celular, así como en el crecimiento y desarrollo del sistema radicular. La deficiencia de nitrógeno limita estos procesos metabólicos fundamentales, afectando el crecimiento vegetativo y el potencial productivo del cultivo (Epstein & Bloom, 2005; Marschner, 2012; Taiz et al., 2015).

El nitrógeno se moviliza hacia el sistema radicular principalmente por flujo de masa, asociado al movimiento del agua en el suelo. Las formas asimilables de nitrógeno por las raíces de las plantas son el nitrato (NO_3^-) y el amonio (NH_4^+). En la mayoría de los suelos agrícolas, la actividad de bacterias nitrificantes favorece el predominio del nitrato como forma principal de absorción. Sin embargo, bajo condiciones particulares del suelo, como ambientes con baja aireación o condiciones anaeróbicas, la absorción relativa de amonio puede incrementarse (Barber, 1995; Marschner, 2012; Zayed et al., 2023).

La absorción de nitrógeno por el cultivo de maíz presenta una dinámica estrechamente asociada a la acumulación de materia seca, incrementándose de manera acelerada desde estadios vegetativos avanzados hasta la floración, coincidiendo con la máxima tasa de crecimiento del cultivo (Below, 2002; Ciampitti & Vyn, 2012; Maddonni et al., 1998).

Además, la adecuada nutrición nitrogenada puede contribuir a mejorar la eficiencia en el uso del agua del cultivo, al favorecer una mayor producción de biomasa y rendimiento por unidad de agua consumida, siempre que la disponibilidad hídrica no sea limitante. Una provisión adecuada de nitrógeno promueve el desarrollo del área foliar, incrementa la capacidad fotosintética del cultivo y mejora la conductancia estomática, lo que permite una utilización más eficiente del agua disponible. Asimismo, cultivos bien nutridos presentan una mayor capacidad para sostener la actividad fisiológica bajo condiciones de estrés hídrico moderado, atenuando las reducciones en crecimiento y rendimiento. En este sentido, la interacción positiva entre nitrógeno y agua resulta clave para optimizar la productividad del maíz en sistemas donde ambos

recursos pueden constituir factores limitantes (Medrano Gil et al., 2007; Pedrol et al., 2008).

Una buena disponibilidad de N posibilita al cultivo alcanzar y mantener una buena cobertura total y una alta eficiencia de conversión de la radiación interceptada en biomasa. Para lograr altos rendimientos, no solo es necesario alcanzar altos valores de Índice de área foliar en etapas tempranas, sino que es necesario que se mantenga en ese valor alcanzando las etapas de formación y crecimiento de granos (Governatori & Uhart, 1997).

Olmedo Pico et al. (2021) encontraron que aumentos en el suministro de N provocan aumentos en el número de células del endosperma que se producen durante la fase lag del llenado de granos, generando un mayor peso potencial de granos. Mientras que durante la fase de llenado efectivo el principal efecto de la disponibilidad de N se da a través de su influencia sobre la producción de fotoasimilados, necesarios para la producción de almidón en los granos (Dreccer et al., 2003).

Además de la absorción directa desde el suelo, el cultivo presenta mecanismos internos que permiten sostener el llenado de grano, particularmente a través de la removilización de nitrógeno desde los tejidos vegetativos hacia los órganos reproductivos (Hisse et al., 2019; Zayed et al., 2023).

Durante el llenado de grano, una proporción significativa del nitrógeno acumulado en el grano proviene de la removilización desde hojas, tallos y otros tejidos vegetativos. Este proceso resulta clave para sostener el rendimiento bajo condiciones de oferta limitada de nitrógeno (Maddonni et al., 1998; Otegui, Andrade, et al., 1995).

Resultados obtenidos en condiciones locales indican que la respuesta del rendimiento del cultivo de maíz a la fertilización nitrogenada se explica principalmente a través de modificaciones en el número de granos por unidad de superficie, mientras que el peso individual de los granos presenta una menor sensibilidad al manejo del nutriente. En este sentido, una adecuada disponibilidad de nitrógeno durante el período crítico del cultivo favorece la supervivencia de estructuras reproductivas y contribuye a maximizar el número final de granos, principal determinante del rendimiento (Gigena et al., 2023).

2.3.2 Mecanismos de pérdida de nitrógeno

Dentro de las principales pérdidas de nitrógeno (N) en el sistema suelo-planta, una de las más relevantes es la volatilización, especialmente cuando se utilizan fuentes amoniacales como la urea y en sistemas de siembra directa, donde la aplicación se realiza en superficie (Keller & Mengel, 1986; Fox & Piekielek, 1993, como se cita en Barbieri et al., 2003).

En el suelo, la urea es hidrolizada a amonio (NH_4^+) por acción de la enzima ureasa. Este proceso implica el consumo de protones y genera un aumento del pH en el entorno del gránulo de fertilizante, lo que favorece la formación de amoníaco (NH_3) a partir del equilibrio $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$, promoviendo pérdidas por volatilización incluso en suelos ácidos (Barbieri et al., 2023).

La magnitud de estas pérdidas en sistemas de siembra directa está influenciada por factores ambientales, como la humedad, la temperatura y el viento; por propiedades del suelo, como el pH, la capacidad buffer, la capacidad de intercambio catiónico y el contenido de materia orgánica; y por factores del cultivo, como la cantidad y el tipo de residuos de cosecha, así como la fuente y dosis de nitrógeno aplicada (Barbieri et al., 2003, 2010; Ferguson et al., 1984; Sainz Rozas et al., 1999).

Las pérdidas por volatilización aumentan con la temperatura del suelo, particularmente en el rango de 10 a 50 °C (Hargrove, 1988), lo que explica su mayor relevancia en cultivos estivales como el maíz. En este contexto, cuando el fertilizante es aplicado al momento de la siembra o en estadios como V6, pueden producirse pérdidas variables de N en función de la dinámica térmica del suelo (Barbieri et al., 2023). Estas pérdidas pueden alcanzar valores del orden del 15 al 20 % del nitrógeno total aplicado (Hauck, 1981).

La lixiviación es otro mecanismo de pérdida de N, y consiste en el lavado del nitrato (NO_3^-) por el agua que percola en el suelo hacia zonas no exploradas por las raíces. Se da con mayor frecuencia en las estaciones de otoño-invierno, dado que en la primavera y verano el lavado es bajo debido a que es menos probable que haya excesos hídricos. Sin embargo, en momentos de precipitaciones intensas posteriores a la aplicación de fertilizante nitrogenado, este puede ocasionar el lavado de nitrato a partir del flujo preferencial del agua a través de los macroporos (Sainz Rozas et al., 2004).

En cuanto al proceso, se da con el nutriente en su forma de nitrato (NO_3^-) dado que el mismo es un ion soluble y que además presenta carga negativa, por lo tanto, no es adsorbido por los coloides del suelo y ello determina que esté sujeto a pérdidas por lavado (Echeverría & García, 2014).

Como último mecanismo de pérdida de nitrógeno se encuentra la desnitrificación, proceso mediante el cual microorganismos del suelo, bajo condiciones de baja disponibilidad de oxígeno, reducen el nitrato (NO_3^-) utilizándolo como aceptor final de electrones. Este proceso puede dar lugar a la formación de diferentes compuestos intermedios, tales como nitrito (NO_2^-), óxidos de nitrógeno (NO y N_2O), hasta la liberación final de nitrógeno molecular (N_2). La desnitrificación ocurre principalmente en suelos con escasa aireación, elevada humedad, alto contenido de materia orgánica y condiciones anaeróbicas temporarias (Firestone & Davidson, 1989; Robertson & Groffman, 2015).

2.3.3 Fraccionamiento del nitrógeno

La absorción de nitrógeno en el cultivo de maíz no es uniforme a lo largo del ciclo, sino que se concentra principalmente durante los estadios vegetativos avanzados y el inicio del período reproductivo. Una proporción mayoritaria del nitrógeno total es absorbida entre los estadios V8 y la antesis (VT), intervalo que puede extenderse por un período relativamente corto dependiendo de las condiciones de temperatura y humedad. Si bien el cultivo requiere una provisión inicial de nitrógeno para sostener el crecimiento temprano, una fracción relevante de la absorción total ocurre durante el período reproductivo, contribuyendo al llenado de grano. Este patrón refleja la elevada demanda nutricional asociada a la rápida acumulación de biomasa y a la determinación

de los componentes del rendimiento (Ciampitti & Vyn, 2012; Otegui, Nicolini, et al., 1995).

El fraccionamiento de la dosis total de nitrógeno constituye una estrategia clave para mejorar la eficiencia en el uso del nutriente. El suministro de una fracción inicial de nitrógeno permite sostener el crecimiento temprano del cultivo, mientras que aplicaciones realizadas durante los estadios V6 a V12 resultan más eficientes para acompañar el período de máxima tasa de absorción (Ciampitti & Vyn, 2012; Giménez, 2017; Mueller et al., 2017).

En este sentido, Canzani (2022) observó que la división de la dosis total de nitrógeno en diferentes momentos del ciclo permite una mayor sincronización entre la oferta del nutriente y la demanda del cultivo, reduciendo el riesgo de pérdidas tempranas y favoreciendo la acumulación de biomasa y el rendimiento. De manera complementaria, Gigena et al. (2023) reportaron que el fraccionamiento del nitrógeno incrementa la eficiencia agronómica del nutriente, particularmente en ambientes con elevada variabilidad hídrica, aun cuando las respuestas en rendimiento no siempre resultan significativas.

En conjunto, los resultados reportados por Canzani (2022) y Gigena et al. (2023), coinciden en señalar que el momento de aplicación del nitrógeno resulta determinante para maximizar su aprovechamiento por el cultivo. Aplicaciones realizadas durante estadios vegetativos avanzados, próximos al período de mayor crecimiento, permiten acompañar la demanda fisiológica del cultivo y minimizar las pérdidas asociadas a aplicaciones tempranas concentradas, especialmente bajo condiciones de riesgo hídrico.

2.3.4 Fertirriego

El fertirriego es la aplicación de fertilizantes a través del agua de riego. Se puede aplicar en casi cualquier cultivo de regadío, tanto en campo abierto como en invernaderos. El fertirriego permite un uso más eficiente tanto del agua como de los fertilizantes. Dado que en fertirriego los fertilizantes se entregan en forma disuelta, con el agua de riego, la distribución de los nutrientes en el suelo es casi la misma que la distribución del agua. De esta manera, los nutrientes se pueden aplicar directamente a la zona radicular de las plantas. Esto es particularmente cierto para los nutrientes que no se adsorben a las partículas del suelo, como los nitratos (NO_3^-) y los sulfatos (SO_4^-) (Sela, s.f.b).

Trabajos recientes muestran que el fertirriego por goteo o pivote habilita incrementos simultáneos de rendimiento, eficiencia en el uso del agua (EUA) y eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN) respecto de esquemas convencionales, al disminuir la percolación profunda y la volatilización, y al distribuir el N según la demanda de la planta (Yang et al., 2024; Yin et al., 2024).

Esta tecnología permite la aplicación precisa de agua y fertilizantes al cultivo y, cuando es correctamente diseñada y manejada, puede constituir una herramienta relevante dentro de los enfoques de agricultura de precisión (Sela, s.f.a). La interacción

entre la nutrición nitrogenada y la disponibilidad hídrica constituye uno de los fundamentos del fertirriego.

El fertirriego incrementa los rendimientos y mejora la calidad de los productos, ya que las cantidades y concentraciones de nutrientes pueden dosificarse de acuerdo con los requerimientos del cultivo y sus etapas de desarrollo; además, la aplicación de fertilizantes solubles favorece una asimilación más rápida al distribuirse directamente en la zona de raíces, algunos de ellos se absorben de forma inmediata mientras que otros requieren una transformación química, sin dañar las raíces ni compactar el suelo.

Asimismo, esta técnica permite ahorrar costos de fertilización gracias a la alta eficiencia y uniformidad del agua, lo que reduce el uso de fertilizantes, equipo, energía y personal de supervisión. También facilita las labores agrícolas al posibilitar la fertilización en condiciones en que el suelo o el cultivo impiden la entrada de maquinaria, y contribuye a disminuir la contaminación, ya que la aplicación uniforme y eficiente del agua minimiza los excedentes de riego por percolación (Sánchez, 2000).

No obstante, esta tecnología presenta algunos inconvenientes que deben considerarse en su implementación, entre ellos la necesidad de una inversión inicial que incluye la adquisición de equipos especializados y el mayor costo de los fertilizantes solubles; además, existe el riesgo de que al mezclar fertilizantes incompatibles entre sí o con el agua de riego se produzcan precipitaciones o incluso reacciones violentas que afecten la eficiencia del sistema. A esto se suma la exigencia de contar con personal calificado capaz de seleccionar, manejar y dosificar adecuadamente los fertilizantes, así como de operar el sistema de riego de manera segura y eficiente (Sánchez, 2000).

Sin embargo, es necesario extremar las precauciones en la aplicación de esta tecnología, ya que un manejo inadecuado del riego puede generar condiciones de exceso hídrico en el suelo, comprometiendo la eficiencia del nitrógeno aplicado. En suelos que presentan períodos de saturación o anegamiento se desarrollan condiciones reductoras que favorecen los procesos de desnitrificación, mientras que el movimiento gravitacional del agua en suelos arenosos o con elevada macroporosidad incrementa el riesgo de lixiviación de nitratos. Para mitigar estas pérdidas, la literatura recomienda disminuir el tamaño de las dosis unitarias, aumentar la frecuencia de aplicación y seleccionar momentos de aplicación con menor riesgo de exceso hídrico en sistemas de fertirriego (Echeverría & García, 2014; Firestone & Davidson, 1989; Quemada & Gabriel, 2016; Sainz Rozas et al., 2004).

En el extremo opuesto, el déficit hídrico reduce la absorción de N por limitaciones en el flujo masal y por menor crecimiento radicular, pero puede incrementar la EUA si el estrés se mantiene por debajo de umbrales críticos para la formación de granos. Los programas de riego deficitario controlado requieren identificar periodos de menor sensibilidad al estrés y evitarlo en etapas críticas, que en maíz se concentran alrededor de la floración y el inicio del llenado. Experimentos recientes reportan aumentos de EUA acompañados de reducciones moderadas de rendimiento, lo que resulta aceptable en escenarios de restricción de agua cuando se prioriza la estabilidad del sistema (Tolimir et al., 2024).

Desde el punto de vista operativo, el fertirriego puede implementarse mediante aplicaciones continuas o fraccionadas a lo largo del ciclo del cultivo. Las estrategias fraccionadas permiten ajustar la provisión de nutrientes a la demanda fisiológica de la planta y a las condiciones ambientales del momento, mientras que los esquemas continuos se basan en la aplicación frecuente de pequeñas dosis junto con el riego. La elección de la estrategia depende del sistema de riego, del cultivo y de los objetivos de manejo, siendo el fraccionamiento una práctica ampliamente recomendada para mejorar la eficiencia en el uso de los nutrientes (Ciganda et al., 2021; Roy et al., 2006).

Estudios realizados en sistemas bajo riego muestran que el uso del fertirriego nitrogenado permite mejorar la eficiencia de utilización del nutriente, aun cuando las respuestas en rendimiento no siempre resultan significativas. La posibilidad de fraccionar las dosis y sincronizar la aplicación de nitrógeno con la demanda del cultivo contribuye a reducir pérdidas y a aumentar la fracción de N efectivamente absorbida, lo que resulta particularmente relevante en ambientes con alta disponibilidad hídrica (Canzani, 2022; Gigena et al., 2023).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL

El experimento se realizó en la Estación Experimental “Dr. Mario A. Cassinoni” (EEMAC) de Facultad de Agronomía, perteneciente a la Universidad de la República, la misma ubicada sobre ruta 3, en el km 363, departamento de Paysandú, Uruguay, en el periodo agrícola 2024-2025. El experimento fue llevado a cabo en el campo experimental de riego, sobre un suelo de CONEAT 11.3, suelo que se clasifica como Brunosol eutrico típico (Háplicos) superficial a moderadamente profundos, correspondiente a la unidad San Manuel desarrollada sobre la Formación Fray Bentos.

3.2 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

Para el ensayo se utilizó el cultivar de maíz DK727, el cual presenta la tecnología genética DKPROTECT, con resistencia a roya y tizón, y TRECEPTA, que brinda protección contra cogollero, barrenador del tallo y orugas de la espiga. Los rendimientos de este cultivar en riego alcanzaron valores en torno a los 21.900 kg/ha en 2023 en la zona de Melilla (Instituto Nacional de Semillas, 2024). La población objetivo fue de aproximadamente 100.000 plantas ha⁻¹. La siembra se realizó el 22/10/2024, con una distancia entre hileras de 0,50 m. La emergencia del cultivo (VE) ocurrió a los ocho días posteriores a la siembra, y al día siguiente se procedió al armado del sistema de riego. Las fechas de los estados fenológicos más relevantes se detallan a continuación (Tabla 1)

Tabla 1

Fechas de las etapas fenológicas más relevantes

VE	30/10/2024
V6	12/12/2024
V8	20/12/2024
V10	27/12/2024
V12	4/1/2025
R1	15/1/2025
R6	3/3/2025

Los días 12/11/2024 y 13/11/2024 se llevó a cabo un raleo, ajustando la densidad a cinco plantas por metro lineal. Durante el mismo mes, el 21/11/2024, se realizó una aplicación de glifosato + 2,4-D para el control de malezas, principalmente verdolaga (*Portulaca oleracea*) y *Amaranthus* spp. Hacia fines de enero (24/01/2025) se comenzó a observar daño causado por loros, por lo que se tomaron medidas preventivas mediante la colocación de mallas en todas las parcelas experimentales.

El ensayo estuvo conformado por 12 tratamientos dispuestos en un diseño en bloques completamente al azar (DBCA), con tres bloques y una repetición de cada

tratamiento en cada uno de ellos. Los tratamientos se diferenciaron según el manejo de fertilización, variando la dosis aplicada, y del riego, modificando tanto la lámina de agua aplicada (mm) como el momento fenológico de aplicación. Cada bloque estuvo integrado por 12 parcelas, a las cuales se les asignó aleatoriamente un tratamiento diferente, totalizando 36 unidades experimentales (UE). Cada parcela tuvo una superficie de 18m², con dimensiones de 6 m de largo por 3 m de ancho, y considerando una distancia entre hileras de 0,5 m, cada parcela contó con un total de seis hileras.

Los tratamientos (Tabla 2) evaluaron diferentes dosis de nitrógeno aplicadas mediante fertirriego como forma alternativa al manejo convencional de fertilizante sólido. Para ello se evaluaron 3 dosis de nitrógeno, 2 estrategias de fertilización (en un solo momento, o fraccionado en 3 momentos) en dos situaciones hídricas diferentes, riego ajustado según balance hídrico y riego excesivo simulando exceso hídrico en el suelo. Las dosis utilizadas de N en los tratamientos fueron de 100, 150 y 200 UN/ha. Los momentos de aplicación según el estado fenológico fueron solamente en V6 y V6+V10+V12. En los tratamientos con dosis fraccionada, el N se aplicó en una proporción de 33% del total en cada uno de los tres estadios vegetativos.

Tabla 2

Tratamientos evaluados según nivel de nitrógeno (N), momento de aplicación y riego

Tratamiento	Nivel de Nitrógeno (UN/ha)	Momento de aplicación*	Riego
T1	100	V6	R
T2	100	V6	R+Exc
T3	100	V6+V10+V12	R
T4	100	V6+V10+V12	R+Exc
T5	150	V6	R
T6	150	V6	R+Exc
T7	150	V6+V10+V12	R
T8	150	V6+V10+V12	R+Exc
T9	200	V6	R
T10	200	V6	R+Exc
T11	200	V6+V10+V12	R
T12	200	V6+V10+V12	R+Exc

Nota. *Etapas fenológicas de fraccionamiento del N aplicado.

Una vez que el cultivo alcanzó el estadio fenológico V6, se aplicaron los tratamientos de N correspondientes a dicho estadio, lo cual se efectuó el 12/12/2024. Quince días después, cuando el cultivo se encontraba en V10, se aplicaron los tratamientos de nitrógeno previstos para este estadio (T3, T4, T7, T8, T11 y T12). Posteriormente, al alcanzarse el estadio V12, el día 04/01/2025, se procedió a la aplicación de los tratamientos de nitrógeno correspondientes a dicho momento fenológico.

El riego se realizó por goteo, utilizando como línea principal y secundarias tuberías de 32 mm de diámetro y, en las líneas terciarias, cintas con emisores. Las líneas se dispusieron a lo largo de las hileras con una separación de 0,50 m. El caudal de riego

utilizado fue de 1,49 L/h por emisor y se mantuvo constante en todo el experimento. El criterio de riego fue de proporcionar un nivel de agua disponible (AD) del suelo por encima del 60% durante el PC (15 días antes hasta 15 días después del inicio de la floración de la espiga) y por encima del 40% en el resto de las etapas del cultivo. La estrategia de suministro del agua fue según el balance hídrico de paso diario, los cuales consideraron $\Delta H = PP + R - ET_c$ siendo ΔH la variación del agua en el suelo y ET_c la evapotranspiración de cultivo. La ET_c que se calculó en base a la evapotranspiración de referencia (ET_o) de Penman–Monteithy el valor de coeficiente del cultivo (K_c) recomendado por las tablas de FAO para el cálculo de necesidades hídricas de los cultivos. Los datos de precipitaciones, temperaturas y radiación solar incidente utilizados se obtuvieron a partir de la Estación meteorológica automática de la EEMAC (Vantage Pro 2TM modelo 6510).

La diferencia entre los regímenes hídricos radicó en el manejo del riego durante el ciclo del cultivo. En el tratamiento de riego normal (R), el riego se aplicó en función del balance hídrico hasta alcanzar el 90% del AD. En el tratamiento con exceso (R+Exc), el riego se aplicó asegurando alcanzar el 100% del AD, pudiendo aplicarse hasta el doble de la lámina calculada para el riego normal; como criterio operativo, el riego se interrumpía cuando se comenzaba a observar escurrimiento lateral hacia parcelas adyacentes.

3.3 MEDIDAS REALIZADAS

3.3.1 Etapa de campo

A comienzos del periodo crítico (15 días antes de la floración femenina) y al finalizar el mismo (15 días después de la floración femenina) se muestreo la acumulación de materia seca del cultivo. Para ello, se cortó un metro lineal de plantas de cada parcela, las cuales fueron pesadas en laboratorio utilizando una balanza digital. De cada muestra se tomó una submuestra que se colocó en una estufa a 60 °C hasta alcanzar peso constante, con el fin de determinar el contenido de materia seca.

El rendimiento en grano se estimó a partir de la cosecha de nueve metros lineales de plantas correspondientes a los tres surcos centrales de cada parcela. En los metros cosechados se registró el número de plantas y el número de espigas. Posteriormente, se determinó el peso fresco (kg) de las plantas en balanza digital y se tomó una submuestra que fue llevada al laboratorio y secada en estufa a 60 °C hasta peso constante, para determinar el contenido de materia seca. De los nueve metros lineales de espigas cosechadas, se separaron dos metros lineales para la determinación en laboratorio de los componentes y subcomponentes del rendimiento.

3.3.2 Etapa de laboratorio

En el laboratorio, las espigas correspondientes a los dos metros lineales fueron deschaladas y se registraron las siguientes variables: longitud de espiga (cm), número de hileras por espiga y número de granos por hilera. Posteriormente, las espigas fueron desgranadas para determinar el peso total de granos (kg).

Asimismo, se pesaron las chalas y los marlos, los cuales se sumaron al total de materia seca. De ambos se tomaron submuestras que fueron secadas en estufa a 60 °C hasta alcanzar peso constante, con el fin de estimar el peso total de materia seca por hectárea (MS ha).

Las espigas correspondientes a los siete metros lineales restantes también fueron deschaladas y desgranadas para estimar el rendimiento en grano, registrando además el peso de chalas y marlos. Finalmente, se determinó la humedad del grano mediante un medidor de humedad, para corregir el rendimiento por humedad de cosecha de 14 % y se midió el peso de mil granos (PMG) realizando 10 pesadas de 100 granos por muestra.

3.4 HIPÓTESIS BIOLÓGICAS

A partir de lo expuesto previamente en el desarrollo de este trabajo, se plantean dos hipótesis a evaluar en el análisis de los resultados del experimento:

- 1- El mayor agregado de nitrógeno al suelo, permite una mejor respuesta del cultivo, reflejándose en mayores rendimientos en grano independientemente de la condición hídrica del cultivo.
- 2- El fraccionamiento del nitrógeno incrementa el rendimiento de grano en comparación con una aplicación única, y su efecto es mayor bajo riego en exceso que bajo riego normal.

3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para el análisis del rendimiento y de las variables asociadas se ajustó un modelo lineal acorde al diseño experimental en bloques completamente al azar, incorporando el efecto de bloque y la estructura factorial de los tratamientos. En el modelo se consideraron como efectos fijos la dosis de nitrógeno, el momento de aplicación y el régimen hídrico, así como todas las interacciones posibles entre dichos factores.

Cuando se detectaron efectos significativos, las comparaciones entre tratamientos se realizaron a través de medias ajustadas del modelo, con el fin de respetar la estructura factorial del diseño experimental.

En particular, las comparaciones se enfocaron en evaluar la respuesta a las distintas dosis de nitrógeno dentro de cada régimen hídrico, así como los efectos del fraccionamiento del nitrógeno dentro de cada combinación de régimen hídrico y dosis total aplicada.

El nivel de significancia utilizado para todos los análisis fue de $\alpha = 0,05$. Los análisis estadísticos se llevaron a cabo utilizando el software R (R Core Team), empleando funciones de modelado lineal y herramientas específicas para el cálculo de medias ajustadas y la realización de comparaciones múltiples.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

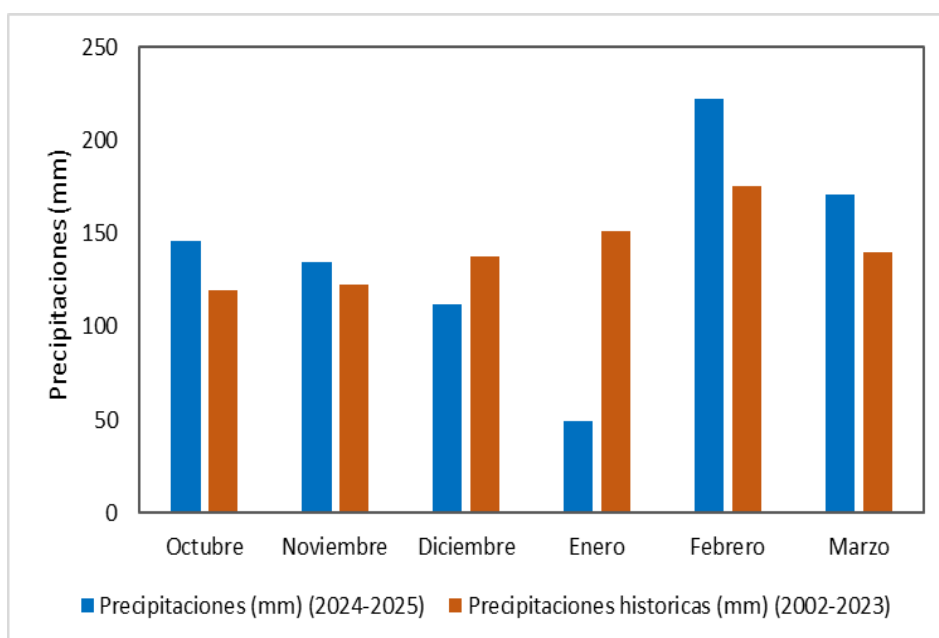
4.1 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

La caracterización climática del período experimental resulta fundamental para la interpretación de los resultados obtenidos, dado que las condiciones ambientales, en particular la disponibilidad hídrica, temperatura y radiación incidente influyen de manera directa sobre el crecimiento, desarrollo y el rendimiento del cultivo. En este sentido, la ocurrencia y distribución de las precipitaciones, así como las temperaturas y niveles de radiación registrados a lo largo del ciclo del cultivo, condicionan la expresión del rendimiento y la respuesta del cultivo a las prácticas de manejo evaluadas.

Se utilizaron registros climáticos de la estación meteorológica de la Estación Experimental Mario A. Cassinoni (EEMAC), ubicada en el departamento de Paysandú. Como referencia climática regional se empleó la serie histórica correspondiente al período 2002–2023, a partir de la cual se calcularon los promedios mensuales de precipitación acumulada, temperatura media y radiación incidente. Estos valores históricos fueron utilizados como base de comparación con las condiciones registradas durante el período experimental 2024–2025 (M. Bustamante, comunicación personal, 27 de enero, 2026).

Figura 1

Precipitaciones en EEMAC (Paysandú) verano 2024-2025 vs promedio histórico 2002-2023



Nota. Construido a partir de datos de la Estación meteorológica EEMAC (M. Bustamante, comunicación personal, 27 de enero, 2026).

Las precipitaciones durante la zafra estival 2024–2025 mostraron una marcada irregularidad en comparación con la serie histórica (2002–2023) (Figura 1). Tras un inicio con lluvias cercanas o superiores al promedio en octubre–noviembre, se observó un

descenso en diciembre y valores bajos en enero, coincidentes con el período vegetativo avanzado del cultivo (V6 el 12/12; V10 el 27/12; V12 el 04/01).

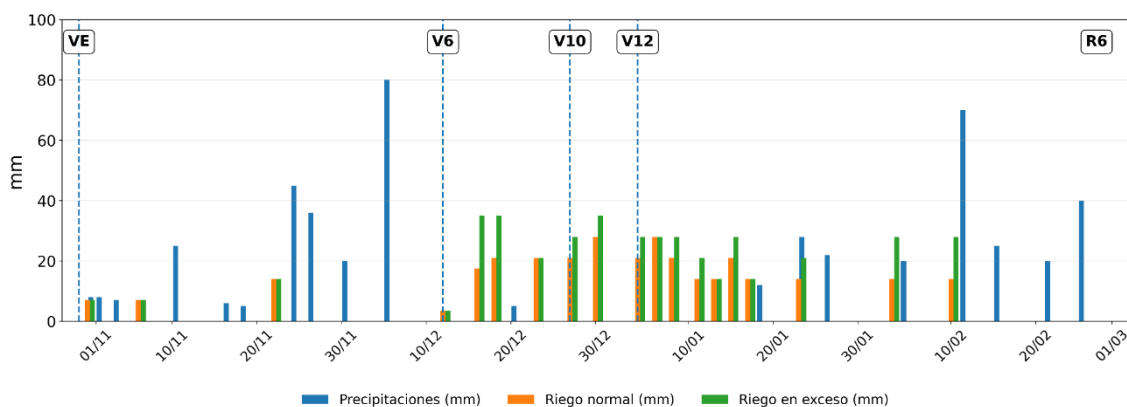
En este contexto, las bajas precipitaciones de enero coincidieron con el período crítico del cultivo, mientras que los excesos de febrero y marzo se superpusieron con la etapa de llenado de grano. Dado que el ensayo se condujo bajo riego, estas variaciones en el régimen de precipitaciones no implicaron necesariamente restricciones hídricas para el cultivo, ya que la oferta de agua fue regulada por el manejo del riego. No obstante, las precipitaciones podrían haber influido en la dinámica del N, particularmente en lo que respecta a eventuales pérdidas asociadas a procesos de lixiviación o desnitrificación.

En este sentido, cabe señalar que, durante el mes de diciembre y comienzos de enero, período en el cual se realizaron las aplicaciones de N (V6, V10 y V12), no se registraron precipitaciones de magnitud que pudieran favorecer un incremento en las pérdidas de nitrógeno. En la Figura 2 se presenta la evolución diaria de las precipitaciones y los riegos aplicados, así como los momentos correspondientes a las aplicaciones de N. Durante el ciclo del cultivo, el tratamiento bajo riego normal acumuló aproximadamente 315 mm de riego, mientras que el tratamiento con riego en exceso alcanzó valores cercanos a 424 mm, evidenciando una diferencia hídrica marcada entre ambos manejos.

Las bajas precipitaciones registradas durante diciembre y enero sugieren que las estrategias de fraccionamiento evaluadas bajo riego normal no se implementaron en condiciones que favorecieran pérdidas significativas de N durante las etapas iniciales del ciclo. En consecuencia, esto habría contribuido a mantener una adecuada disponibilidad de N para el cultivo, al tiempo que permitió sostener un nivel hídrico diferencial entre los tratamientos evaluados.

Figura 2

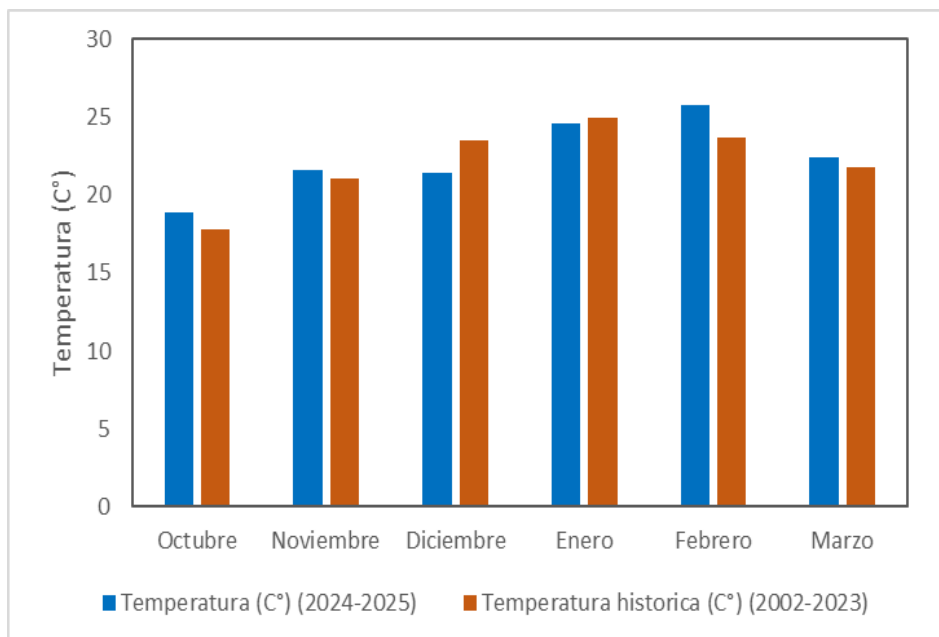
Distribución de precipitaciones y riego desde emergencia hasta madurez y aplicación de nitrógeno



Nota. Construido a partir de datos de la Estación meteorológica EEMAC (M. Bustamante, comunicación personal, 27 de enero, 2026).

Figura 3

Temperaturas promedio EEMAC (Paysandú) verano 2024-2025 vs promedio histórico 2002-2023



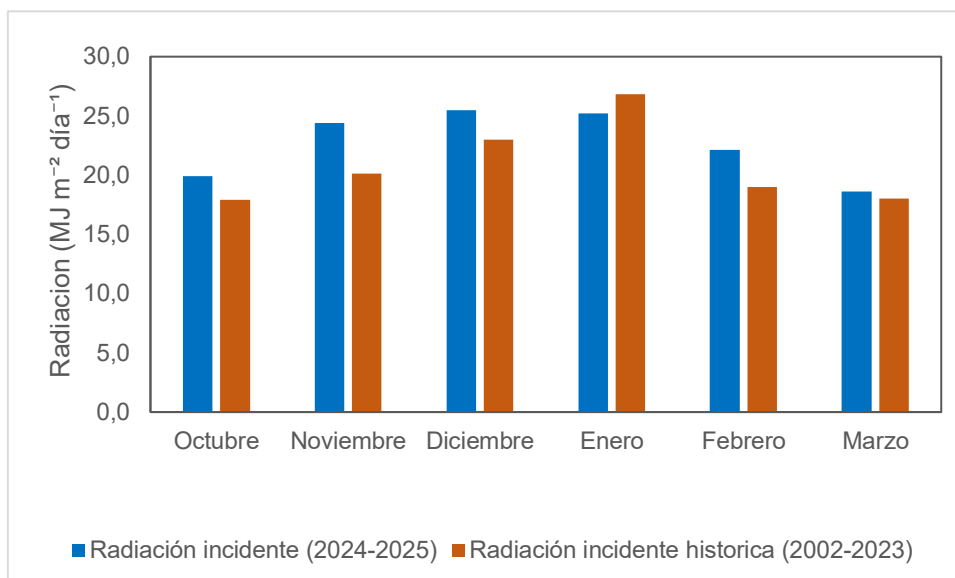
Nota. Construido a partir de datos de la Estación meteorológica EEMAC (M. Bustamante, comunicación personal, 27 de enero, 2026).

Las temperaturas de la zafra estival 2024–2025 en la EEMAC se mantuvieron cercanas a los valores medios históricos (2002–2023), con desvíos de baja magnitud (Figura 3). En octubre–noviembre se registraron temperaturas levemente superiores al promedio, favoreciendo un establecimiento inicial con alta tasa de desarrollo, mientras que diciembre presentó valores ligeramente inferiores a lo histórico, lo que pudo enlentecer moderadamente el avance vegetativo en torno a V6 (12/12).

En el período V12 (04/01)–floración (15/01) las temperaturas fueron similares a la media histórica, por lo que el cultivo transitó el período previo al período crítico bajo condiciones térmicas normales. Posteriormente, febrero y marzo mostraron temperaturas algo superiores al promedio, lo que implica mayor demanda evaporativa y aceleración del metabolismo, pudiendo tener un efecto en la duración efectiva del periodo de llenado de grano.

Figura 4

Radiación solar incidente en EEMAC verano 2024-2025 comparada con promedio histórico 2002-2023



Nota. Construido a partir de datos de la Estación meteorológica EEMAC (M. Bustamante, comunicación personal, 27 de enero, 2026).

Durante la zafra estival 2024–2025, la radiación presentó una variación mensual que se diferenció de la observada en la serie histórica 2002–2023 (Figura 4). Entre octubre y diciembre se registraron valores por encima del promedio histórico. Este comportamiento sugiere una mayor disponibilidad de energía, lo que podría sostener la fotosíntesis y el crecimiento durante la fase vegetativa. En enero, la radiación incidente se mantuvo un 8% inferior al registro histórico, en dicho mes, el cultivo se encontraba durante la fase del periodo crítico, por lo que se pudo haber afectado la tasa fotosintética del mismo, generando como consecuencia una menor producción de fotoasimilados, pudiendo afectar el rendimiento final ya que en este momento se determina el cuajado de flores y el número de granos por unidad de superficie (componente principal del rendimiento); en febrero, en cambio, volvió a observarse por encima del promedio llegando a ser un 27% superior. Hacia el final del ciclo (marzo), la radiación se ubicó claramente por debajo del promedio histórico, lo que sugiere una menor disponibilidad de energía para el cultivo durante la etapa final del llenado.

4.2 ACUMULACIÓN DE MATERIA SECA

A continuación, se presentan los resultados correspondientes a la acumulación de materia seca del cultivo, estimada en tres momentos del ciclo: al inicio del período crítico, al final del período crítico y en la cosecha. En la Tabla 3 se presentan los valores observados en función del régimen hídrico, la dosis de N y el momento de aplicación; en conjunto, estos datos facilitan el análisis de la dinámica de crecimiento del cultivo y la caracterización de su respuesta ante las distintas estrategias de manejo consideradas.

Tabla 3*Acumulación de materia seca (MS) al inicio, fin del período crítico y en cosecha*

Régimen hídrico	Dosis N (kg ha ⁻¹)	Momento de aplicación	MS inicio PC (kg ha ⁻¹)	MS final PC (kg ha ⁻¹)	MS total (kg ha ⁻¹)
R	100	V6	3467	11025	18943
R	100	V6+V10+V12	4086	11688	19658
R	150	V6	4423	11598	19170
R	150	V6+V10+V12	4396	13229	21322
R	200	V6	4101	12768	18911
R	200	V6+V10+V12	3587	12003	19782
R+Exc	100	V6	3637	10055	17135
R+Exc	100	V6+V10+V12	4122	11212	17970
R+Exc	150	V6	4537	12383	20170
R+Exc	150	V6+V10+V12	4494	12344	19698
R+Exc	200	V6	3657	12022	19316
R+Exc	200	V6+V10+V12	4241	12963	20525

Nota. No se observaron efectos estadísticamente significativos del régimen hídrico, la dosis de nitrógeno ni el momento de aplicación, y tampoco de sus interacciones ($p > 0,05$).

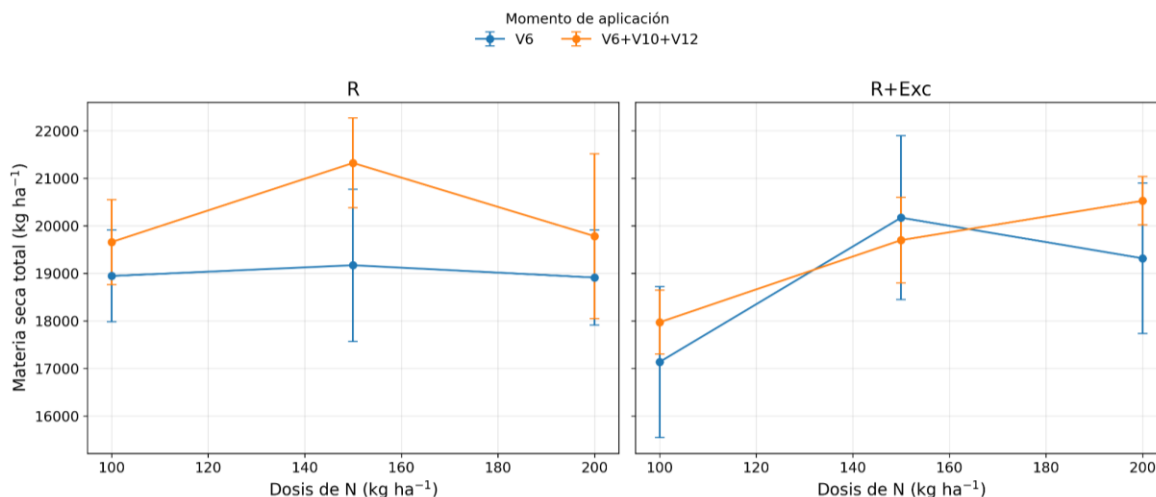
Aunque se registraron diferencias numéricas entre los tratamientos, estas no alcanzaron un nivel de significación estadística. Esto puede atribuirse, al menos en parte, a la alta variabilidad observada en la materia seca total. En este marco, los resultados muestran que el cultivo alcanzó niveles comparables de biomasa final, sin diferencias apreciables entre las estrategias de riego y de fertilización nitrogenada evaluadas.

A diferencia de los resultados obtenidos en el presente trabajo, Gigena et al. (2023) reportaron una relación positiva entre la biomasa acumulada y la dosis de N aplicada. En dicho estudio, el incremento en la disponibilidad de N se tradujo en mayores niveles de materia seca, evidenciando una respuesta del crecimiento del cultivo al nutriente.

En la figura 5 se presenta la materia seca total del cultivo al momento de la cosecha medida en kg/ha según las dosis de N (kg/ha), el momento de aplicación y los diferentes regímenes hídricos.

Figura 5

Materia seca total del cultivo a cosecha según dosis de nitrógeno, aplicación y régimen hídrico



En relación con el régimen hídrico R, cuando la fertilización se aplicó exclusivamente en V6, se advierte una tendencia a que la materia seca total se mantenga relativamente estable, con independencia de la dosis utilizada. En contraste, cuando se emplea una aplicación fraccionada, se observa un incremento numérico en la cantidad total de materia seca al pasar de una dosis de 100 kg/ha a 150 kg/ha; sin embargo, al elevar la dosis a 200 kg/ha, la tendencia registrada muestra una disminución, aunque no de manera significativa ($p > 0,05$).

En contraste, bajo régimen de R+Exc, si bien se observan tendencias de aumento de la materia seca con el incremento de la dosis de N, estas diferencias no resultaron estadísticamente significativas ($p > 0,05$). La superposición de los intervalos de error refleja la variabilidad experimental asociada a los tratamientos evaluados.

En líneas generales, el esquema de fraccionamiento de la dosis de N mostró valores mayores en comparación con el tratamiento de aplicación única, particularmente bajo condiciones de riego normal, a pesar de presentar valores mayores ninguno alcanza a ser de manera estadísticamente significativa ($p > 0,05$). Las diferencias más notables se registraron en los valores máximos dentro de este régimen hídrico, indicando que la distribución fraccionada del N podría favorecer de manera más eficiente la respuesta del cultivo cuando la disponibilidad de agua es adecuada. Los resultados obtenidos no fueron tan contundentes como los reportados por Gigena et al. (2023), quienes observaron que el aumento en la dosis de nitrógeno y la implementación de esquemas de aplicación más distribuidos en el tiempo promovieron incrementos significativos en la acumulación de materia seca, evidenciando una respuesta del crecimiento del cultivo al manejo del nutriente.

4.3 RENDIMIENTO EN GRANO Y SUS COMPONENTES

La Tabla 4 muestra el rendimiento de grano (kg/ha) y los componentes numéricos del rendimiento, número de granos por unidad de superficie y peso de mil granos (PMG), según las diferentes dosis de N aplicadas bajo cada régimen hídrico, promediando los rendimientos según dosis para cada régimen hídrico.

Tabla 4

Rendimiento de grano y componentes según dosis de N en cada régimen hídrico

Régimen hídrico	Dosis de N (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	N°granos/m ²	PMG (g)
R	100	12.302 a	4126	297
R	150	13.550 a	4351	309
R	200	13.000 a	4160	312
R+Exc	100	10.807 b	3804	284
R+Exc	150	13.713 a	4448	307
R+Exc	200	13.744 a	4421	310

Nota. Los valores corresponden a medias ajustadas del modelo. Letras distintas dentro de cada régimen hídrico indican diferencias significativas según Tukey ($\alpha = 0,05$).

El rendimiento del grano varió en función de la dosis de N y dicha respuesta dependió del régimen hídrico aplicado. Bajo riego normal (R), no se observaron diferencias entre las dosis. Aun así, numéricamente el mayor rendimiento medio se registró con 150 kg N ha⁻¹, lo que sugiere que la respuesta tiende a estabilizarse en un rango de dosis intermedio a alto.

En términos de componentes, no se detectaron diferencias para el número de granos/m⁻², ni para PMG. No obstante, el tratamiento de 100 kg N ha⁻¹ presentó un número de granos m⁻² 3,0% menor respecto al promedio de 150 y 200 kg N ha⁻¹ (4126 vs 4255 granos m⁻²) y un PMG 4% menor (297 vs 310 g).

En cambio, en la condición de riego con exceso (R+Exc), la dosis de 100 kg N ha⁻¹ presentó rendimientos inferiores frente a 150 y 200 kg N ha⁻¹ ($\alpha = 0,05$). Esto como resultado de presentar el valor más bajo de N° de granos m⁻² (3804 granos m⁻²), el cual fue 14 % menor que el promedio de los tratamientos con 150 y 200 kg N ha⁻¹ (4434 granos m⁻²). Del mismo modo, el PMG con 100 kg N ha⁻¹ (284 g) fue 8% menor que el promedio de 150 y 200 kg N ha⁻¹ (308 g). Sin embargo, al igual que en la condición hídrica R, para N° de granos m⁻² y PMG no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada régimen hídrico ($\alpha = 0,05$). Entre 150 y 200 kg N ha⁻¹ no se observaron diferencias, lo que sugiere que el rendimiento se estabiliza a partir de la dosis intermedia.

La respuesta observada en rendimiento en R+Exc (100 kg N ha^{-1} vs $150\text{--}200 \text{ kg N ha}^{-1}$) es consistente con un ambiente donde la disponibilidad efectiva de N queda más condicionada; con dosis bajas, el rendimiento se deprime, y a partir de dosis intermedias se alcanza un nivel de estabilización. Además, aunque N° granos/ m^2 y PMG no mostraron diferencias significativas dentro de cada régimen, el tratamiento R+Exc con 100 UN presentó los valores numéricamente más bajos en dichos componentes. Por lo que el efecto aditivo de ambos resulta en diferencias en cuanto al rendimiento en grano (kg/ha).

Además de presentar una posible limitante del N debido a una dosis baja del mismo, bajo condiciones con riesgo de exceso hídrico, es esperable una menor disponibilidad de N por pérdidas y/o a desfasajes entre oferta y demanda, por lo que el ajuste de dosis y el manejo del momento mediante fraccionamiento se plantean como herramientas para mejorar la eficiencia del N y reducir la exposición a pérdidas, particularmente en esquemas de riego a través de fertirriego (Canzani, 2022).

En la Tabla 5 se presentan los valores de rendimiento de grano y sus componentes numéricos obtenidos bajo diferentes combinaciones de régimen hídrico, dosis y momentos de aplicación de nitrógeno.

Tabla 5

Rendimiento de grano y componentes según dosis, momento de aplicación de nitrógeno y régimen hídrico

Régimen hídrico	Dosis N (kg ha ⁻¹)	Momento	Rendimien to (kg ha ⁻¹)	N°granos/ m2	PMG
R	100	V6	11.739	3.187 a	295 ab
R	100	V6+V10+V12	12.864	3.263 a	314 a
R	150	V6	12.589	3.472 ab	306 ab
R	150	V6+V10+V12	14.512	3.343 ab	338 a
R	200	V6	11.938	3.575 b	302 ab
R	200	V6+V10+V12	14.062	3.429 ab	331 a
R+Exc	100	V6	10.458	2.863 a	258 b
R+Exc	100	V6+V10+V12	11.157	2.980 a	302 ab
R+Exc	150	V6	13.578	3.366 ab	311 ab
R+Exc	150	V6+V10+V12	13.848	3.256 ab	337 a
R+Exc	200	V6	13.166	3.357 b	297 ab
R+Exc	200	V6+V10+V12	14.321	3.591 b	318 a

Nota. Medias ajustadas del modelo. Letras distintas dentro de cada columna indican diferencias significativas (Tukey, $\alpha = 0,05$).

El momento de aplicación del N no se asoció con diferencias estadísticamente significativas en el rendimiento de grano dentro de cada combinación de régimen hídrico y dosis ($p > 0,05$). Sin embargo, de forma consistente, el fraccionamiento (V6+V10+V12) registró numéricamente promedios de rendimiento superiores a la aplicación única en V6, especialmente en las dosis intermedia y alta (150 y 200 kg ha⁻¹). Estas diferencias son mayoritariamente más notorias bajo riego normal. En la dosis baja (100 kg ha⁻¹), el fraccionamiento no compensó la limitación por disponibilidad total de N, independientemente del régimen hídrico.

Similar a lo mencionado por Canzani (2022), este patrón evidencia que, superada la limitación por dosis de N, el momento de aplicación se convierte en un determinante central del manejo, al mejorar la sincronía entre la oferta de N y la demanda del cultivo en etapas de alta tasa de crecimiento y próximas al período crítico, en línea con lo reportado por Ciampitti y Vyn (2012), quienes destacan que la dinámica de absorción de N y su sincronización con la demanda del cultivo son factores clave

para maximizar la eficiencia de uso del nutriente y sostener altos niveles de productividad.

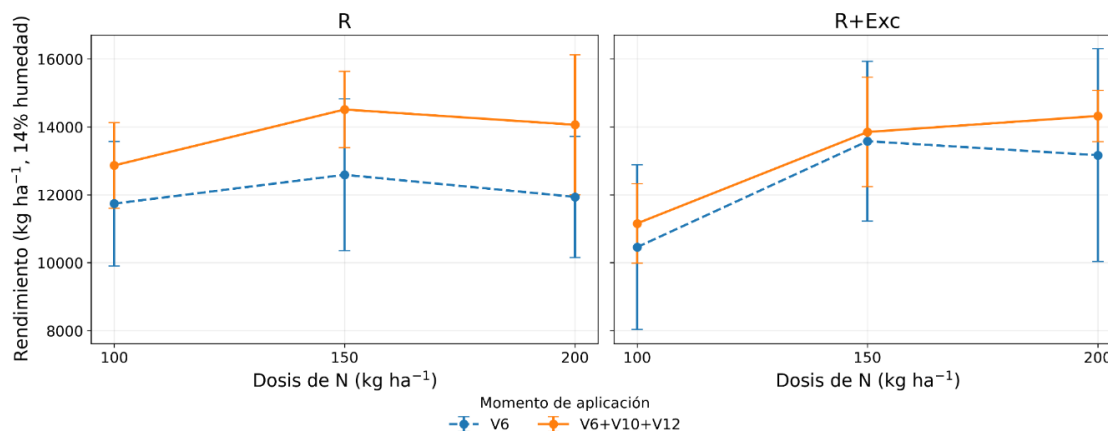
Los resultados evidencian que el número de granos por unidad de superficie respondió de manera diferencial según el tratamiento, registrándose incrementos en algunos casos cuando la aplicación de N se realizó en el estadio V6 y, en otros, bajo esquemas fraccionados, sin observarse una tendencia consistente. La aplicación de 200 kg ha⁻¹ de N determinó aumentos estadísticamente significativos respecto a la dosis de 100 kg ha⁻¹, lo que resalta el rol de la disponibilidad total de N en la definición de este componente del rendimiento. En contraste, el PMG mostró incrementos consistentes bajo esquemas de fraccionamiento. Este comportamiento sugiere que las aplicaciones tardías, particularmente en V12, mejoran la disponibilidad de N durante el período de llenado de granos, favoreciendo la tasa de acumulación de biomasa en el grano y su peso final. En este sentido, estos resultados son consistentes con lo reportado por Ciampitti y Vyn (2012), quienes destacan que la sincronización entre la oferta de N y la demanda del cultivo durante etapas reproductivas resulta clave para optimizar la partición de asimilados y la eficiencia de uso del nutriente.

En términos generales, se ha reportado que el fraccionamiento del N puede mejorar la eficiencia temporal de su suministro, pero su efecto depende del nivel de N disponible y del ambiente (Gigena et al., 2023). Bajo exceso hídrico, asociado a veranos particularmente lluviosos, la respuesta al fraccionamiento tiende a ser más atenuada, dado que la dinámica del agua en el suelo puede aumentar pérdidas y reducir la disponibilidad efectiva de N; por lo tanto, el fraccionamiento contribuye a reducir exposición a pérdidas, aunque no reemplaza el rol de la dosis total como determinante de la magnitud de respuesta (Canzani, 2022; Giménez, 2017; Hayashi Tsumura, 2022).

De forma de ver los rendimientos obtenidos de una forma más gráfica se presenta la Figura 6. En ella se presenta el rendimiento en grano según la dosis de N aplicada, el régimen hídrico y el momento de aplicación, lo que permite comparar el comportamiento del cultivo entre tratamientos.

Figura 6

Rendimiento de grano (kg/ha) según aplicación de N, régimen hídrico y dosis



En la Figura 6 se observa que, para cada dosis de N, la aplicación fraccionada (V6+V10+V12) presentó una tendencia a lograr valores de rendimiento superiores en comparación a la aplicación única en V6, lo que sugiere una ventaja agronómica asociada a mejorar el acompañamiento del suministro de N en etapas de alta demanda.

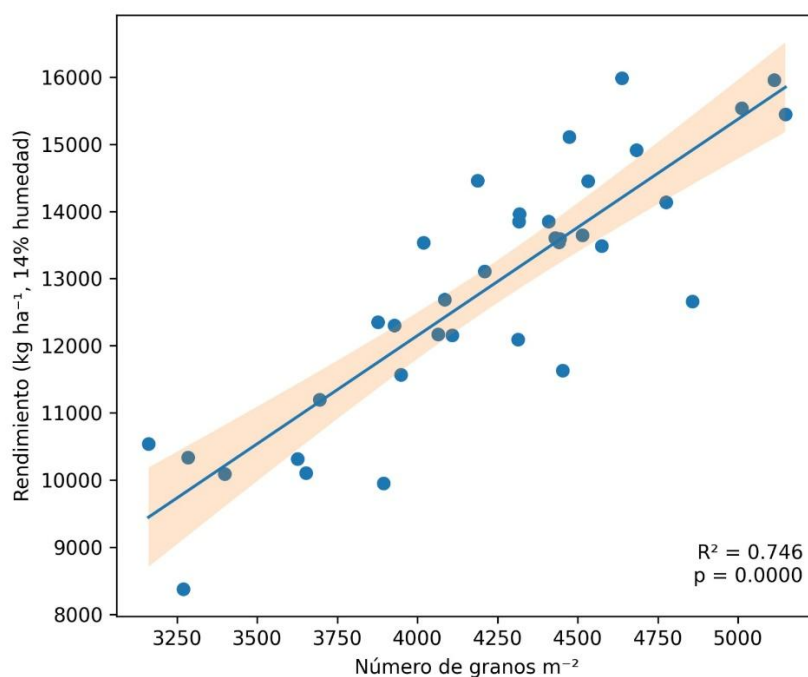
No obstante, este patrón debe interpretarse en conjunto con el análisis estadístico del experimento, dado que el momento de aplicación no generó diferencias estadísticamente significativas en todas las combinaciones evaluadas.

En este sentido, Canzani (2022) reporta que el fraccionamiento puede traducirse en mejoras consistentes a nivel numérico, aunque su magnitud varía según el ambiente y el patrón climático de la campaña; por lo tanto, su efecto suele expresarse como un ajuste de manejo que refuerza la eficiencia temporal del suministro más que como el principal determinante del rendimiento.

Dado que el rendimiento en maíz se define por la interacción entre el número de granos por unidad de superficie y el PMG, se evaluó la contribución de ambos componentes a la variación del rendimiento. En la Figura 7 se presenta la relación entre rendimiento y número de granos por unidad de superficie (granos m^{-2}) para las observaciones relevadas.

Figura 7

Relación entre rendimiento en grano (kg/ha) y número de granos por unidad de superficie (granos/m²)



Nota. Los puntos representan observaciones individuales. La línea corresponde al ajuste lineal y la banda al intervalo de confianza (95%). Se indica el coeficiente de determinación y el nivel de significancia del ajuste ($R^2 = 0,746$; $p < 0,001$).

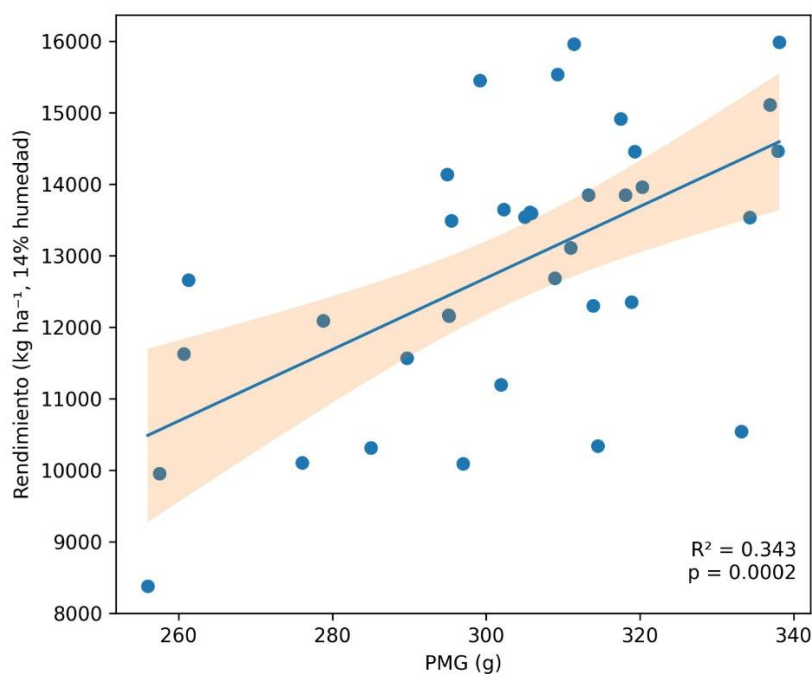
Se observa una relación positiva y marcada entre el rendimiento y el número de granos por metro cuadrado, lo que indica una asociación fuerte ($R^2 = 0,746$; $p < 0,001$). Estos resultados sugieren que una proporción significativa de la variabilidad en el rendimiento puede atribuirse a diferencias en la cantidad final de granos por unidad de superficie. Esta respuesta refleja el papel fundamental que desempeña el número de granos por unidad de superficie como un componente clave del rendimiento, al integrar tanto la disponibilidad de asimilados como la eficacia de los procesos reproductivos que condicionan la supervivencia de las estructuras y el desarrollo exitoso del cuajado.

Estos resultados coinciden con antecedentes de trabajos realizados en el mismo sitio de estudio, donde se obtuvo que el número de granos por unidad de superficie fue el componente más estrechamente vinculado al rendimiento y que su definición se concentra alrededor del período crítico, particularmente sensible a restricciones hídricas y nutricionales (Canzani, 2022; Gigena et al., 2023; Giménez, 2017).

Con el objetivo de complementar el análisis del rendimiento a través de sus componentes, se evaluó también la relación entre el rendimiento y el PMG (Figura 8).

Figura 8

Relación entre rendimiento (kg ha^{-1}) y peso de mil granos (PMG, g)



Nota. Los puntos representan observaciones individuales. La línea corresponde al ajuste lineal y la banda al intervalo de confianza (95%). Se indica el coeficiente de determinación y el nivel de significancia del ajuste ($R^2 = 0,343$; $p < 0,001$).

Se identificó una asociación positiva entre el rendimiento y el PMG, de magnitud moderada ($R^2 = 0,343$; $p = 0,000175$). Esto indica que el PMG explicó una parte de la variación del rendimiento, aunque su aporte fue menor que el del número de granos por unidad de superficie. La dispersión alrededor de la recta sugiere que, si bien existe una tendencia a mayores rendimientos cuando los granos son más pesados, el peso

individual no fue el componente principal que explicó la variación del rendimiento en este conjunto de datos.

Este comportamiento es consistente con lo reportado en otros trabajos, donde se indica que el PMG se define principalmente durante el período de llenado y suele estar condicionado por la duración efectiva del llenado y por la competencia por asimilados, por lo que tiende a mostrar asociaciones moderadas con el rendimiento y posibles compensaciones con el número de granos (Gigena et al., 2023; Giménez, 2017).

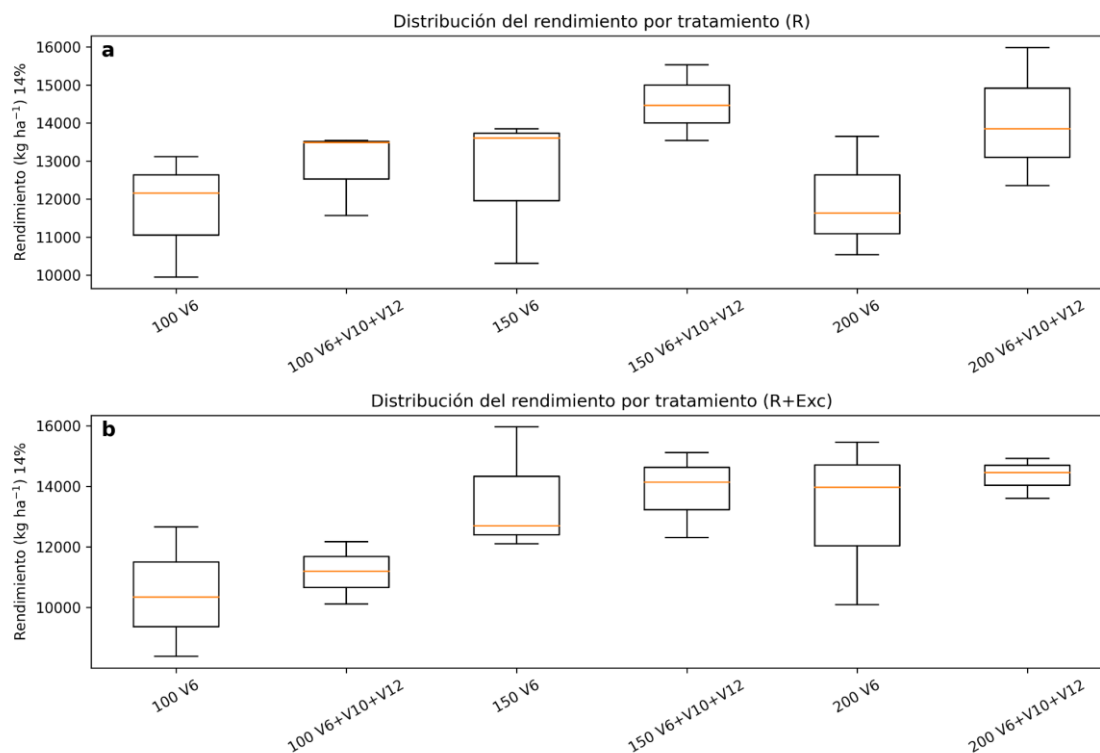
En el intervalo evaluado, las variaciones del rendimiento se asociaron principalmente con aumentos en el número total de granos, lo que sugiere que los tratamientos y/o las condiciones ambientales del ensayo incidieron con mayor intensidad sobre los procesos de determinación y cuajado de granos que sobre el peso individual de los mismos.

4.4 VARIABILIDAD DEL RENDIMIENTO SEGÚN TRATAMIENTO

La Figura 9 muestra el rendimiento y su variabilidad determinados por el régimen hídrico y por la estrategia de fertilización con N. En condiciones de riego normal (N) (Figura 9a), el rendimiento aumentó al pasar de 100 a 150 kg ha⁻¹ de N. La mediana fue mayor cuando el N se aplicó fraccionado, con el efecto más marcado en la dosis intermedia de 150 kg ha⁻¹. Con una dosis de 200 kg ha⁻¹, la aplicación única en V6 mostró una mediana menor y una mayor variabilidad entre observaciones. En cambio, el fraccionamiento incrementó la mediana y concentró los resultados en valores más altos, lo que indica una respuesta más consistente dentro de esa dosis.

Figura 9

Rendimiento en grano (kg/ha) y su variabilidad según tratamiento evaluado



Nota. Distribución del rendimiento de grano de maíz (kg ha⁻¹) según dosis total de N (100, 150 y 200 kg ha⁻¹) y momento de aplicación (V6 vs fraccionado V6+V10+V12) en dos regímenes hídricos: (a) riego normal (R) y (b) riego con exceso (R+Exc). Las cajas representan el rango intercuartílico (P25–P75), la línea central la mediana y los bigotes la dispersión de los datos.

Bajo la condición de R+Exc (Figura 9b), el mayor contraste se registró en la dosis alta de N (200 kg ha⁻¹). En ese tratamiento, el rendimiento se mantuvo entre los valores más altos y mostró una alta dispersión cuando se aplicó únicamente en V6, lo que sugiere una posible pérdida del N causada por el exceso hídrico. Con el incremento de la dosis a 150 y 200 kg ha⁻¹, las medianas se desplazaron hacia valores de rendimiento más altos y la distribución mostró mayor estabilidad, en particular en los tratamientos con aplicación fraccionada.

En conjunto, la Figura 9 muestra que, los tratamientos fraccionados presentan generalmente una menor dispersión en comparación con los tratamientos aplicados únicamente en V6, a excepción de los tratamientos bajo riego normal en dosis de 200 kg/ha. Este patrón es consistente con lo reportado para ambientes donde la dinámica del agua en el suelo condiciona la disponibilidad efectiva de N y, en consecuencia, la estabilidad productiva (Giménez, 2017).

4.5 PRODUCTIVIDAD PARCIAL DEL NITRÓGENO APLICADO (PPN)

La Tabla 6 muestra la PPN (productividad parcial del N; Rend/N), que expresa cuántos kg de grano se obtienen por cada kg de N aplicado. En ambos regímenes hídricos, la PPN disminuyó al aumentar la dosis, lo que indica retornos decrecientes del fertilizante nitrogenado aplicado indicando que el rendimiento en grano no aumentó en la misma proporción que las diferentes dosis de N aplicado.

Tabla 6

Productividad parcial del N según régimen hídrico, dosis de N y momento de aplicación

Régimen hídrico	Dosis N (kg ha ⁻¹)	Momento	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	PPN = Rend/N (kg/kg)
R	100	V6	11.739	117
R	100	V6+V10+V12	12.864	129
R+Exc	100	V6	10.458	105
R+Exc	100	V6+V10+V12	11.157	112
R	150	V6	12.589	84
R	150	V6+V10+V12	14.512	97
R+Exc	150	V6	13.578	90
R+Exc	150	V6+V10+V12	13.848	92
R	200	V6	11.938	60
R	200	V6+V10+V12	14.062	70
R+Exc	200	V6	13.166	66
R+Exc	200	V6+V10+V12	14.321	72

Nota. PPN (kg kg⁻¹) = rendimiento de grano (kg ha⁻¹) / N agregado (kg ha⁻¹).
Los rendimientos corresponden a medias ajustadas del modelo.

La productividad parcial del nitrógeno (PPN) resultó superior en los tratamientos con fraccionamiento según momento de aplicación, siendo un 14% superior bajo R y un 6% mayor en R+Exc. Las diferencias más notorias se observaron en las dosis de 150 y 200 kg/ha de N bajo R, donde la PPN fue un 15,4% y un 16,6% mayor respectivamente.

En el régimen hídrico de R+Exc, la PPN es especialmente útil porque resume el efecto combinado entre disponibilidad efectiva de N y ambiente; por eso, aun cuando el fraccionamiento tiende a mejorar el ajuste temporal del suministro, la magnitud de la respuesta continúa dominada por la dosis total y por las condiciones hídricas (Canzani, 2022; Gigena et al., 2023; Giménez, 2017; Hayashi Tsumura, 2022).

Como complemento al análisis anterior, la PPN marginal ($\Delta\text{Rend}/\Delta\text{N}$) cuantifica el retorno incremental por cada aumento de dosis entre niveles consecutivos. A continuación, en la Tabla 7 se muestra la productividad parcial marginal en el uso del N, definida como el cambio en el rendimiento del cultivo ante incrementos sucesivos en la dosis de N aplicada. Este parámetro facilita la cuantificación del retorno productivo vinculado a cada incremento en la fertilización nitrogenada, permitiendo así evaluar la respuesta del cultivo frente a distintas dosis.

Tabla 7

Productividad parcial marginal del nitrógeno entre dosis según régimen hídrico y aplicación

Régimen Hídrico	Cambio dosis	Momento	ΔRend (kg ha ⁻¹)	PPN marginal (kg/kg)
R	100→150	V6	850	17
R	150→200	V6	-651	-13
R	100→150	V6+V10+V12	1.648	33
R	150→200	V6+V10+V12	-450	-9
R+Exc	100→150	V6	3.120	62
R+Exc	150→200	V6	-412	-8
R+Exc	100→150	V6+V10+V12	2.691	54
R+Exc	150→200	V6+V10+V12	473	9

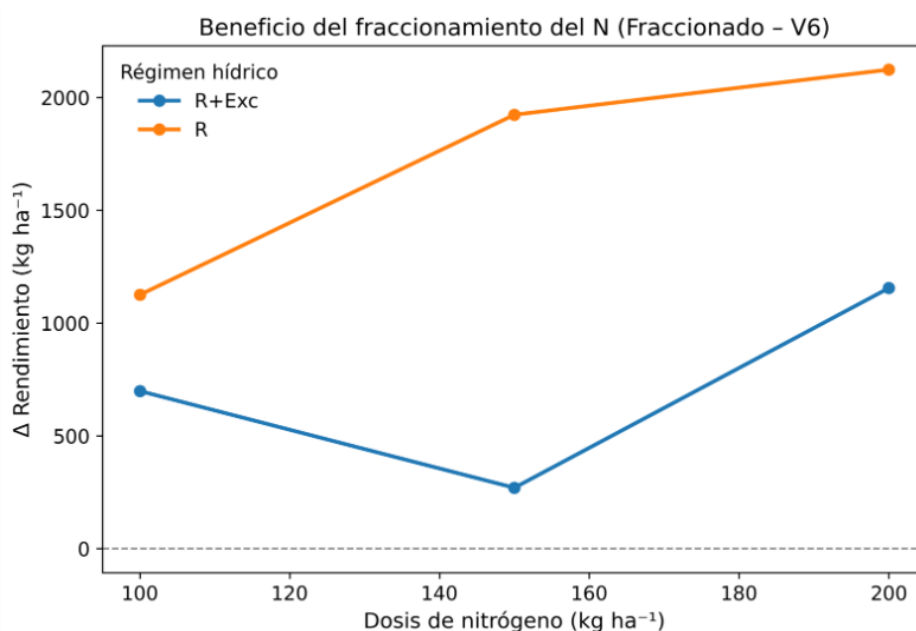
Nota. PPN marginal (kg kg⁻¹) = $\Delta\text{Rend}/\Delta\text{N}$, donde ΔRend es la diferencia de rendimiento (kg ha⁻¹) entre dosis y ΔN es el incremento de nitrógeno aplicado (kg ha⁻¹).

En la PPN marginal ($\Delta\text{Rend}/\Delta\text{N}$) la respuesta fue claramente mayor en el tramo 100 a 150 UN que en 150 a 200 UN, confirmando retornos marginales decrecientes a dosis altas. En riego normal, el retorno fue mayor con N fraccionado en 100 a 150 UN, mientras que 150 a 200 UN resultó negativo, indicando saturación de la respuesta. En riego con exceso, los valores más altos en 100 a 150 UN muestran que el cultivo requirió aumentar N para sostener rendimiento en ese ambiente, y que la respuesta se estabilizó desde la dosis intermedia.

En la Figura 10 se presenta la variación del rendimiento de aplicaciones fraccionadas en comparación a una única aplicación (V6), en función de la dosis de N, comparando los diferentes regímenes hídricos (R+Exc y R).

Figura 10

Beneficio del fraccionamiento del N (UN/ha) expresado como diferencia de rendimiento en grano (Δ) (kg/ha)



El fraccionamiento del nitrógeno no produjo incrementos del rendimiento con diferencias estadísticas significativas, aunque se observaron tendencias repetidas hacia promedios más altos en comparación con la aplicación única en V6. Este patrón indica que el fraccionamiento funciona sobre todo como una medida de ajuste fino, destinada a mejorar la coincidencia temporal entre la disponibilidad del nutriente y los requerimientos del cultivo.

En cuanto a la diferencia entre curvas, la línea de condición hídrica normal (R) muestra un beneficio ($\Delta\text{Rend} = \text{Fraccionado} - \text{V6}$) más alto y creciente con la dosis, mientras que en R+Exc el beneficio es menor y más variable. Esto se interpreta porque, bajo exceso hídrico, la disponibilidad efectiva de N y la eficiencia de recuperación quedan más condicionadas por la dinámica del agua en el suelo y el riesgo de pérdidas, atenuando la ganancia atribuible al fraccionamiento respecto a un riego normal (Canzani, 2022; Giménez, 2017).

Este comportamiento es consistente con que la absorción de N en maíz no es uniforme, sino que se concentra principalmente en estadios vegetativos avanzados y al inicio del período reproductivo; por ello, aplicaciones entre V6–V12 mejoran la sincronización entre oferta y demanda y tienden a aumentar la eficiencia de uso del nutriente, aun cuando el efecto sobre rendimiento no siempre se separa estadísticamente en un único ensayo (Giménez, 2017; Ritchie et al., 1993).

En la misma línea, Canzani (2022) reportó que fraccionar la dosis favorece la sincronización y reduce el riesgo de pérdidas tempranas. Además, en condiciones bajo riego, Gigena et al. (2023) menciona qué estrategias de fraccionamiento mediante fertirriego pueden traducirse en mejoras de rendimiento y/o componentes, con efectos que dependen del ambiente y del esquema de partición (por ejemplo, más momentos de aplicación).

4.6 SUBCOMPONENTES DEL RENDIMIENTO

En la Tabla 8 se presentan los subcomponentes del rendimiento y el largo de espiga según régimen hídrico, dosis de N y momento de aplicación. Se observa que los subcomponentes del rendimiento (hileras/espiga, granos/hilera y granos/espiga) y el largo de espiga no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos dentro de cada régimen hídrico.

Tabla 8

Subcomponentes del rendimiento y largo de espiga según régimen hídrico, dosis y aplicación de N

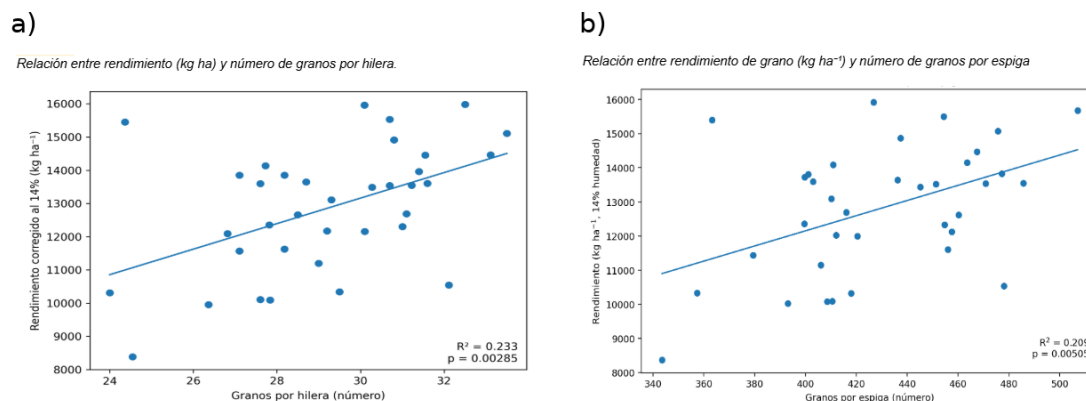
Régimen Hídrico	Dosis N (kg ha ⁻¹)	Momento	Largo espiga (cm)	N° hileras/espiga	N° granos/hileras	N° granos/espiga
R	100	V6	14	14	29	420
R	100	V6+V10+V12	14	14	29	425
R	150	V6	14	15	27	410
R	150	V6+V10+V12	15	15	32	468
R	200	V6	14	15	30	457
R	200	V6+V10+V12	14	15	29	435
R+Exc	100	V6	14	14	27	393
R+Exc	100	V6+V10+V12	14	14	29	412
R+Exc	150	V6	14	15	29	433
R+Exc	150	V6+V10+V12	15	15	31	447
R+Exc	200	V6	14	15	28	417
R+Exc	200	V6+V10+V12	14	14	30	436

Aunque no se observan diferencias significativas entre tratamientos, se aprecia una tendencia descriptiva a mayores valores de granos/hilera y granos/espiga con el N fraccionado, principalmente a dosis intermedias. El número de hileras/espiga se mantuvo muy estable (14–15), lo que es esperable por su fuerte determinación genética y menor sensibilidad al manejo y ambiente (Canzani, 2022; Gigena et al., 2023; Giménez, 2017).

Con el fin de analizar la relación entre el rendimiento y sus subcomponentes, se evaluó la asociación entre el rendimiento de grano y el número de granos por hilera y por espiga, tal como se presenta en la Figura 11.

Figura 11

Relación entre rendimiento en grano y número de granos por hilera y espiga



Nota. Número de granos por hilera (a) y número de granos por espiga (b). Los puntos representan observaciones individuales, la línea corresponde al ajuste lineal y la banda al intervalo de confianza del 95%. Se indica el coeficiente de determinación (R^2) y el nivel de significancia (p) para cada relación. ($R^2 = 0,233$; $p = 0,00285$) y ($R^2 = 0,233$; $p = 0,00285$), respectivamente.

En cuanto a granos por hilera (a), se observó una asociación positiva, aunque no significativa, no obstante, de magnitud moderada ($R^2 = 0,233$; $p = 0,00285$). Si bien no se encontraron diferencias en la cantidad de granos por hilera, los datos sugieren una tendencia donde un mayor número de granos está asociado a un aumento en el rendimiento. Se observan casos con valores similares de granos/hilera y rendimientos distintos, lo que indica la intervención de otros componentes.

En lo que respecta al número de granos por espiga (b), se aprecia una asociación positiva y significativa entre el rendimiento y el número de granos por espiga ($R^2 = 0,214$; $p = 0,004$), lo que indica que parcelas con mayor número de granos por espiga tendieron a presentar mayores rendimientos. No obstante, la magnitud moderada de la relación sugiere que este subcomponente explica solo una parte de la variación y que el rendimiento responde principalmente a la combinación de subcomponentes que determinan el número de granos por unidad de superficie, además del peso del grano.

5.CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio permitieron analizar cómo el fertirriego con nitrógeno influye en el rendimiento del maíz bajo distintos regímenes hídricos, considerando tanto la dosis total aplicada como el fraccionamiento o no del N aplicado.

Dado los resultados obtenidos en este trabajo, la primera hipótesis planteada, de que un mayor agregado de nitrógeno incrementa el rendimiento en grano independientemente de la condición hídrica, debe rechazarse, ya que la respuesta a la dosis depende del régimen hídrico. Bajo condiciones de riego normal, no hubo diferencias entre las diferentes dosis n. Sin embargo, bajo condiciones de exceso hídrico, la dosis más baja (100 kg N ha^{-1}) generó rendimientos significativamente inferiores en comparación con las dosis de 150 y 200 kg N ha^{-1} , entre las cuales no se observaron diferencias. Esto sugiere que, a partir de una dosis intermedia, la respuesta se estabiliza. Estos resultados permiten destacar un aspecto de alta relevancia agronómica: dosis de 150 kg N ha^{-1} resultaron suficientes para alcanzar rendimientos máximos, sin ventajas productivas al incrementar la dosis a 200 kg N ha^{-1} . Este comportamiento refuerza la posibilidad de optimizar el uso del nitrógeno, reduciendo las dosis sin comprometer el rendimiento.

En cuanto a la segunda hipótesis, que planteaba que el fraccionamiento del nitrógeno incrementaría el rendimiento de grano en comparación con una aplicación única, y que dicho efecto sería mayor bajo riego en exceso que bajo riego normal, los resultados obtenidos permiten rechazarla. Al comparar la aplicación única con las aplicaciones fraccionadas, no se encontraron efectos significativos sobre el rendimiento. Asimismo, no se evidenció que el fraccionamiento tuviera un impacto mayor bajo exceso hídrico que bajo riego normal. Sin embargo, es importante resaltar que de forma consistente, los tratamientos con fraccionamiento de N registraron promedios numéricamente superiores a los de la aplicación única en V6, especialmente en las dosis intermedia y alta (150 y 200 kg ha^{-1}). Estas diferencias sugieren una tendencia positiva asociada a una mejor sincronización entre la oferta de nitrógeno y la demanda del cultivo.

En resumen, el principal factor que determinó la respuesta del rendimiento fue la interacción entre el régimen hídrico y la dosis total de nitrógeno. Bajo condiciones de exceso hídrico, una dosis baja resultó insuficiente para mantener altos rendimientos. Por otra parte, el fraccionamiento del nitrógeno no presentó un efecto significativo, sugiriendo que su utilidad podría estar más ligada a ajustes en el manejo que dependen del ambiente específico y la disponibilidad de nitrógeno.

En síntesis, los resultados sugieren que, en sistemas de maíz con riego, la cantidad total de nitrógeno aplicada es el factor que más explica el rendimiento. En cambio, el momento de aplicación y el fraccionamiento del nutriente pasan a ser relevantes según el régimen hídrico. En este contexto, el fertirriego se entiende como un recurso para ajustar con mayor precisión el manejo del nitrógeno, con el objetivo principal de mejorar la eficiencia en el uso del nutriente más que de aumentar al máximo el rendimiento total. Estos resultados ofrecen una base útil para orientar el diseño de

estrategias de fertilización nitrogenada más eficientes, ajustadas a las condiciones ambientales específicas del sistema de producción.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, F. H., Otegui, M. E., Cirilo, A. G., & Uhart, S. A. (Eds.). (2023). *Ecofisiología y manejo del cultivo de maíz*. MAIZAR.
- Barber, S. A. (1995). *Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Barbieri, I. P., Echeverría, H. E., & Sainz Rozas, H. R. (2003). Respuesta del cultivo de maíz bajo siembra directa a la fuente y al método de aplicación de nitrógeno. *Ciencia del Suelo*, 21(1), 18-23.
https://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol_21n1/barbieri_18-23.pdf
- Barbieri, I. P., Echeverría, H. E., Sainz Rozas, H. R., & Maringolo, M. (2010). Fertilización de maíz con urea de liberación lenta: pérdida por volatilización y eficiencia de uso de nitrógeno. *Ciencia del Suelo*, 28(1), 57-66.
<https://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v28n1/v28n1a07.pdf>
- Barbieri, P. A., Echeverría, H. E., & Sainz Rozas, H. R. (2023). Pérdidas de nitrógeno por volatilización y eficiencia de uso en maíz desde urea aplicada en diferentes momentos. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 49(1), 23-31. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/234909>
- Below, F. E. (2002). Fisiología, nutrición y fertilización nitrogenada del maíz. *Informaciones Agronómicas*, (54), 3-9.
- Brambilla, S., Stritzler, M., Soto, G., & Ayub, N. (2022). A synthesis of functional contributions of rhizobacteria to growth promotion in diverse crops. *Rhizosphere*, 24, Artículo e100611.
<https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100611>
- Canzani, F. (2022). *Estudio del fraccionamiento de la fertilización nitrogenada en maíz* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri.
<https://hdl.handle.net/20.500.12008/32956>
- Ciampitti, I. A., & Vyn, T. J. (2012). Physiological perspectives of changes over time in maize yield dependency on nitrogen uptake and associated nitrogen efficiencies: A review. *Field Crops Research*, 133, 48-67.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.03.008>
- Ciganda, V. S., García, C., & Otero, Á. (2021). Intensificación del uso del agua: El riego suplementario y las oportunidades de contribuir al medio ambiente. *Revista INIA*, (65), 80-84.
<https://www.inia.uy/sites/default/files/publications/2024-10/Revista-INIA-65-Junio-2021-18.pdf>
- Cirilo, A. G., & Andrade, F. H. (1994). Sowing date and maize productivity: II. Kernel number determination. *Crop Science*, 34(4), 1044-1046.
<https://doi.org/10.2135/cropsci1994.0011183X003400040038x>

- Dreccer, M. F., Ruiz, R. A., Maddonni, G. A., & Satorre, E. H. (2003). Bases ecofisiológicas de la nutrición en los cultivos de grano. En E. H. Satorre, R. L. Benech Arnold, G. A. Slafer, E. B. de la Fuente, D. J. Miralles, M. E. Otegui & R. Savin (Eds.), *Producción de granos: Bases funcionales para su manejo* (pp. 481-500). Universidad de Buenos Aires.
- Echeverría, H. E., & García, F. O. (2014). Fertilización de cultivos extensivos. En H. E. Echeverría & F. O. García (Eds.), *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos* (2ª ed.). INTA.
- Epstein, E., & Bloom, A. J. (2005). *Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives* (2nd ed.). Sinauer Associates.
- Fassio, A., Carriquiry, A. I., Tojo, C., & Romero, R. (1998). *Maíz: Aspectos sobre fenología*. INIA. <https://www.inia.uy/sites/default/files/publications/2025-10/INIA-ST-101-1998.pdf>
- Ferguson, R. B., Kissel, D. E., Koelliker, J. K., & Basel, W. (1984). Ammonia volatilization from surface-applied urea: Effect of hydrogen ion buffering capacity. *Soil Science Society of America Journal*, 48(3), 578-582. <https://soil5813.okstate.edu/Spring2012/ferguson.pdf>
- Firestone, M. K., & Davidson, E. A. (1989). Microbiological basis of NO and N₂O production and consumption in soil. En M. O. Andreae & D. S. Schimel (Eds.), *Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere* (pp. 7-21). John Wiley & Sons.
- García, C., Otero, A., & Capurro, M. C. (2025). Riego en Uruguay: Una herramienta clave para el crecimiento agropecuario y la sostenibilidad. *Revista INIA*, (81), 39-43. <https://www.inia.uy/sites/default/files/publications/2025-07/Revista-INIA-81-Junio-2025-12.pdf>
- Gigena, L., Viana, F., & Uribe, M. (2023). *Efecto del fertirriego en el cultivo de maíz maíz* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/43987>
- Giménez, L. (2017). *Deficiencias hídricas en distintas etapas fenológicas de maíz y soja y evaluación del modelo AquaCrop* [Disertación doctoral, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/29819>
- Giménez, L. (2019). Rendimientos de maíz y soja: Un desafío que provoca... La información experimental y la producción comercial. *Cangüé*, (42), 7-12.

- Governatori, S., & Uhart, S. A. (1997, octubre). *Efecto de la disponibilidad de nitrógeno sobre la calidad física de los granos de cultivares de maíz liberados en diferentes épocas* [Contribución]. VI Congreso Nacional de Maíz y III Reunión Suramericana de Maiceros, Pergamino, Buenos Aires.
https://www.researchgate.net/publication/311710350_Efecto_de_la_disponibilidad_de_nitrogeno_sobre_la_calidad_fisica_de_los_granos_de_cultivares_de_maiz_liberados_en_diferentes_epocas
- Hargrove, W. L. (1988). Soil, environmental, and management factors influencing ammonia volatilization under field conditions. En B. R. Bock & D. E. Kissel (Eds.), *Ammonia volatilization from urea fertilizers* (pp. 17-36). National Fertilizer Development Center; Tennessee Valley Authority.
https://www.google.com.uy/books/edition/Ammonia_Volatilization_from_Urea_Fertiliz/9SXvoxcyzaUC?hl=es-419&gbpv=1&dq=Ammonia+Volatilization+from+Urea+Fertilizers,+editado+por+B.+R.+Bock+y+D.+E.+Kissel,+publicado+por+National+Fertilizer+Development+Center,+Tennessee+Valley+Authority,+en+1988,+con+189+p%C3%A1ginas.&printsec=frontcover
- Hauck, R. D. (1981). Nitrogen fertilizer effects on nitrogen cycle processes. En F. E. Clark & T. Rosswall (Eds.), *Terrestrial nitrogen cycles: Processes, ecosystem strategies and management impacts* (pp. 551-562). Swedish Natural Science Research Council.
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2017). *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management* (8th ed.). Pearson.
- Hayashi Tsumura, R. (2022.). *Riego deficitario en maíz y soja: Estrategias para el dimensionamiento de equipos de riego para mejorar la productividad del agua en condiciones de clima templado* [Disertación doctoral, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/35703>
- Hisse, I. R., D'Andrea, K. E., & Otegui, M. E. (2019). Source–sink relations and kernel weight in maize inbred lines and hybrids: Responses to contrasting nitrogen supply levels. *Field Crops Research*, 230, 151-159.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.10.011>
- INIA Uruguay. (2024). *Riego suplementario en cultivos y pasturas: Primera parte* [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=VSGvXv4h_h0
- Instituto Nacional de Semillas. (2024). *Resultados de la evaluación nacional de cultivares de maíz: Período 2023–2024*.
<https://v.calameo.com/?bkcode=002993183c4b425dc9cfb>
- Keller, G. D., & Mengel, D. B. (1986). Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers surface applied to no-till corn. *Soil Science Society of America Journal*, 50(4), 1060-1063. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000040045x>

- Maddonni, G. A., & Otegui, M. E. (1996). Leaf area, light interception, and crop development in maize. *Field Crops Research*, 48(1), 81-87. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(96\)00035-4](https://doi.org/10.1016/0378-4290(96)00035-4)
- Maddonni, G. A., Otegui, M. E., & Bonhomme, R. (1998). Grain yield components in maize: II. Postsilking growth and kernel weight. *Field Crops Research*, 56(3), 257-264. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00094-4](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00094-4)
- Marschner, P. (Ed.). (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press.
- Medrano Gil, H., Bota Salort, J., Cifre Llompарт, J., Flexas Sans, J., Ribas Carbó, M., & Gulías León, J. (2007). Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geográficas*, (43), 63-84. <https://doi.org/10.14198/INGEO2007.43.04>
- Mezbahuddin, S., Spiess, D., Hildebrand, D., Kryzanowski, L., Itenfisu, D., Goddard, T., Iqbal, J., & Grant, R. (2020). Assessing effects of agronomic nitrogen management on crop nitrogen use and nitrogen losses in the Western Canadian Prairies. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, Artículo e512292. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.512292>
- Mueller, S. M., Camberato, J. J., Messina, C., Shanahan, J., Zhang, H., & Vyn, T. J. (2017). Late-split nitrogen applications increased maize plant nitrogen recovery but not yield under moderate to high nitrogen rates. *Agronomy Journal*, 109(6), 2689-2699. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.05.0282>
- NeSmith, D. S., & Ritchie, J. T. (1992). Effects of soil water-deficits during tassel emergence on development and yield component of maize (*Zea mays*). *Field Crops Research*, 28(3), 251-256. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(92\)90044-A](https://doi.org/10.1016/0378-4290(92)90044-A)
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2025). *Resultados de la encuesta agrícola invierno 2025*. MGAP. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/noticias/comunicado_prensa_inv_2025.pdf
- Olmedo Pico, L. B., Zhang, C., & Vyn, T. J. (2021). The central role of ear nitrogen uptake in maize endosperm cell and kernel weight determination during the lag period. *Field Crops Research*, 273, Artículo e108285. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108285>
- Otegui, M. E. (2023). Desarrollo del cultivo. En F. H. Andrade, M. E. Otegui, A. G. Cirilo & S. A. Uhart (Eds.), *Ecofisiología y manejo del cultivo de maíz* (pp. 51-70). MAIZAR.
- Otegui, M. E., Andrade, F. H., & Suero, E. E. (1995). Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *Field Crops Research*, 40(2), 87-94. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(94\)00093-R](https://doi.org/10.1016/0378-4290(94)00093-R)

- Otegui, M. E., & Bonhomme, R. (1998). Grain yield components in maize: I. Ear growth and kernel set. *Field Crops Research*, 56(3), 247-256.
[https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00093-2](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00093-2)
- Otegui, M. E., Nicolini, M. G., Ruiz, R. A., & Dodds, P. A. (1995). Sowing date effects on grain yield components for different maize genotypes. *Agronomy Journal*, 87(1), 29-33. <https://doi.org/10.2134/agronj1995.00021962008700010006x>
- Paliwal, R. L. (2001). Introducción al maíz y su importancia. En R. L. Paliwal, G. Granados, H. R. Lafitte & A. D. Violic (Eds.), *El maíz en los trópicos: Mejoramiento y producción*. FAO. <https://www.fao.org/4/x7650s/x7650s02.htm>
- Pedrol, H. M., Castellarín, J. M., Ferraguti, F., & Rosso, O. (2008). Respuesta a la fertilización nitrogenada y eficiencia en el uso del agua en el cultivo de maíz según nivel hídrico. *Informaciones Agronómicas Cono Sur*, (40), 17-20.
<https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2008/12/5.pdf>
- Pizzanelli, M. (2024). Maíz y sorgo: Análisis de tendencias y oportunidades. En *Anuario OPYPA 2024* (pp. 2-24). MGAP.
<https://descargas.mgap.gub.uy/OPYPA/Anuarios/Anuarioopypa2024/CP/10/CP10web/CP10-Maizysorgositucion.pdf>
- Quemada, M., & Gabriel, J. L. (2016). Approaches for increasing nitrogen and water use efficiency simultaneously. *Global Food Security*, 9, 29-35.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211912416300232>
- Ritchie, S. W., Hanway, J. J., & Benson, G. O. (1993). *How a corn plant develops*. Iowa State University of Science and Technology.
https://s10.lite.msu.edu/res/msu/boton/b_online/library/maize/www.ag.iastate.edu/departments/agronomy/corn_grows.html
- Robertson, G. P., & Groffman, P. M. (2015). Nitrogen transformations. En E. A. Paul (Ed.), *Soil microbiology, ecology and biochemistry* (4th ed.). Academic Press.
- Roy, R. N., Finck, A., Blair, G. J., & Tandon, H. L. S. (2006). *Plant nutrition for food security: A guide for integrated nutrient management*. FAO.
<https://www.fao.org/4/a0443e/a0443e00.pdf>
- Sainz Rozas, H. R., Echeverría, H. E., & Barbieri, P. A. (2004). Nitrogen balance as affected by application time and nitrogen fertilizer rate in irrigated no-tillage maize. *Agronomy Journal*, 96(6), 1622-1631.
<https://doi.org/10.2134/agronj2004.1622>
- Sainz Rozas, H. R., Echeverría, H. E., Studdert, G. A., & Andrade, F. H. (1999). No-till maize nitrogen uptake and yield: Effect of urease inhibitor and application time. *Agronomy Journal*, 91(6), 950-955. <https://doi.org/10.2134/agronj1999.916950x>
- Sánchez, V. J. (2000). *Fertirrigación: Principios, factores, aplicaciones* [Contribución]. Seminario de Fertirrigación: Apukai-Comex Perú, Lima.
<https://www.profertil.com.ar/wp-content/uploads/2020/08/fertirrigacion.pdf>

- Sela, G. (s.f.a). *El fertirriego como una tecnología de agricultura de precisión*. Cropaia. <https://cropaia.com/es/blog/fertirriego-agricultura-de-precision/>
- Sela, G. (s.f.b). *Fertirriego: Optimizando la entrega de nutrientes y agua*. Cropaia. <https://cropaia.com/es/blog/fertirriego>
- Sharma, A., Prasad, R., Nguyen, A. T., Ortiz, B. V., Gamble, A. V., Worosz, M. R., Duzy, L., Francisco, E., Hoogenboom, G., & Shelar, V. B. (2025). Exploring the bottlenecks of low nitrogen efficiency among yield zones in a commercial row crop farm using a nitrogen budget approach. *Agronomy Journal*, 117(6), Artículo e70242. <https://doi.org/10.1002/agj2.70242>
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant physiology and development* (6th ed.). Sinauer Associates.
- Tolimir, M., Gajić, B., Kresović, B., Životić, L., Gajić, K., Brankov, M., & Todorovic, M. (2024). Impact of deficit irrigation and planting density on grain yield and water productivity of maize grown under temperate continental climatic conditions. *Agricultural Water Management*, 302, Artículo e109009. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109009>
- Weil, R. R., & Brady, N. C. (2017). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson.
- Yang, X., Zhang, L., & Liu, X. (2024). Optimizing water-fertilizer integration with drip irrigation management to improve crop yield, water, and nitrogen use efficiency: A meta-analysis study. *Scientia Horticulturae*, 338, Artículo e113653. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113653>
- Yin, R., Gu, X., Cheng, Z., Li, W., Wang, Y., Zhao, T., Cai, W., Du, Y., & Cai, H. (2024). Optimizing nitrogen application patterns and amounts to improve maize yield and water-nitrogen use efficiencies in the Loess Plateau of China: A meta-analysis. *Field Crops Research*, 318, Artículo e109599. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109599>
- Zayed, O., Hewedy, O. A., Abdelmoteleb, A., Ali, M., Youssef, M. S., Roumia, A. F., Seymour, D., & Yuan, Z.-C. (2023). Nitrogen journey in plants: From uptake to metabolism, stress response, and microbe interaction. *Biomolecules*, 13(10), Artículo e1443. <https://www.mdpi.com/2218-273X/13/10/1443>