

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

FERTIRRIEGO NITROGENADO Y SU EFECTO EN EL RENDIMIENTO DE MAÍZ

por

**Matias José GALLINAL FOSSATI
Lorenzo MAJÓ RODRÍGUEZ**

**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 – Sin Obra Derivada**".



PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director/a:

Ing. Agr. (Mag.) Mauricio Bustamante

Tribunal:

Ing. Agr. (Mag.) Mauricio Bustamante

Ing. Agr. (Mag.) Nicolás Fassana

Ing. Agr. (Mag.) Winnona Saracho

Fecha:

4 de junio de 2026

Estudiante:

Lorenzo Majó Rodríguez

Matías José Gallinal Fossati

AGRADECIMIENTOS

Antes que nada, agradecer especialmente a nuestro tutor Mauricio Bustamante, quien nos guio durante el desarrollo de este trabajo.

A la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República, por ser nuestra casa de estudios durante todos estos años, la cual nos permitió crecer y desarrollarnos, no solo como profesionales sino también como personas.

A nuestros familiares y amigos, por su apoyo y compañía incondicional a lo largo de la carrera.

TABLA DE CONTENIDO

<i>PÁGINA DE APROBACIÓN</i>	3
<i>AGRADECIMIENTOS</i>	4
<i>LISTA DE TABLAS Y FIGURAS</i>	7
<i>RESUMEN</i>	8
<i>ABSTRACT</i>	9
1 INTRODUCCIÓN	10
1.1 OBJETIVOS.....	11
1.1.1 General.....	11
1.1.2 Especifico.....	11
2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 ECOFISIOLOGÍA Y COMPONENTES DEL RENDIMIENTO.....	12
2.1.1 Subcomponentes del rendimiento.....	14
2.2 AGUA EN MAÍZ.....	15
2.3 NITRÓGENO EN MAÍZ.....	16
2.4 INTERACCIÓN ENTRE AGUA Y NITRÓGENO EN MAÍZ.....	21
2.5 FERTIRRIEGO EN MAÍZ.....	23
2.6 HIPÓTESIS BIOLÓGICAS.....	25
3 MATERIALES Y MÉTODOS	26
3.1 LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO.....	26
3.2 CARACTERÍSTICAS DEL EXPERIMENTO.....	26
3.3 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO.....	27
3.4 DETERMINACIONES EFECTUADAS.....	29
3.4.1 Determinaciones a campo.....	29
3.4.2 Determinaciones en laboratorio.....	29
3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	30
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
4.1 CONDICIONES CLIMÁTICAS.....	31
4.1.1 Temperatura y precipitaciones.....	31
4.1.2 Radiación solar.....	32
4.2 EVOLUCIÓN DE MATERIA SECA.....	33
4.2.1 Evolución de la materia seca (kg/ha) según dosis de nitrógeno aplicada y condición hídrica (secano/riego).....	33
4.2.2 Evolución de la materia seca (kg/ha) según la dosis de nitrógeno (UN/ha) aplicada y el número de fraccionamientos.....	36
4.3 RENDIMIENTO EN GRANO Y COMPONENTES NUMÉRICOS PRINCIPALES.....	39
4.3.1 Rendimiento de grano (kg/ha) y componentes numéricos según dosis de nitrógeno aplicada y condición hídrica.....	39

4.3.2 Relación de la materia seca (kg/ha) con el rendimiento y sus componentes numéricos principales.....	42
4.3.3 Rendimiento en grano (kg/ha) según dosis de nitrógeno (N) aplicada y número de fraccionamientos.	43
4.4 SUBCOMPONENTES NUMÉRICOS DEL RENDIMIENTO.....	47
4.4.1 Subcomponentes numéricos y largo de espiga según dosis de nitrógeno aplicada y condición hídrica	47
4.4.2 Subcomponentes numéricos según dosis de nitrógeno (N) aplicada y número de fraccionamientos.	48
5 CONCLUSIONES	50
6 BIBLIOGRAFÍA.....	51

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla 1	Características físicas e hidrológicas del suelo	26
Tabla 2	Fechas de las etapas fenológicas más relevantes	27
Tabla 3	Caracterización de tratamientos del ensayo	28
Tabla 4	Materia seca (MS) según dosis de nitrógeno (N) aplicada y condición hídrica en tres momentos	34
Tabla 5	MS evaluada en tres momentos según nivel de nitrógeno (UN/ha) aplicado y número de fraccionamientos	37
Tabla 6	Rendimiento y los componentes principales según dosis de nitrógeno (N) aplicada y condición hídrica	39
Tabla 7	Rendimiento en grano y los componentes principales según momentos de aplicación.....	44
Tabla 8	Subcomponentes del rendimiento según dosis de nitrógeno (N) aplicada y condición hídrica (secano vs riego).....	47
Tabla 9	Evaluación de subcomponentes del rendimiento en función de contrastes ortogonales.....	48
Figura 1	Registro histórico y del año agrícola 2023/2024 en EEMAC de temperatura y precipitaciones.....	31
Figura 2	Registro histórico y del año agrícola 2023/2024 en EEMAC de radiación solar diaria incidente promedio	33
Figura 3	MS según dosis de nitrógeno aplicada y condición hídrica (secano vs riego) en tres momentos	36
Figura 4	Materia seca acumulada a cosecha en función de dosis de nitrógeno y número de fraccionamientos	38
Figura 5	Correlación entre el rendimiento en grano y el peso de mil granos (PMG)...	41
Figura 6	Correlación entre el rendimiento en grano y el número de granos por unidad de superficie	41
Figura 7	Rendimiento (kg/ha) en función de la dosis de nitrógeno (UN/ha) aplicada y condición hídrica.....	42
Figura 8	Correlación entre la biomasa total con el rendimiento y con el número de granos/m ²	43
Figura 9	Rendimiento en grano en función de dosis y número de fraccionamientos del nitrógeno (N) aplicado.....	43

RESUMEN

El maíz cumple un rol clave en los sistemas productivos de Uruguay, principalmente como insumo para la alimentación animal. Su rendimiento depende en gran medida de la disponibilidad de agua y de nutrientes, especialmente nitrógeno. En sistemas con riego suplementario, el manejo de la fertilización nitrogenada mediante fertirriego puede mejorar la eficiencia de uso del nutriente al sincronizar su disponibilidad con la demanda del cultivo. Sin embargo, el efecto del fraccionamiento de las aplicaciones de nitrógeno sobre el rendimiento del maíz presenta resultados variables según las condiciones ambientales y de manejo. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de diferentes dosis de nitrógeno y niveles de fraccionamiento de aplicación mediante fertirriego sobre los componentes del rendimiento y el rendimiento en grano del cultivo de maíz bajo condiciones de riego suplementario. El experimento se realizó durante la zafra 2023/2024 en la Estación Experimental "Dr. Mario A. Cassinoni" (EEMAC) de la Facultad de Agronomía, ubicada en Paysandú, Uruguay. El ensayo se estableció bajo condiciones hídricas no limitantes. Se evaluaron distintas dosis de nitrógeno y diferentes esquemas de fraccionamiento durante el ciclo del cultivo. Se realizaron determinaciones de evolución de materia seca, rendimiento en grano, componentes y subcomponentes numéricos del rendimiento. Los datos obtenidos fueron analizados estadísticamente utilizando el software InfoStat. Los resultados mostraron que el incremento en la dosis de nitrógeno tuvo un efecto positivo sobre el crecimiento del cultivo y el rendimiento en grano, confirmando que una mayor disponibilidad del nutriente favorece la acumulación de biomasa y los componentes numéricos del rendimiento. En particular, se observó una mayor producción de materia seca y mejoras en el número de granos por espiga y peso de grano a medida que aumentó la dosis aplicada. En contraste, el aumento en el número de fraccionamientos en la fertilización nitrogenada no generó incrementos consistentes en el rendimiento dentro de cada dosis evaluada. En algunos casos, especialmente con dosis altas de nitrógeno, un mayor fraccionamiento incluso provocó reducciones en el rendimiento, posiblemente asociadas a pérdidas del nutriente o a una menor eficiencia en su utilización por el cultivo. Los resultados obtenidos indican que bajo las condiciones en que se desarrolló este experimento el rendimiento del cultivo de maíz bajo riego responde principalmente a la dosis de nitrógeno aplicada, mientras que el aumento en el número de fraccionamientos no necesariamente mejora la productividad.

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

ABSTRACT

Corn plays a key role in Uruguay's production systems, mainly as an input for animal feed. Its yield largely depends on the availability of water and nutrients, especially nitrogen. In systems with supplemental irrigation, the management of nitrogen fertilization through fertigation can improve nutrient use efficiency by synchronizing its availability with crop demand. However, the effect of splitting nitrogen applications on corn yield shows variable results depending on environmental and management conditions. The objective of this study was to evaluate the effect of different nitrogen rates and levels of application splitting through fertigation on yield components and grain yield of corn under supplemental irrigation conditions. The experiment was conducted during the 2023/2024 growing season at the "Estación Experimental Mario A. Cassinoni" (EEMAC) of the Facultad de Agronomía, located in Paysandú, Uruguay. The trial was established under irrigated conditions, except for the control treatment. Different nitrogen rates and application splitting schemes were evaluated throughout the crop cycle. Measurements included dry matter accumulation, grain yield, and numerical components and subcomponents of yield. The data obtained were statistically analyzed using Info Stat software. The results showed that increasing nitrogen rates had a positive effect on crop growth and grain yield, confirming that greater nutrient availability promotes biomass formation and yield components. In particular, higher dry matter production and improvements in the number of grains per ear and grain weight were observed as the applied rate increased. In contrast, increasing the number of nitrogen application splits did not generate consistent increases in yield within each evaluated rate. In some cases, especially at high nitrogen rates, greater splitting even led to yield reductions, possibly associated with nutrient losses or lower efficiency in nutrient use by the crop. The results indicate that corn yield under irrigation primarily responds to the applied nitrogen rate, while increasing the number of application splits does not necessarily improve productivity.

Keywords: corn, nitrogen, irrigation, splitting, yield

1 INTRODUCCIÓN

El maíz es el cereal de mayor producción a nivel mundial (Cuitiño & Cardozo, 2018). Según el United States Department of Agriculture (USDA, 2025), a través de su servicio agrícola exterior del mismo, estimó la producción global de este cereal es de 1,23 mil millones de toneladas. En Uruguay es el segundo cultivo de verano con más área sembrada, con 213.100 hectáreas sembradas en la zafra 2023/2024 (Instituto Nacional de Estadística [INE], 2024). Según la Oficina de Programación y Política Agropecuaria (OPYPA, 2024, como se cita en Pizzanelli, 2024), el área sembrada de maíz bajo riego fue de apenas 23.200 hectáreas (10,9% del área del cultivo de maíz), mientras que el área en secano fue de 189.900 hectáreas (89 % del total).

Este cultivo cumple un rol sumamente importante en la alimentación animal, siendo ésta su principal utilización. Según Methol y Pizzanelli (2022), más del 90 % del maíz producido en el país es usado como insumo en la alimentación de bovinos, porcinos y aves, tanto en forma de grano seco como en forma de silo.

Al ser un cultivo de verano gramíneo este resulta muy sensible a las condiciones ambientales como disponibilidad de agua y de nutrientes, lo que lo vuelve altamente susceptible a los efectos del año. Los rendimientos promedios para Uruguay de maíz los últimos 9 años fueron de 5.494 kg/ha en secano y 8.913 kg/ha con riego (Pizzanelli, 2024). El rendimiento potencial de maíz bajo riego en Uruguay es de 15.000 kg/ha según Giménez (2012b). Sin embargo, en la última zafra (2024/2025), se registraron rendimientos promedios de 12.902 kg/ha en maíz de primera con riego y 9.398 kg/ha en maíz de segunda bajo riego (Oficina de Estadísticas Agropecuarias [DIEA], 2025). En la evaluación nacional de cultivares para la zafra 2022/2023 los rendimientos promedios logrados con riego fueron de 22.000 kg/ha y se alcanzaron máximos de 24.000 kg/ha (Boschi & Cuadro, 2023). Para Uruguay, los rendimientos promedio en secano en la zafra 2023/2024 fueron cercanos a los 6000 kg/ha mientras que los rendimientos con riego alcanzaron los 10000 kg/ha aproximadamente (Pizzanelli, 2024).

El agua representa la principal limitante para la producción estival en secano en Uruguay (Sawchik & Ceretta, 2005), debido a diversos factores climáticos, entre ellos la variabilidad de precipitaciones (Giménez, 2012b), alta demanda atmosférica (Baethgen & Terra, 2010) sumado también a factores edáficos asociado a suelos con bajas capacidades de almacenaje de agua (Molfino & Califra, 2001). Frente a esto, el riego suplementario es la solución más viable para levantar estas limitantes. Para Hayashi (2023, como se cita en Boschi y Cuadro, 2023), con la tecnología de riego se busca

obtener rendimientos altos y estables cuyo objetivo es el de mejorar la sostenibilidad de la producción agropecuaria la cual será la base para la producción de alimentos tanto para los animales como para los humanos.

Una vez levantada la limitante hídrica, la mayor limitante pasa a ser la disponibilidad de nutrientes, principalmente el nitrógeno (Madeira de Quadros, 2019). Por esta razón, es de suma importancia el estudio del ajuste de este nutriente para el cultivo de maíz. El nitrógeno es uno de los nutrientes más importantes para este cultivo, ya que desempeña un papel clave en el crecimiento vegetativo y su efecto posterior en la formación de grano (Baethgen, 1996).

En Uruguay, la fertilización convencional de nitrógeno es a partir del criterio de suficiencia, intentando subir los niveles del nutriente hasta los niveles críticos, con dos aplicaciones: a la siembra y en V6 (Quincke et al., 2008). Ernst Romero (2020) señala que la fertilización nitrogenada convencional en maíz, aplicada en etapas tempranas del cultivo, puede resultar en pérdidas significativas de nitrógeno por lixiviación, volatilización y escorrentía, debido a la baja capacidad de absorción del cultivo en ese período.

Una de las alternativas existentes para levantar las limitantes mencionadas anteriormente es el fertirriego, tecnología que permite aplicar fertilizantes en múltiples momentos del ciclo, adecuándose a la demanda nutricional del cultivo, junto con la demanda hídrica del mismo (Torri, 2005).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 General

El objetivo general de este experimento es evaluar el efecto del fertirriego nitrogenado en el rendimiento del cultivo de maíz bajo riego suplementario.

1.1.2 Especifico

Como objetivo específico, se busca evaluar el efecto de diferentes dosis y esquemas de fraccionamiento de nitrógeno sobre el rendimiento de maíz bajo riego.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 ECOFISIOLOGÍA Y COMPONENTES DEL RENDIMIENTO

El estudio de la fisiología del maíz requiere distinguir dos grandes fases: vegetativa y reproductiva. Según Fassio et al. (1998), la fase vegetativa comienza con la emergencia (VE) y se extiende hasta la floración masculina (VT). Para identificar cada etapa se utiliza la Escala de Desarrollo de Ritchie et al. (s.f.), donde los estadios vegetativos se denominan como V1, V2, ..., VT, en función del número de hojas completamente desplegadas. Fassio et al. (1998) también afirma que, durante esta fase, la planta incrementa su altura y superficie foliar, es importante destacar el momento V6 como punto de aceleración del crecimiento.

Además, se menciona que la fase reproductiva inicia con la floración femenina (R1) y culmina en la madurez fisiológica (R6). A lo largo de esta fase, van ocurriendo etapas críticas como la polinización (R1), el llenado de grano (R3–R4) y la madurez del grano (R5–R6) (Fassio et al., 1998). Cada uno de los estadios fenológicos comentados presentan requerimientos específicos de agua y nutrientes, por lo que un manejo agronómico adecuado es esencial para maximizar la eficiencia de recursos y el rendimiento del cultivo (Fassio et al., 1998).

Entre los factores que afectan la tasa de crecimiento del cultivo, es fundamental considerar la temperatura (Fassio et al., 1998). Durante la fase vegetativa, las temperaturas elevadas pueden acelerar el crecimiento, lo que acorta el ciclo y limita el tiempo disponible para acumular biomasa, es decir, que se deriva en plantas chicas con hojas más cortas, con menor capacidad de hacer fotosíntesis, afectando el rendimiento final (Walne & Reddy, 2022). En referencia a la etapa reproductiva, el estrés térmico puede comprometer la polinización, reduciendo la viabilidad del polen, lo que impacta en la calidad y cantidad de los granos, afectando también el rendimiento (Nielsen, 2025). El estrés por calor reduce la duración del llenado, y a pesar de que puede aumentar la tasa de llenado, este incremento en la tasa no compensa la disminución en el peso de grano por el hecho de que el periodo se acorta. El resultado neto es una disminución en el rendimiento del cultivo (Hill & Li, 2022).

El rendimiento del maíz puede ser explicado por dos componentes principales: el número de granos y el peso de los mismos. Para la mayoría de las condiciones ambientales y de manejo, el número de granos por unidad de superficie es el factor que explica en mayor medida las diferencias en el rendimiento de maíz (Cerrudo et al.,

2020). Con respecto al otro componente, su contribución en la variación del rendimiento es menor debido a que por lo general este es más estable que el número de granos en la mayoría de las condiciones de crecimiento (Borrás & Gambín, 2010) y la capacidad de compensación es reducida debido a una escasa plasticidad (Cerrudo et al., 2013).

El maíz, al tener hábito de crecimiento determinado, cobran importancia los factores y mecanismos involucrados en el aborto de estructuras reproductivas, proceso que ocurre hasta aproximadamente el fin de la fase lag o etapa inicial del crecimiento rápido del grano. Este momento se conoce como período crítico (PC) y es el momento donde la fijación de estructuras reproductivas es más sensible a las limitaciones ambientales. El PC dura alrededor de cuatro semanas centrado en la floración femenina (Shen et al., 2020, como se cita en Andrade, Vega, et al., 2023). En este artículo también se menciona que el periodo crítico se extiende durante ≈ 450 °Cd, entre 200 °Cd antes a 200- 250 °Cd después de la floración femenina (Cerrudo et al., 2013).

La tasa de crecimiento del maíz es un indicador relevante en la producción y está influenciada principalmente por los siguientes factores: disponibilidad de nutrientes, la radiación solar, temperatura y condiciones hídricas (Fassio et al., 1998). Andrade et al. (1996, como se cita en Andrade, Neiff, et al., 2023) menciona que en un día despejado sin limitantes puede acumular $40 \text{ gm}^{-2} \text{ día}^{-1}$.

Ciampitti y Vyn (2012) remarcan que la disponibilidad de nitrógeno durante el período crítico y cuajado de granos en maíz es determinante para la supervivencia de los óvulos fecundados y, en consecuencia, para el número final de granos por espiga. Los autores señalan que la deficiencia de nitrógeno en estas etapas reduce la tasa de fotosíntesis y limitan el suministro de carbohidratos hacia la espiga, lo que incrementa el aborto de óvulos disminuyendo el cuajado. Asimismo, según Ciampitti y Vyn (2012) el número de granos es más sensible al déficit del nutriente en la fase reproductiva que en la vegetativa, ya que depende directamente de la capacidad de la planta de proveer asimilados durante el crecimiento inicial del grano.

2.1.1 Subcomponentes del rendimiento

Al momento de explicar los aumentos o disminuciones en la productividad de un cultivo, se debe tomar en consideración los subcomponentes del rendimiento. En un trabajo de Rameau y Van den Dorpel (2016) se evaluó el efecto de la densidad de siembra y la disponibilidad hídrica en los subcomponentes del maíz con 2 niveles de fertilización nitrogenada, 150 y 300 kg N. Se analizaron variables como número de espigas por planta, número de hileras por espiga, número de granos por hilera y número total de granos por espiga. Los autores observaron que el número de espigas se ve influenciado por la densidad de siembra, ya que cuando esta aumenta, el número de espigas por planta disminuye. Por otro lado, el número de hileras por espiga presenta escasa variabilidad entre tratamientos. En cambio, el número de granos por hilera y el número total de granos por espiga mostraron sensibilidad a la disponibilidad hídrica, especialmente durante el período crítico.

Esta disminución en el número de granos por hilera en condiciones de déficit hídrico afectó el número total de granos por espiga. En situaciones de buena disponibilidad hídrica, el aumento de la densidad de siembra no redujo el rendimiento, ya que se mantuvo un número adecuado de espigas por planta. Se concluye que la interacción entre densidad de siembra y disponibilidad hídrica influye en la expresión de los subcomponentes del rendimiento, siendo el número de granos por hilera y el número total de granos por espiga los más afectados por el estrés hídrico. A su vez, el número de hileras por espiga se mantuvo estable, lo que permite inferir que esta característica es afectada por aspectos genéticos más que por condiciones ambientales (Rameau & Van den Dorpel, 2016).

Según Nielsen (2003), la espiga se forma desde los estadios de V5 y V6 hasta poco antes de la floración, donde también se define el número de hileras (influenciado por la genética más que por el ambiente) y el largo de espiga.

Otro estudio realizado por Barrios y Basso (2018) tuvo como objetivo evaluar el efecto de la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento y la calidad nutricional del grano en seis híbridos de maíz, considerando el efecto sobre los subcomponentes del rendimiento. Se aplicaron tres niveles de nitrógeno (0, 100 y 200 kg N ha⁻¹) y se midieron variables como número de hileras por espiga, número de granos por hilera, peso de 100 granos y rendimiento de grano. Los resultados arrojaron que el número de hileras por espiga y el número de granos por hilera aumentó significativamente a mayores dosis de aplicación de nitrógeno. El peso de 100 granos también se incrementó con la

fertilización, aunque con menor sensibilidad que los otros componentes. El aumento de rendimiento por la fertilización se atribuye principalmente al aumento en el número de granos por espiga.

2.2 AGUA EN MAÍZ

El maíz es una especie con hábito de crecimiento determinado (Martínez, 2015). Esta característica ocasiona que el maíz tenga una elevada susceptibilidad a la variabilidad ambiental (Giménez, 2017). La disponibilidad hídrica durante el ciclo del cultivo es la principal limitante del ambiente que determina el rendimiento y la variabilidad en los cultivos de verano realizados en secano (Giménez & García Petillo, 2011; Sawchik & Ceretta, 2005, como se cita en Giménez, 2017).

La baja disponibilidad hídrica es explicada por dos factores principales. El primero es la gran variabilidad de precipitaciones. La distribución de las precipitaciones muestra una alta variabilidad interanual y eventos extremos cada vez más frecuentes (Caorsi et al., 2018), en Giménez et al. (2009) queda evidenciado, además, el incremento en la magnitud de la interanualidad con el paso del tiempo, lo que impone desafíos para la planificación y manejo de los sistemas productivos. El otro factor a considerar es la baja capacidad de almacenaje de agua de los suelos (CAAD) agrícolas del Uruguay, que varían entre 21,5 mm y 183 mm (Molfino & Califra, 2001), y además el poco volumen de suelo que es explorado por el sistema radicular de los cultivos. La baja CAAD se puede justificar por dos factores, por un lado, la génesis del suelo, como la textura o la profundidad del perfil y por otro lado factores de manejo que afectan la capacidad de recarga de agua de los suelos como la época de siembra, la duración del período de barbecho, el cultivo antecesor, el estado estructural de los suelos, entre otros (Ceretta & Sawchik, 2006).

Para Molfino y Califra (2001) y Giménez y García Petillo (2011, como se cita en Giménez, 2017) la reducida CAAD de los suelos, cubre entre el 20 y 30% de las necesidades de agua de los cultivos.

Otro factor que contribuye al déficit hídrico en cultivos estivales bajo condiciones de secano es la elevada demanda atmosférica durante los meses de mayor radiación y temperatura. Un estudio realizado por Giménez y García Petillo (2011) evaluó la evapotranspiración de los principales cultivos de verano (maíz, soja, girasol y sorgo) en dos regiones climáticamente contrastantes del litoral uruguayo: Colonia y Paysandú. Se utilizaron datos climáticos del período 1984–2007 y el modelo WinISAREG, basado en

Penman-Monteith (FAO-56), para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_o) y del cultivo (ET_c). Los resultados mostraron que la ET_o fue mayor en Paysandú que en Colonia, especialmente entre diciembre y febrero, lo que indica una mayor presión evaporativa en el noroeste del país, haciendo que haya mayor probabilidad de insuficiencia hídrica. En condiciones de secano, la evapotranspiración real (ET_r) se vio limitada por la disponibilidad de agua en el suelo, generando un déficit hídrico que afectó el crecimiento y rendimiento de los cultivos. El estudio destaca que la combinación de alta demanda atmosférica y baja capacidad de almacenamiento hídrico de los suelos constituye una limitante importante para la producción agrícola en estas regiones, pero con un efecto más acentuado en el norte del país.

Según, Fereres y Soriano (2007) la demanda hídrica del cultivo de maíz en todo su ciclo oscila entre 450 y 700 mm. El estrés hídrico puede generar más o menos pérdidas en el rendimiento dependiendo de la etapa del cultivo donde se dé el estrés (Giménez, 2012b). Giménez (2012a, 2012b), evaluó las pérdidas en rendimiento provocando deficiencias hídricas en diferentes etapas fenológicas. Fue comprobado que deficiencias de agua durante el período crítico provocaron pérdidas de rendimiento aproximadas al 50% del potencial, mientras que el estrés hídrico en el llenado de grano generan disminuciones del rendimiento cercanas al 30%. Además, si las deficiencias hídricas fueron en la etapa vegetativa y el período crítico provocan un descenso del rendimiento de hasta el 56%. Debido a esto, es de suma importancia la gestión eficiente del riego, considerando los momentos de mayor demanda, optimizando así el uso del recurso hídrico, por lo que resulta indispensable conocer los requerimientos hídricos para cada etapa.

Villaú (s.f.) determina el periodo de máxima sensibilidad al estrés hídrico como es el de polinización y fecundación, en el cual de haber déficit hídrico se puede alcanzar una pérdida total de rendimiento del cultivo. En cuanto a la fase de llenado de grano, la consecuencia de falta de agua durante este periodo es la reducción del tamaño de granos en la punta de las espigas en pro de favorecer aquellos que se encuentran sobre la base, arrastrando también una reducción en el peso específico de los granos.

2.3 NITRÓGENO EN MAÍZ

El nitrógeno cumple un papel central a nivel interno en el maíz, lo que después se ve reflejado en el crecimiento y la productividad, al participar directamente en los principales procesos fisiológicos. Según Asibi et al. (2019), este nutriente es un

componente estructural esencial de proteínas, clorofila, ácidos nucleicos y enzimas involucradas en el metabolismo fotosintético. Una adecuada nutrición nitrogenada en híbridos con un alto consumo de nitrógeno retrasando la senescencia de hojas, permitiendo mantener una alta tasa fotosintética y un índice de área foliar activo durante un período más prolongado (Borrell & Hammer 1998, como se cita en Asibi et al., 2019), promoviendo así una mayor producción de materia seca. Cuando el nitrógeno es absorbido por la planta, este se incorpora inicialmente en los tejidos vegetativos (hojas y tallos) y lo que resulta en una mayor fosa reproductiva, lo que afecta directamente al rendimiento (Halvorson et al. 2004, como se cita en Asibi et al., 2019).

La eficiencia fisiológica del nutriente en el cultivo en cuestión depende tanto de su absorción y asimilación como de la capacidad de la planta para redistribuir internamente durante las etapas más críticas en el ciclo. Existen enzimas clave como la nitrato reductasa (NR) y la glutamina sintetasa (GS), las cuales son reguladoras de los procesos de asimilación, cuya actividad determina la conversión del nitrógeno inorgánico en compuestos orgánicos utilizables. Cuando hay insuficiencias en el suministro de nitrógeno, la actividad enzimática se ve reducida y disminuye la síntesis de proteínas y clorofila, acelerando la senescencia foliar y comprometiendo la fotosíntesis durante el período luego de la floración, reduciendo el llenado de los granos (Asibi et al., 2019).

La deficiencia de nitrógeno es una limitante para obtener rendimientos potenciales y por lo tanto es necesario lograr eficiencia en el uso del mismo (Dabalá, 2009). Según Ciampitti et al. (2013), cuando se da la ocurrencia de la floración femenina (en medio del periodo crítico), el cultivo de maíz absorbe aproximadamente el 70% del nitrógeno total requerido durante el ciclo.

En nuestro país es extendida la práctica de diferir y fraccionar la fertilización de este nutriente en dos momentos del ciclo: A la siembra y en V6, para los cuales existen distintos niveles críticos de N-NO₃ siendo estos 25 ppm y 16-20 ppm respectivamente (Quincke et al., 2008). El nivel crítico de nutriente se define como “el valor por encima del cual el nitrógeno es suficiente y no hay que fertilizar al cultivo” (García Lamothe, s.f., p. 1). Quincke et al. (2008) añaden que con un rendimiento logrado de 6000 kg/ha la remoción en grano es de 88 kg de nitrógeno, es decir 14,7 kg N/ton. de grano. Este manejo (fertilización en V6) presenta la desventaja de pérdidas por lixiviación, desnitrificación, volatilización y escorrentía debida a la escasa capacidad de absorción en función de la cantidad fertilizada en el estadio de V6. Bajo este manejo el riesgo de aplicación si esta no viene acompañada por la situación climática favorable es muy elevado y la posibilidad de corrección en otro momento es reducida, haciendo que el

cultivo presente deficiencias durante el ciclo del cultivo y el nitrógeno límite el rendimiento alcanzable (Canzani, 2022).

Perdomo et al. (2008, como se cita en Armand Ugon y Ferrari, 2018) mencionan que se requieren 275 Kg N/ha para producir 12 toneladas de MS/ha, lo que equivale a un aproximado de 22,9 kg N por tonelada de materia seca producida de grano. El mismo trabajo cita un estudio de Ciampitti et al. (2013) donde se halló valores menores de requerimiento de nitrógeno, los cuales variaron entre 14 y 18 Kg N ha⁻¹ por tonelada de materia seca de grano.

En el estudio realizado por Muhammad et al. (2022) en China durante la zafra 2020/2021 se evaluaron diferentes dosis de nitrógeno bajo dos regímenes hídricos, alto (80% de capacidad de campo) y bajo (60% de capacidad de campo). Los resultados mostraron que el suministro reducido de agua no compromete el crecimiento del maíz, sino que permitió mantener una adecuada acumulación de biomasa aérea y radicular, mostrando un rendimiento de grano similar al observado bajo alto riego. Asimismo, los autores reportaron que la eficiencia de uso del nitrógeno fue mayor en los tratamientos de bajo riego, alcanzando su máximo con la dosis de 200 kg N ha⁻¹, mientras que dosis más elevadas (300 y 350 kg N ha⁻¹) redujeron significativamente la eficiencia como era de esperarse. Estos hallazgos evidencian que la combinación de riego limitado y niveles moderados de nitrógeno constituye una estrategia efectiva para optimizar simultáneamente el rendimiento y la eficiencia del uso del nutriente.

Existen estrategias que mejoran la eficiencia en el uso del nitrógeno para los cultivos. Por un lado, el fraccionamiento del nutriente es una práctica muy efectiva y consiste en aplicar el nitrógeno en más momentos que en una fertilización convencional (a la siembra y en V6) durante el ciclo fenológico. Por lo general se distribuye una proporción inicial en siembra o emergencia, y el resto en estadios vegetativos intermedios (V8–V12) o próximos a la floración. Este manejo permite una mayor correspondencia entre la curva de absorción de nitrógeno del cultivo y su disponibilidad en el suelo, reduciendo pérdidas por procesos de volatilización y desnitrificación (Armand Ugon & Ferrari, 2018).

Para García (2008), resulta esencial mejorar la eficiencia de las fertilizaciones para reducir los costos de producción, buscando minimizar las pérdidas de nitrógeno de los fertilizantes nitrogenados. Las pérdidas por volatilización, además de otros mecanismos de los que ya se habló, en el caso de cultivos de verano como el maíz pueden ser muy importantes. Por otro lado, Marchesi de León (2000) agrega que el fraccionamiento no solo aumenta la eficiencia si no que propone fraccionar para

aumentar el desarrollo inicial del cultivo y suministrar nitrógeno en el momento de mayor demanda.

Para evaluar el efecto de la fertilización nitrogenada en la tasa y duración del llenado de granos en maíz, Cordi et al. (1997) en INTA Balcarce realizaron un ensayo al respecto. El experimento se llevó a cabo bajo siembra directa, sin limitaciones de agua ni fósforo. Los niveles de nitrógeno para los diferentes tratamientos fueron: 0, 70 y 210 kg ha⁻¹, todos aplicados en presiembra. Se midió el peso de granos por tercio de espiga, la tasa de llenado, la duración del llenado efectivo y la duración de la fase lag. Los resultados arrojaron que la deficiencia de nitrógeno redujo la duración del periodo de llenado efectivo en aproximadamente 7 días y la duración del período lag en cerca de 2 días, sin afectar la tasa de llenado, lo cual permite inferir que el peso individual de granos fue mayor con dosis de fertilización mayores. El peso promedio de los granos se asoció significativamente con la relación fuente-destino, la cual se relaciona directamente con el nitrógeno acumulado en la biomasa aérea. Por lo tanto, bajo estas condiciones, mayores dosis de nitrógeno inciden favorablemente en una mayor biomasa aérea y, a su vez, el periodo de llenado de grano es más extenso, sin que se vea afectada la tasa de llenado.

Profundizando un poco más acerca del efecto del nitrógeno en los componentes de rendimiento, Barrios y Basso (2018) evaluaron dicha relación además de la calidad del grano en un experimento en seis híbridos de maíz. El estudio se llevó a cabo bajo condiciones de campo abierto. Se utilizaron cuatro niveles de fertilización nitrogenada: 0, 100, 150 y 200 kg N ha⁻¹, aplicados en dos fraccionamientos (a la siembra y 30 días después) junto con 35 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y 60 kg ha⁻¹ de K₂O.

Las variables evaluadas fueron: longitud y diámetro de espiga, número de hileras por mazorca, peso de mil granos, rendimiento total y composición química del grano. Los resultados mostraron que el número de hileras por mazorca se vio en aumento significativamente ante incrementos en la dosis de nitrógeno, lo que permite inferir una influencia directa del nitrógeno sobre la formación de granos en los híbridos evaluados. Asimismo, también se observaron diferencias significativas en el PMG ante aumentos en la fertilización. Particularmente, la dosis de 150 kg ha⁻¹ de nitrógeno fue la mejor en subir el rendimiento, aunque la respuesta varió según el tipo de híbrido. El estudio destaca que la fertilización nitrogenada tiene un impacto positivo sobre los componentes del rendimiento, así como mejoras en la estructura de la mazorca.

Singh et al. (2025) realizaron un ensayo de campo en la India, bajo condiciones de secano, para evaluar el efecto del fraccionamiento de la fertilización nitrogenada

sobre el rendimiento de grano y la eficiencia de uso del nitrógeno (NUE) en maíz. El experimento se hizo con una dosis recomendada de nitrógeno (RDN) constante en tres esquemas de aplicación: una única aplicación al momento de la siembra, dos fraccionamientos (50 % a la siembra y 50 % a los 25 días) y tres fraccionamientos (33 % a la siembra, 33 % a los 25 días y 34 % a los 50 días).

Los resultados mostraron que el rendimiento aumentó a medida que el fraccionamiento era mayor, con incrementos promedio del 8 % y 13 % para los esquemas de dos y tres aplicaciones, respectivamente, en comparación con la aplicación única. Además, se observó valores altos de clorofila foliar más constantes durante el llenado de grano, junto con mejoras en la eficiencia de uso del nitrógeno y una reducción en la lixiviación de nitratos. Esto sugiere que el fraccionamiento permite una mejor sincronización entre la oferta de nitrógeno y la demanda del cultivo (Singh et al., 2025).

Otro trabajo elaborado por Tovar Hernández et al. (2022), se realizó en dos localidades contrastantes de la región pampeana argentina: Balcarce (Buenos Aires) y Oliveros (Santa Fe). Se evaluó cuatro dosis de nitrógeno 50, 100, 150 y 200 kg N ha⁻¹ y cuatro fuentes: urea convencional, urea con inhibidor de volatilización (NBPT), urea con inhibidor de nitrificación (DMPP), y nitrato de amonio calcáreo. La fertilización se hizo en estadios vegetativos tempranos (V4-V6), y las mediciones efectuadas fueron: rendimiento de grano, eficiencia de uso del nitrógeno (EUN), recuperación aparente del nutriente, y contenido de nitrógeno en planta.

El estudio arrojó como resultados que el maíz respondió de manera significativa al incremento de las dosis de nitrógeno en la localidad de Balcarce. A medida que se aumentó la dosis desde 50 hasta 200 kg N ha⁻¹, hubo una mejora progresiva en el rendimiento, alcanzando el máximo con la dosis más elevada. Esta respuesta sugiere una alta demanda de nitrógeno en ese ambiente, posiblemente asociada a condiciones edafoclimáticas favorables y una mayor capacidad de respuesta del cultivo. La eficiencia de uso del nitrógeno, como era de esperarse, mostró una tendencia decreciente con el aumento de la dosis, ya que, a mayores niveles de nitrógeno aplicado, la fracción aprovechada por el cultivo tiende a disminuir, el aumento de rendimiento es menor en proporción al nutriente. Sin embargo, el incremento en rendimiento compensa esta pérdida relativa de eficiencia. En Oliveros, por el contrario, no se observaron diferencias significativas entre las dosis fertilizadas, lo que indica que el ambiente no presentó una limitación marcada por nitrógeno. Este hecho puede ser explicado por otros factores edafoclimáticos de poca relevancia para este informe (Tovar Hernández et al., 2022).

En el estudio de Delgado et al. (2004) donde se trata la acumulación de materia seca, absorción de nitrógeno, fósforo y potasio en maíz bajo diferentes condiciones de fertilización nitrogenada, se observó que la producción de biomasa hasta la floración depende principalmente del crecimiento vegetativo inicial. De esto se desprende que las diferencias entre tratamientos con y sin nitrógeno de acumulación de materia seca no resultaron significativas en esa etapa. Los autores señalan que las diferencias en la acumulación de materia seca se manifiestan con mayor acentuación posterior a la floración, en el momento en que la demanda de nitrógeno aumenta para sostener la fotosíntesis y el llenado de granos. Debido a esto, se resalta que la época de aplicación del nutriente es crítica: si el suministro se restablece antes de la floración, la planta puede compensar parcialmente el déficit, mientras que restricciones durante la fase reproductiva afectan más severamente el rendimiento final por las mayores demandas del nutriente en dicho periodo.

2.4 INTERACCIÓN ENTRE AGUA Y NITRÓGENO EN MAÍZ

Resulta importante para el desarrollo de este trabajo destacar los efectos de la interacción entre el agua y la aplicación de nitrógeno en el cultivo de maíz. Respecto a dicha relación entre estos factores, en un estudio realizado en México por Díaz Valdés et al. (2014) evaluaron eficiencia en el uso del agua (EUA), índice de cosecha (IC) y rendimiento de grano (Yg). Se aplicaron cuatro riegos: uno a presiembra y otros tres durante el cultivo, mientras que el nitrógeno el 30% se aplicó en presiembra y el 70% restante fue aplicado en V8. Los resultados arrojaron que la EUA tuvo una respuesta favorable frente a la aplicación de nitrógeno, obteniéndose un óptimo en los tratamientos de 300 kg de N ha⁻¹ y 450 kg de N ha⁻¹. Esta variable decreció en el tratamiento de 600 kg de N ha⁻¹. En cuanto al IC este indicador sigue la tendencia mencionada anteriormente, en la que se logran los mayores IC en los tratamientos de dosis 300 y 450, con una caída en el tratamiento de dosis 600 pero sin cambios en el nivel de significancia. A dosis 0 y 150 no se observaron diferencias significativas. Existieron diferencias significativas en el rendimiento de grano para las dosis aplicadas de nitrógeno. El rendimiento en función de la dosis de nitrógeno presentó una respuesta de tipo cuadrática al incremento de las mismas. Dosis de 300 y 450 kg de N ha⁻¹ no presentaron diferencias significativas en el rendimiento. El testigo (0 N) obtuvo el menor número de grano por unidad de superficie (4.920 kg/ha⁻¹), los tratamientos de 600 y 150

kg de N ha⁻¹ si bien fueron superior al testigo, los rendimientos siguieron la tendencia observada en las variables evaluadas mencionadas anteriormente, en el caso del rendimiento este decreció de 0,96 a 4,06 Mg ha⁻¹, respectivamente en relación al tratamiento de 450 kg de N ha⁻¹.

El estudio llevado a cabo por Pedrol et al. (2008) en INTA Oliveros evaluó la respuesta del cultivo de maíz ante diferentes dosis de fertilización nitrogenada bajo las condiciones hídricas de riego suplementario y seco, con el objetivo de analizar la producción de grano, la EUA y del nitrógeno en función del nivel hídrico. El ensayo se llevó a cabo con una dosis constante de 0, 60, 120, 180 y 240 kg N ha⁻¹ aplicada en todos los tratamientos. El régimen de riego se dictó entre el 20 de diciembre y el 10 de febrero, suministrando un total de 166 mm en dicho período. Los resultados mostraron que el rendimiento de grano fue mayor en promedio bajo riego, alcanzando 10,9 t ha⁻¹, en contraste con 8,4 t ha⁻¹ en seco, observándose diferencias significativas. La EUA fue de 15,5 kg grano/mm en riego y 13,2 kg grano/mm en seco. En cuanto a la eficiencia en el uso del nitrógeno, se observó un valor de 21,6 kg grano/kg N bajo riego y 31,1 kg grano/kg N bajo seco. Además, se alcanzaron diferencias de hasta 3000 kg/ha a favor del riego, entre tratamientos con igual dosis, pero diferente régimen hídrico. Estos resultados indican que, si bien el riego mejora el rendimiento absoluto del cultivo, el maíz en condiciones de seco presenta una mayor eficiencia relativa en el uso del nitrógeno aplicado. No se obtuvieron incrementos significativos, en ambos regímenes, cuando fue superada la dosis de 180 kg ha⁻¹ de N. No se detectó una interacción entre el nivel hídrico y las dosis de nitrógeno aplicadas. Esto indica que las diferentes dosis aplicadas afectaron el rendimiento y sus componentes de manera similar bajo riego y en seco.

Acevedo Cruz (2020) estudió la respuesta en rendimiento del maíz al riego suplementario durante el periodo crítico y la fertilización nitrogenada. Dicho ensayo fue desarrollado en Perú y consistió en 4 tratamientos: 150 kg de N/ha⁻¹ en seco, 150 kg de N/ha⁻¹ con riego, 300 kg de N/ha⁻¹ en seco y 300 kg de N/ha⁻¹ con riego. Las fertilizaciones fueron efectuadas 50% de las mismas a V3 y el resto a V6. El riego fue evaluado para el periodo crítico y fue estimado en 94,078 mm/mes. Los rendimientos no fueron estadísticamente diferentes bajo riego y seco para la dosis de 150 kg/ha de nitrógeno, pero sí para la dosis de 300 kg/ha de nitrógeno. La variación del rendimiento de maíz estuvo explicada, según este trabajo, en un 97% (R²) por el riego, la aplicación de nitrógeno y la interacción entre estos factores. Es por esto que Acevedo Cruz (2020) concluye que la interacción entre el riego y la dosis de 300 kg/ha de nitrógeno aplicados en dos momentos (V3 y V6) aumentan el rendimiento.

2.5 FERTIRRIEGO EN MAÍZ

El fertirriego se puede definir como la aplicación de fertilizantes solubles a través del agua de riego (Obreza & Morgan, 2008). En Uruguay, la aplicación de este método ha sido más extendida en regiones como el litoral oeste, donde existen sistemas de riego presurizado, y en cultivos como el maíz y la soja bajo riego suplementario. Según Maresma et al. (2024), esta técnica mejora la distribución del nitrógeno, y facilita la sincronización de este nutriente con las necesidades del cultivo, esto lleva a mejoras significativas de la eficiencia del uso del nitrógeno y a reducciones de las pérdidas de nitrógeno, tanto lixiviación como volatilización.

En Uruguay, el desarrollo del riego por pivote ha favorecido la adopción del fertirriego, particularmente con el uso de nitrógeno. Gigena et al. (2023), evaluó en la Estación Experimental "Dr. Mario A. Cassinoni" la aplicación de diferentes dosis de N en varios fraccionamientos (V6 y V10) con urea sólida y líquida fertirregada, su efecto en el rendimiento en grano, la materia seca de maíz y la relación entre ambas. Esta última resultó ser lineal; es decir que, a mayores niveles de materia seca, el rendimiento también aumenta, con un valor de R^2 de 0,89. Asimismo, los aumentos en la materia seca estuvieron asociados al aumento en las dosis de N, siendo las dosis evaluadas de 100 kg N/ha y 200 kg N/ha. Contando con esta información, es posible afirmar que, a mayores dosis de nitrógeno en el cultivo de maíz, mayor será el rendimiento en grano con esas dosis, sin embargo, se debería haber evaluado dosis mayores para evaluar las dosis del nutriente con las que el rendimiento deja de aumentar. Se evalúan también las relaciones entre los aumentos de materia seca y los componentes del rendimiento en maíz: número de granos y peso de los mismos. Las tendencias son lineales y con elevados R^2 , lo cual apoya lo mencionado anteriormente, estos componentes determinan el rendimiento. Los resultados mostraron aumentos en los rendimientos, con mejoras en la absorción de nitrógeno, especialmente cuando se realizaron aplicaciones divididas durante las etapas críticas del desarrollo del cultivo. En el experimento se observó una respuesta lineal creciente del rendimiento en función de la dosis de N.

Asimismo, INIA ha desarrollado herramientas como Optifert-N, con el propósito de ajustar la fertilización nitrogenada de acuerdo con el estado nutricional del cultivo y su crecimiento en el corto plazo. Aunque esta herramienta fue concebida inicialmente para cereales de invierno como el trigo, su enfoque resulta aplicable al maíz y puede integrarse sin inconvenientes en esquemas de fertirriego (Berger et al., 2024).

Canzani (2022), comparó en condiciones de riego, el rendimiento de maíz con las mismas dosis de nitrógeno (150 kg de N) pero con diferentes números de fraccionamientos en la aplicación de fertilizante. Los resultados muestran que cuando la dosis se aplica en 8 momentos del ciclo desde V2 a VT, los rendimientos son significativamente superiores que cuando se fracciona en 2 momentos (V2 y V6). Este hecho se justifica por las pérdidas ya mencionadas, las cuales ocurren con mayor frecuencia cuando las dosis por aplicación son grandes. Aplicaciones sucesivas durante el periodo V6 a VT permite acompañar mejor los requerimientos de nitrógeno durante el ciclo del cultivo, minimizando la probabilidad de que este nutriente quede expuesto a pérdidas y haciendo que haya una absorción más eficiente.

Du et al. (2024) en Yangling (China), comparó cuatro tratamientos: fertirriego por goteo con nitrógeno fraccionado (DF), fraccionado con fuente de nitrógeno sólida con riego por inundación (SF), riego por goteo con fertilización en una sola aplicación a la siembra (DI) y riego y fertilización convencionales también con una sola fertilización a la siembra (CK). En todos los tratamientos se utilizó la misma dosis total de nitrógeno de 210 kg N ha⁻¹, para el DF y SF se repartió 20% a la siembra, 30% en plántula, 30% en floración y panojamiento y 20% en llenado de grano. El fertirriego por goteo con mayor distribución aumentó el rendimiento de grano promedio en un 34% frente al tratamiento convencional con una sola aplicación (CK). Los autores atribuyen este aumento al suministro de nitrógeno y agua atendiendo a la demanda del cultivo que eleva el índice de área foliar, contenido de clorofila y tasa fotosintética; mayor acumulación y traslocación de biomasa; y un llenado de grano más prolongado que incrementó el peso de 100 granos. El segundo mejor tratamiento fue el SF mostró mejoras respecto a CK, el rendimiento fue menor al de DF por la menor eficiencia en la sincronización del agua y los nutrientes, mientras que DI, pese a superar a CK por el efecto del riego por goteo, quedó limitado al no distribuir el nitrógeno en el tiempo.

Ning et al. (2019), encontraron que el fraccionamiento en exceso de la fertilización nitrogenada en maíz, bajo fertirriego, incrementa las pérdidas al ambiente de este nutriente tanto por lixiviación de nitratos como por emisiones de óxido nitroso, en especial cuando las aplicaciones no se ajustan a la demanda real del cultivo. Los autores destacan que la repetida disponibilidad de nitrógeno en el suelo, combinada con altos niveles de riego, favorece la acumulación de nitrógeno mineral y su pérdida por lavado, reduciendo la eficiencia de uso del nutriente. Estos resultados subrayan la necesidad de limitar el número de aplicaciones y considerar la sincronización de la demanda del cultivo con la oferta de nitrógeno para minimizar pérdidas y mejorar la sostenibilidad del sistema productivo.

Los antecedentes bibliográficos revisados evidencian la falta de información sobre el uso de fertirriego en maíz en Uruguay. Esto reafirma la validez de llevar adelante investigaciones como las que se presentan en este trabajo final de grado, que aspira a contribuir a llenar este vacío.

2.6 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. A mayores dosis de nitrógeno aplicadas durante el ciclo del cultivo de maíz bajo riego suplementario, mayor será el rendimiento en grano.
2. A un mayor número de fraccionamientos de cada dosis de nitrógeno mediante fertirriego se incrementará el rendimiento en grano del cultivo de maíz bajo riego suplementario.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

Este experimento se realizó en la Estación Experimental “Dr. Mario A. Cassinoni” (EEMAC) de Facultad de Agronomía de la Universidad de la República, ubicada sobre ruta 3, Km 363, en el Departamento de Paysandú, Uruguay, (32° 23’ S; 58° 02’ W), durante el ejercicio 2023/2024. El ensayo se realizó en el campo experimental de riego en un suelo que se clasifica como Brunosol sub-éutrico típico correspondiente a la unidad San Manuel, ubicado sobre la formación Fray Bentos (Altamirano et al., 1976). Los datos de las características físicas e hidrológicas se presentan a continuación en la tabla 1.

Tabla 1
Características físicas e hidrológicas del suelo

Hzte	Profundidad (cm)	Dap. (g cm-3)	PMP (mm)	CC (mm)	CAAD (mm)
A	0-20	1,25	28	54	26
B	20-70	1,34	150	235	85

Nota. Hzte: horizonte Dap.: densidad aparente. CC: capacidad de campo. PMP: punto de marchitez permanente. CAAD: capacidad de almacenaje de agua disponible.

3.2 CARACTERÍSTICAS DEL EXPERIMENTO

El cultivar que se utilizó fue NS 7621 VIPTERA 3, el cual es tolerante al glifosato y glufosinato de amonio e incorpora el evento VIPTERA 3, proporcionando control de lepidópteros. La fecha de siembra fue el 30/10/2023, las fechas de los estados fenológicos más relevantes se detallan a continuación.

Tabla 2
Fechas de las etapas fenológicas más relevantes

Etapa fenológica	Fecha
VE	8/11
V6	13/12
V8	22/12
V10	2/1
V12	10/1
R1	20/1
R6	15/3

La población objetivo fue de 100000 plantas/ha, con una distancia entre hileras de 0,52 m. Se utilizó una mayor cantidad de semillas a la siembra para asegurar el número de plantas objetivo y posteriormente en V2 se realizó un raleo manual para alcanzar la población objetivo.

El control de malezas se realizó en dos momentos: el 23/11 hubo una primera aplicación de glifosato mientras que el 5/12 se aplicó una mezcla de glifosato y 2,4D. No fueron necesarias aplicaciones de insecticidas para el control de plagas. Se realizó análisis de suelo a la siembra el cual determinó una concentración inicial de NO₃ de 10 ppm. Además, no fue necesario aplicar ni fósforo ni potasio.

3.3 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

El experimento consistió en la aplicación de cuatro dosis de nitrógeno (0, 100, 150 y 200 UN/ha), con diferentes cantidades de fraccionamientos.

Tal como se puede ver en la Tabla 3, se trató de 14 tratamientos. Uno de ellos se realizó en secano mientras que el resto se realizó bajo riego suplementario. En cuanto a los momentos de aplicación de nitrógeno estos variaron entre V6 y V12.

El diseño experimental trató de un experimento con una metodología de diseño en bloques completamente al azar que se conformó por 3 bloques, con una dimensión de 43,7 m de largo y 6 m de ancho por bloque, cada uno con 14 parcelas de 3,12 m x 6 m. Cada uno de los tratamientos se presentan la siguiente tabla:

Tabla 3
Caracterización de tratamientos del ensayo

Tratamiento	Condición hídrica (Riego/secano)	Dosis de Nitrógeno (UN/ha)	Estado Fenológico*
T1	S	0	-
T2	R	0	-
T3	R	100	V6
T4	R	100	V6+V10
T5	R	100	V6+V10+V12
T6	R	100	V6+V8+V10+V12
T7	R	150	V6
T8	R	150	V6+V10
T9	R	150	V6+V10+V12
T10	R	150	V6+V8+V10+V12
T11	R	200	V6
T12	R	200	V6+V10
T13	R	200	V6+V10+V12
T14	R	200	V6+V8+V10+V12

Nota. * Estado fenológico en el cual se aplica la/s dosis de nitrógeno del tratamiento.

El manejo del riego fue el mismo para todos los tratamientos bajo riego durante todo el ciclo. El método de riego fue por goteo, para ello cada hilera contó con un lateral con emisores ubicados a 0,20 m en cada cinta y reguladores de presión a nivel del sistema de riego a modo de entregar un caudal constante de 1,49 l/h. 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).

3.4 DETERMINACIONES EFECTUADAS

3.4.1 Determinaciones a campo

Durante el ciclo del cultivo se realizaron diversas mediciones a campo. En primer lugar, se evaluó la materia seca acumulada del maíz al inicio y al final del período crítico en cada tratamiento. Para ello, se realizaron cortes de plantas en un metro lineal, registrándose el peso fresco y el peso seco de una planta. La determinación del peso seco se efectuó mediante secado en estufa a 60 °C durante 48 horas o hasta alcanzar peso constante. En el momento de la cosecha, se delimitaron 12 metros lineales centrales de cada parcela, donde se realizó el conteo de plantas y espigas. Posteriormente, se cosecharon por separado las espigas correspondientes a 10 metros y a 2 metros lineales, con el fin de evaluar los sub-componentes del rendimiento sólo en las espigas de 2 metros lineales. Además, se procedió al corte y pesado de las plantas de esos 12 metros lineales para determinar la acumulación de materia seca a cosecha, registrándose el peso fresco y el peso seco de las plantas. La determinación del peso seco se efectuó mediante secado en estufa a 60 °C durante 48 horas o hasta alcanzar peso constante.

3.4.2 Determinaciones en laboratorio

Posteriormente a la cosecha, a partir de los 12 metros lineales de espigas recolectados en el campo, se determinó el peso fresco de chalas y marlos. Luego, mediante una submuestra secada en estufa a 60 °C, se obtuvo el peso seco de estos componentes. Por otro lado, a partir de las muestras correspondientes a 2 metros lineales, se evaluaron los sub-componentes del rendimiento: número de hileras por espiga (NHE), número de granos por hilera (NGH) y largo de espiga (cm).

Asimismo, sobre la muestra de 12 metros lineales, se determinó el peso de grano, la humedad del mismo —la cual se utilizó para corregir el rendimiento a una humedad estándar de 14%— y el peso de mil granos (PMG). A partir de estos datos, se estimaron el rendimiento de grano (kg/ha), la materia seca total (kg/ha), el índice de cosecha (IC) y el número de granos por unidad de superficie (m²).

3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico se realizó utilizando el software InfoStat versión estudiantil 2020. Los datos fueron analizados mediante un análisis de varianza (ANOVA) y, cuando se detectaron efectos significativos, las medias fueron comparadas mediante la prueba de Tukey al 5% de probabilidad.

Para contemplar adecuadamente la estructura del experimento, los datos fueron analizados mediante un modelo lineal general con efectos anidados, según la siguiente estructura:

$$Y_{ijkl} = \mu + B_i + R_j + D_{k(j)} + F_{l(k(j))} + \varepsilon_{ijkl}$$

donde:

Y_{ijkl} = variable respuesta

μ = media general

B_i = efecto del i -ésimo bloque ($i = 1, 2, 3$)

R_j = efecto de la condición hídrica (secano o riego)

$D_{k(j)}$ = efecto de la k -ésima dosis de nitrógeno anidada dentro de la condición hídrica

$F_{l(k(j))}$ = efecto del l -ésimo fraccionamiento anidado dentro de cada dosis y condición hídrica

ε_{ijkl} = error experimental

Con el objetivo de evaluar hipótesis específicas relacionadas con los esquemas de fraccionamiento dentro de cada dosis de nitrógeno, se realizaron contrastes ortogonales sobre el factor "Tratamiento". Los contrastes fueron definidos de manera que los coeficientes sumaran cero, fueran mutuamente ortogonales y representaran comparaciones biológicamente relevantes (por ejemplo: una aplicación vs aplicaciones fraccionadas; dos aplicaciones vs tres o cuatro; tres vs cuatro aplicaciones). En todos los casos se adoptó un nivel de significancia de $\alpha=0,05$

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

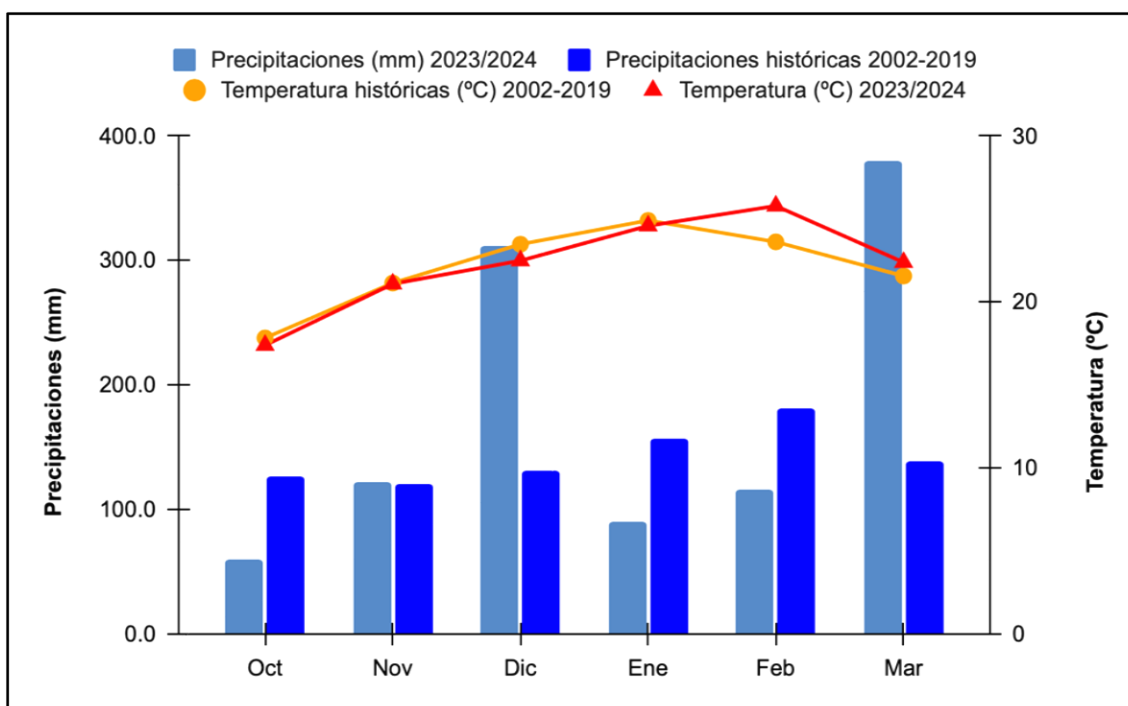
4.1 CONDICIONES CLIMÁTICAS

4.1.1 Temperatura y precipitaciones

En la Figura 1, se muestran la acumulación de precipitaciones (PP) y la temperatura media mensual durante la zafra 2023-2024 al igual que las PP medias acumuladas mensualmente y las temperaturas medias mensuales de la serie histórica de datos del periodo 2002-2022, obtenidas de los registros de la estación meteorológica de la Estación Experimental Mario A. Cassinoni (EEMAC).

Figura 1

Registro histórico y del año agrícola 2023/2024 en EEMAC de temperatura y precipitaciones



En cuanto a las PP, fueron un 155% superiores al promedio histórico durante los meses de diciembre y marzo. A finales de febrero y durante marzo ocurrió el período de llenado de grano, etapa de gran relevancia en la definición del rendimiento. Por otro lado, las PP fueron inferiores a los registros históricos durante enero y febrero, con una

disminución aproximada del 40%, coincidiendo con el período crítico de determinación del rendimiento. Estos meses se caracterizan por presentar la mayor demanda atmosférica, registrándose además las temperaturas máximas promedio más elevadas en febrero durante el verano 2023/2024. Como ya fue señalado, las deficiencias hídricas en esta etapa pueden generar reducciones de rendimiento de hasta un 50% (Giménez, 2012a, 2012b). Estas condiciones afectaron particularmente al tratamiento testigo en seco.

Resulta de suma importancia analizar las PP ocurridas entre el 13/12 y el 10/01, período que abarca desde los estadios V6 hasta V12 del cultivo, durante el cual se realizaron las aplicaciones de fertirriego. La PP acumulada en este intervalo fue de 226 mm; sin embargo, las lluvias se concentraron hasta el 18/12. Estas abundantes PP coincidieron con el estadio V6, lo que podría haber ocasionado pérdidas significativas de nitrógeno por lixiviación, reduciendo su disponibilidad para la absorción por parte del cultivo.

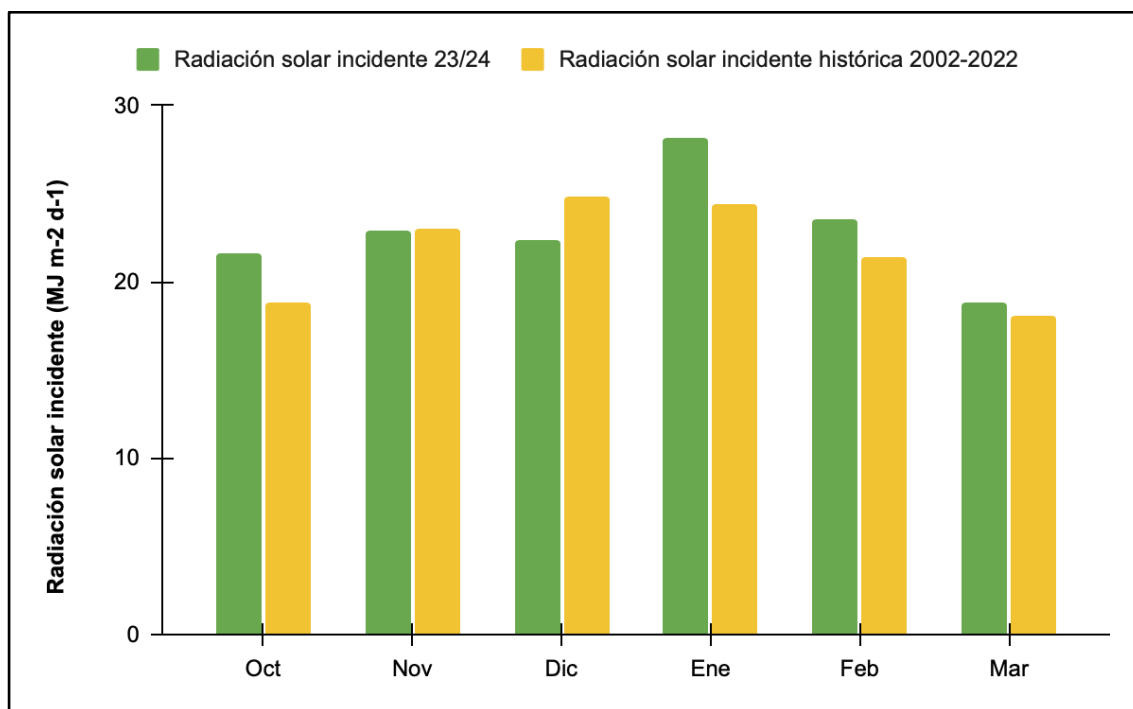
En cuanto a la temperatura, se observa que durante la etapa vegetativa los valores registrados fueron inferiores al promedio histórico, principalmente durante diciembre, lo que habría evitado el acortamiento de esta fase y la formación de plantas de menor tamaño, tal como señalan Walne y Reddy (2022). A partir del mes de febrero, las temperaturas comenzaron a incrementarse, situándose por encima del promedio histórico, coincidiendo con el inicio del período de llenado de grano.

4.1.2 Radiación solar

En la Figura 2, se muestran valores mensuales promedios de radiación solar incidente diaria durante la zafra 2023-2024 y los valores medios mensuales de radiación solar incidente para la serie histórica 2002-2022, en función de los registros de la estación meteorológica de la Estación Experimental Mario A. Cassinoni (EEMAC).

Figura 2

Registro histórico y del año agrícola 2023/2024 en EEMAC de radiación solar diaria incidente promedio



Se observa que, durante el período analizado (octubre de 2023 a marzo de 2024), la radiación solar media diaria incidente fue similar al promedio histórico ($21 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$). Las mayores coincidencias se registraron en el mes de noviembre, con un valor de $23 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. Sin embargo, se destaca la diferencia observada en los meses de enero y febrero, donde la radiación incidente superó en 4 y 3 $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, respectivamente, los valores históricos. Este período coincidió con la etapa crítica de determinación del rendimiento.

4.2 EVOLUCIÓN DE MATERIA SECA

4.2.1 Evolución de la materia seca (kg/ha) según dosis de nitrógeno aplicada y condición hídrica (secano/riego)

En la Tabla 4 se presenta la acumulación de MS en distintos momentos del ciclo del cultivo en función de las dosis de nitrógeno aplicado y la condición hídrica del tratamiento.

Tabla 4

Materia seca (MS) según dosis de nitrógeno (N) aplicada y condición hídrica en tres momentos

Dosis de N (UN/ha)	Condición hídrica (Riego o seco)	MS al inicio de PC (kg/ha)	MS al final de PC (kg/ha)	MS a cosecha (kg/ha)
0	S	4182	8180 d	13.108 d
0	R	4581	9277 c	15.102 c
100	R	4363	10.744 b	17.951 b
150	R	4221	12.168 ab	19.710 ab
200	R	3715	13.316 a	21.017 a

Nota. Las letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas (p -valor $<0,05$). S: seco R: Riego.

En cuanto a la acumulación de materia seca, al inicio del PC no se observaron diferencias significativas entre tratamientos. Esta respuesta está en concordancia con lo planteado por Delgado et al. (2004), quienes señalan que la producción de biomasa hasta la floración depende principalmente del crecimiento vegetativo inicial, repercutiendo en diferencias menores por respuesta al nitrógeno en esta etapa. En este sentido, se puede inferir que al inicio del PC la disponibilidad de nitrógeno aún no había generado diferencias significativas en la acumulación de biomasa entre tratamientos. Tampoco se evidenciaron diferencias entre 0R y seco por lo que se puede denotar que no hubo efecto del riego sobre la materia seca acumulada hasta el inicio del PC. Esta ausencia de efecto del riego se puede deber a las PP registradas durante el mes de diciembre (Figura 1), donde se ubicó temporalmente la mayoría de la etapa previa al PC (Tabla 2).

Hacia el final del PC se observaron diferencias significativas entre dosis de nitrógeno. En comparación con el testigo en seco (0S), los aumentos son de hasta un 63%, alcanzado en el tratamiento 200R. Resulta importante destacar que los incrementos en el rendimiento no son proporcionales con los incrementos de la dosis de nitrógeno. Al comparar el tratamiento 100 UN con 0R, el incremento en biomasa es aproximadamente tres veces menor que el observado al aplicar 200 UN respecto a 0R. Esto indica una mayor eficiencia de acumulación de materia seca por unidad de nitrógeno aplicado (20 kg MS/UN) al final del PC, agregando 200 UN frente a hacerlo con 100 UN (15 kg MS/UN), tomando como base la materia seca lograda para 0R. Analizando la respuesta observada para el tratamiento de 150 UN, este presentó un

comportamiento intermedio sin diferenciarse significativamente ni de 200 UN ni tampoco de 100 UN. En tanto, el testigo en secano (0S) presentó el menor valor (8180 kg MS/ha), diferenciándose estadísticamente del testigo con riego (0R).

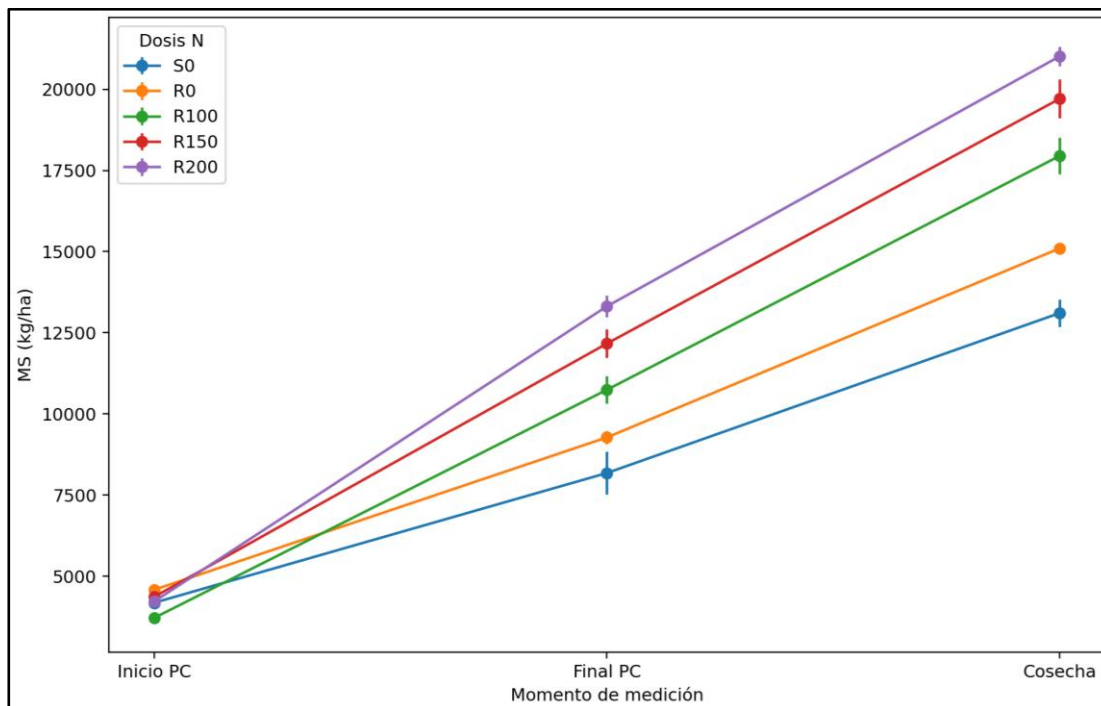
Para la materia seca a la cosecha se observó un patrón similar: Los aumentos de acumulación con respecto al testigo (0S) son de hasta 60% con 200 UN aplicadas, al igual que lo observado al final del PC. Sin embargo, esta dosis no presentó diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0,05$) con respecto a 150 UN, aunque se observó una tendencia hacia valores superiores. Aplicar 100 UN llevó a un incremento de la materia seca respecto a 0R de 19%, mientras que duplicar la dosis de nitrógeno (200 UN) llevó a un incremento de 17% con respecto a 100 UN.

Borrell y Hammer (1998, como se cita en Asibi et al., 2019), señalan que el nitrógeno actúa retrasando la senescencia foliar, lo que permite mantener una alta tasa fotosintética y, en consecuencia, promover una mayor producción de materia seca, en concordancia con lo observado en este estudio. En este sentido, las marcadas diferencias en la acumulación de materia seca entre el inicio y el final del período crítico (PC), acentuadas por las mayores dosis de nitrógeno, respaldan la idea de que durante esta etapa las demandas del nutriente son máximas. Esto coincide con lo reportado por Ciampitti et al. (2013), quienes indican que aproximadamente el 70% del nitrógeno total es absorbido durante este período. Asimismo, los resultados obtenidos concuerdan con Cordi et al. (1997), quienes señalan que la biomasa aérea acumulada se incrementa con el aumento en las dosis de nitrógeno.

En la Figura 3 se muestra la acumulación de materia seca medida en tres momentos del ciclo y su variación respecto a las diferentes dosis de nitrógeno evaluadas. Se observa que el incremento de la dosis de nitrógeno se asocia con una mayor acumulación de biomasa, particularmente a partir del final del PC y hasta cosecha. Esto demuestra, nuevamente, cómo este nutriente afecta directamente el crecimiento del cultivo en especial a partir de la floración, donde la planta demanda una mayor cantidad de asimilados debido a la formación y crecimiento de los granos.

Figura 3

MS según dosis de nitrógeno aplicada y condición hídrica (secano vs riego) en tres momentos



4.2.2 Evolución de la materia seca (kg/ha) según la dosis de nitrógeno (UN/ha) aplicada y el número de fraccionamientos

Con el objetivo de evaluar el efecto del número de fraccionamientos de nitrógeno dentro de cada dosis, se aplicaron contrastes ortogonales que permitieron comparar esquemas de una, dos, tres y cuatro aplicaciones. La Tabla 5 presenta la significancia de estos contrastes sobre la materia seca en los diferentes momentos del ciclo del cultivo.

Tabla 5

MS evaluada en tres momentos según nivel de nitrógeno (UN/ha) aplicado y número de fraccionamientos

	MS Inicio PC (kg/ha)	MS Final PC (kg/ha)	MS Cosecha (kg/ha)
Cte 1	ns	ns	ns
Cte 2	ns	**	**
Cte 3	*	ns	ns
Cte 4	ns	ns	ns
Cte 5	ns	ns	ns
Cte 6	ns	ns	ns
Cte 7	**	***	***
Cte 8	***	***	***
Cte 9	***	***	***

Nota. Cte: contraste; ns: diferencia no significativa; *: tendencia ($p \leq 0,10$); **: diferencia significativa ($p \leq 0,05$); ***: diferencia altamente significativa ($p \leq 0,01$).

Cte 1: Aplicación única contra media de 2, 3 y 4 fraccionamientos (100 UN), Cte 2: 2 fraccionamientos contra media de 3 y 4 (100 UN), Cte 3: 3 fraccionamientos contra media de 4 (100 UN), Cte 4: Aplicación única contra media de 2, 3 y 4 fraccionamientos (150 UN), Cte 5: 2 fraccionamientos contra media de 3 y 4 (150 UN), Cte 6: 3 fraccionamientos contra media de 4 (150 UN), Cte 7: Aplicación única contra media de 2, 3 y 4 fraccionamientos (200 UN), Cte 8: 2 fraccionamientos contra media de 3 y 4 (200) y Cte 9: 3 fraccionamientos contra media de 4 (200 UN).

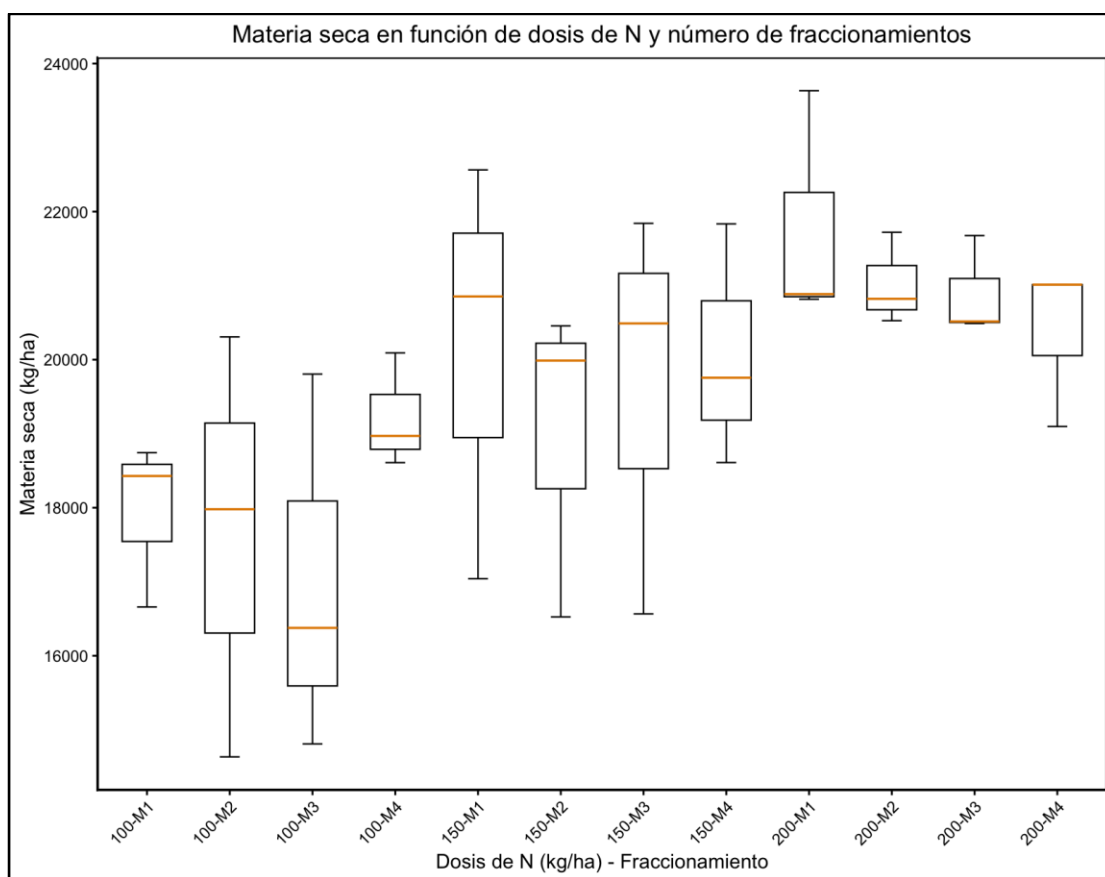
Al inicio del PC, se observa que para la dosis de 100 UN no se registraron diferencias significativas entre realizar una o dos aplicaciones en comparación con un mayor número de fraccionamientos. No obstante, se evidenció una tendencia a mayores valores de materia seca al fraccionar en cuatro aplicaciones en lugar de tres. Para la dosis de 150 UN, no se observaron diferencias significativas entre los distintos esquemas de fraccionamiento, desde una hasta cuatro aplicaciones. En el caso de 200 UN, se encontraron diferencias significativas al comparar una única aplicación con esquemas de mayor fraccionamiento. Asimismo, se registraron diferencias altamente significativas al realizar tres y cuatro aplicaciones en comparación con dos, así como entre cuatro aplicaciones respecto a tres.

Con respecto a lo evaluado al final del PC, se observa un patrón similar. En 100 UN se registraron diferencias significativas en fraccionar esta dosis en 2 aplicaciones frente a aplicar en 3 o 4 momentos, mientras que no hubo diferencias significativas entre 1 en comparación a más momentos o a fraccionar entre 3 y 4 momentos. Al igual que lo mencionado para el inicio del PC, en 150 UN no se registraron diferencias significativas en el fraccionamiento. Con dosis de 200 UN hubo diferencias altamente significativas en cada nivel de fraccionamiento.

Al analizar la biomasa a cosecha, se observa que sigue el mismo patrón que la biomasa al final del PC. Las diferencias significativas y altamente significativas registradas en esa etapa se mantienen hasta el final del ciclo del cultivo. Para dosis de 200 UN, se evidencian diferencias altamente significativas en la acumulación de materia seca entre diferentes números de fraccionamientos. Esto se presenta en la Figura 4, donde se observa que ante un mayor número de fraccionamientos de la dosis de nitrógeno la materia seca disminuye en comparación a una sola aplicación.

Figura 4

Materia seca acumulada a cosecha en función de dosis de nitrógeno y número de fraccionamientos



4.3 RENDIMIENTO EN GRANO Y COMPONENTES NUMÉRICOS PRINCIPALES

4.3.1 Rendimiento de grano (kg/ha) y componentes numéricos según dosis de nitrógeno aplicada y condición hídrica

En la Tabla 6 se presentan los rendimientos y los componentes principales del mismo (número de granos/m² y PMG), según dosis de nitrógeno aplicada y condición hídrica (secano vs riego)

Tabla 6

Rendimiento y los componentes principales según dosis de nitrógeno (N) aplicada y condición hídrica

Dosis de N (UN/ha)	Condición hídrica (Riego o seco)	Rendimiento (kg/ha)	Nº granos/m ²	PMG (g)
0	S	6.372 c	2833 c	196 c
0	R	7.086 c	2794 c	245 b
100	R	10.769 b	3457 bc	269 a
150	R	11.745 ab	4056 ab	254 ab
200	R	13.213 a	4237 a	271 a

Nota. Las letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas (p-valor <0,05).

Se observa que, entre los tratamientos 0S y 0R, si bien existe una diferencia numérica cercana a 714 kg ha⁻¹ en el rendimiento, esta no resulta estadísticamente significativa al nivel de significancia del 5%. Esto sugiere una interacción entre la disponibilidad hídrica y el nitrógeno, ya que la aplicación de riego por sí sola no condujo a incrementos significativos en el rendimiento. En este sentido, al eliminar la limitante hídrica, el nitrógeno pasó a constituirse como el principal factor limitante del rendimiento. Por otra parte, los rendimientos logrados con agregado de nitrógeno se diferencian significativamente de los que no contaron con aplicaciones. El aumento en rendimiento con agregado de nitrógeno es de hasta un 69% con respecto a 0R y 107% frente a 0S, con dosis 200 UN. A su vez, los tratamientos de 200 UN y 100 UN se diferenciaron significativamente entre sí, mientras que los tratamientos de 150 UN y 200 UN no se diferenciaron estadísticamente entre sí, aunque se puede observar una tendencia al aumento del rendimiento con mayor dosis. Con 200 UN se logró el mayor rendimiento en grano, 12% superior a 150 UN y 23% superior a 100 UN.

En cuanto al número de granos por unidad de superficie el tratamiento de 100 UN no se diferenció de los tratamientos sin agregado de nitrógeno, pero si se observa una tendencia hacia un aumento en el número de granos/m². Asimismo, el tratamiento de 150 UN no presentó diferencias significativas con 200 UN. Las diferencias en el número de granos por unidad de superficie se corresponden mayormente con las diferencias obtenidas en el rendimiento en grano.

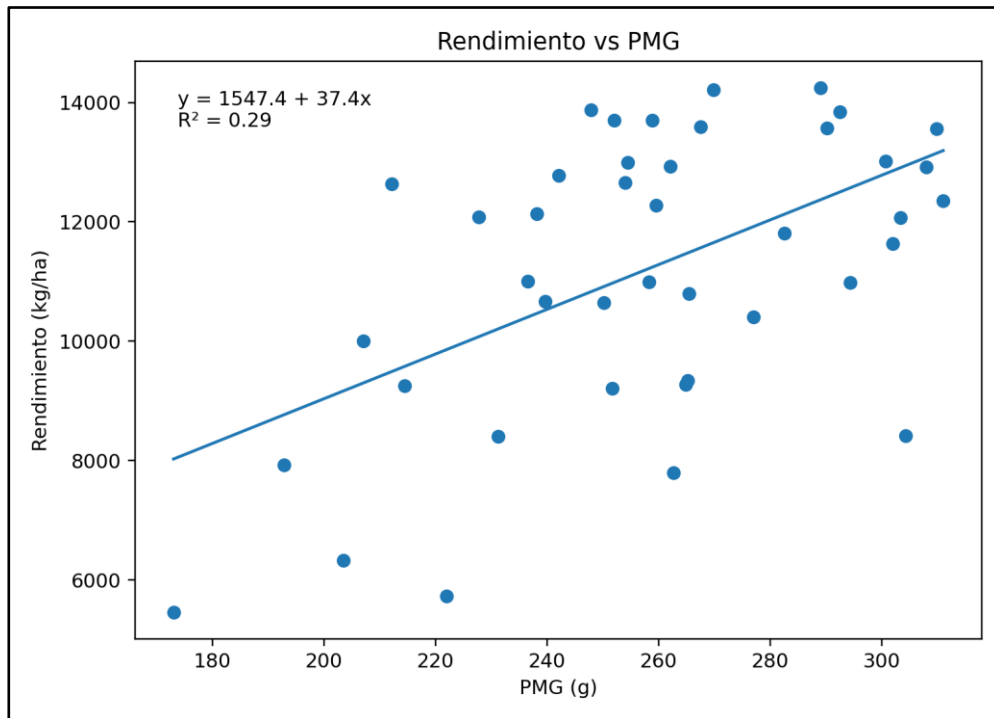
En el PMG si se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos sin nitrógeno (0S y 0R) en comparación con el número de granos/m² donde no existieron diferencias significativas, evidenciando el efecto del riego sobre el incremento en el PMG. No se presentaron diferencias significativas en el PMG entre ninguno de los tratamientos con nitrógeno mientras que si existieron diferencias entre tratamientos con y tratamientos sin nitrógeno. El tratamiento de 150 UN es estadísticamente similar al tratamiento de 0R y al de 200 UN. Esto permite entrever la relación del rendimiento con sus componentes lo cual fue mencionado por Cerrudo et al. (2020), en el que el número de granos/m² es el factor que explica en mayor medida las diferencias en el rendimiento.

El rendimiento es el resultado final de un efecto aditivo entre todos los componentes y subcomponentes. Es por esto que dosis 100 UN y 0R obtuvieron diferencias significativas en el rendimiento, con similar número de granos/m² pero presentando diferencias significativas en el PMG, evidenciando que, este componente si tiene un efecto sobre el rendimiento final.

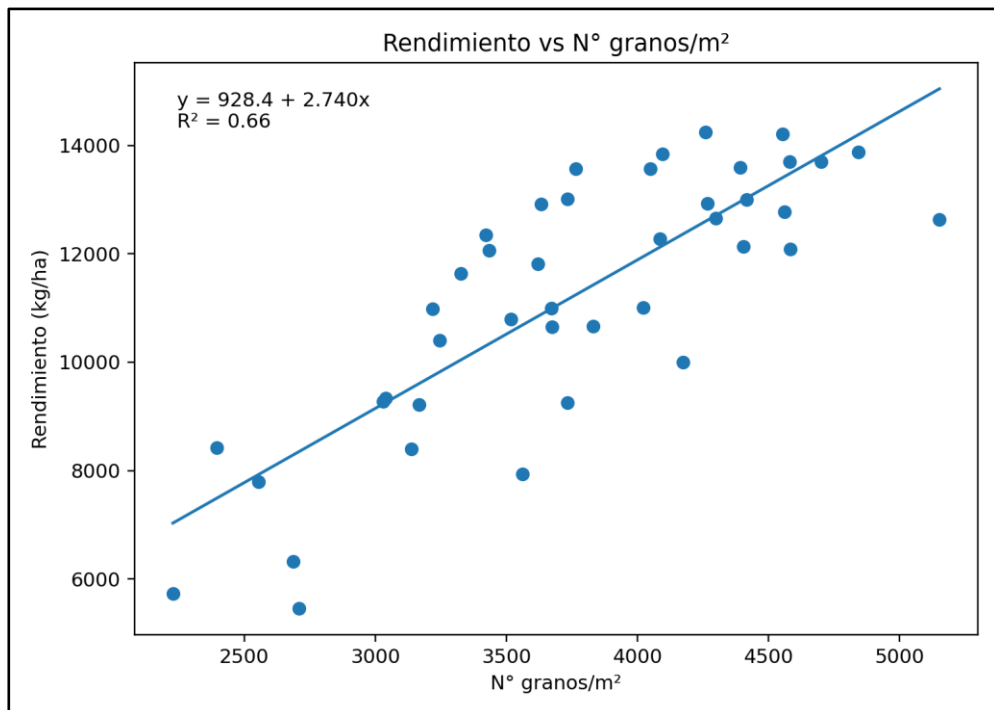
En estas Figuras 5 y 6, se presenta la correlación de los componentes principales del rendimiento con el mismo. Considerando los R² obtenidos para las líneas de tendencia, es posible afirmar que el número de granos por unidad de superficie está más asociado a las variaciones del rendimiento que el peso de los mismos, es decir que el aumento de rendimiento depende mayoritariamente del número de granos, tal como se menciona en Cerrudo et al. (2020).

Figura 5

Correlación entre el rendimiento en grano y el peso de mil granos (PMG)

**Figura 6**

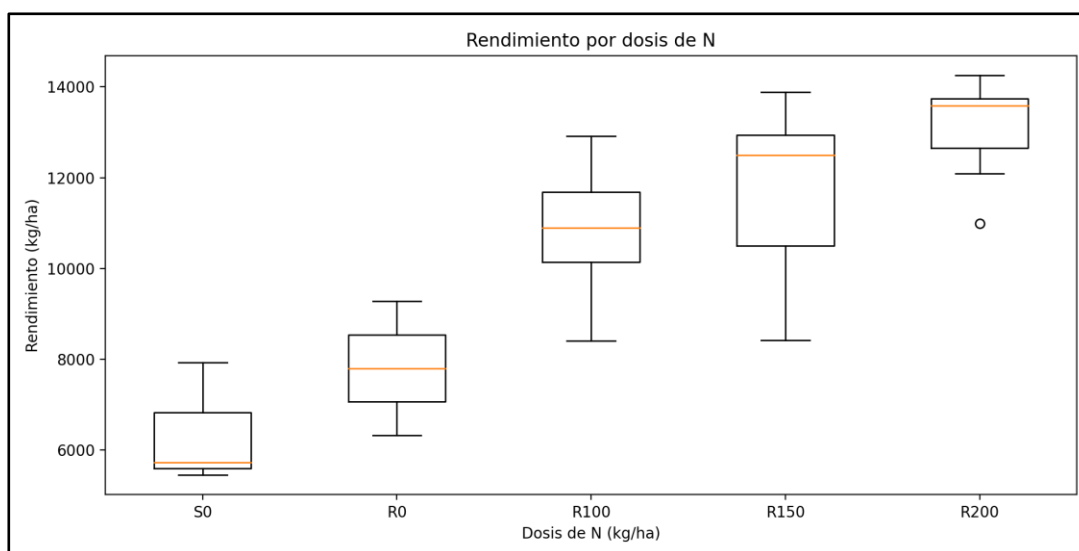
Correlación entre el rendimiento en grano y el número de granos por unidad de superficie



En la Figura 7 se muestra el rendimiento en grano según dosis de nitrógeno aplicada y condición hídrica (secano vs riego). Se observa cómo a medida que aumentan las dosis de nitrógeno aplicadas el rendimiento también lo hace, mostrando una respuesta positiva y sostenida al agregado de nitrógeno. Se observa que en la dosis de 200 UN se observa un valor atípico (outlier), correspondiente a un rendimiento inferior respecto al resto de las observaciones. Este comportamiento podría estar asociado a la acción de factores limitantes distintos al nitrógeno o a la variabilidad espacial dentro del experimento.

Figura 7

Rendimiento (kg/ha) en función de la dosis de nitrógeno (UN/ha) aplicada y condición hídrica

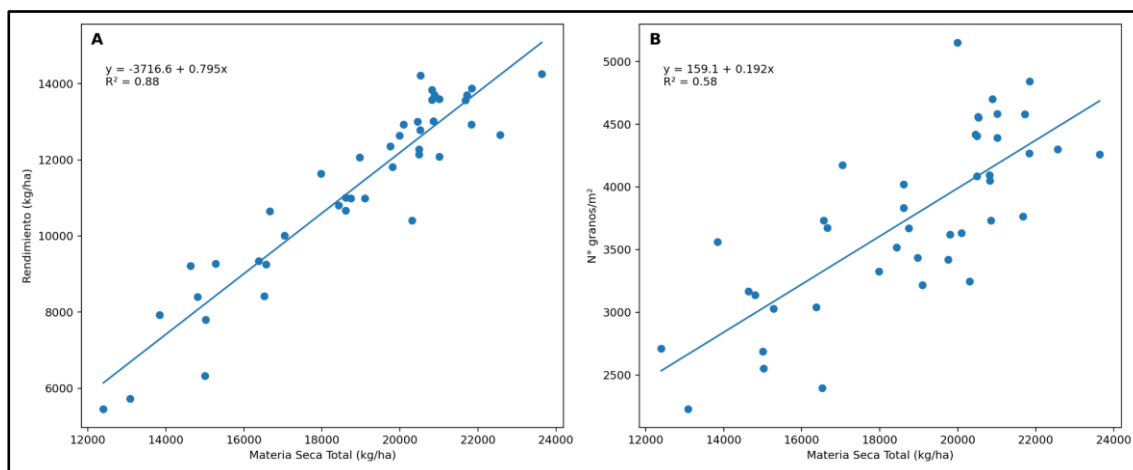


4.3.2 Relación de la materia seca (kg/ha) con el rendimiento y sus componentes numéricos principales.

En la Figura 8 se presenta la correlación entre el rendimiento en grano y el número de granos por unidad de superficie con la biomasa total producida (MS/ha).

Figura 8

Correlación entre la biomasa total con el rendimiento y con el número de granos/m²



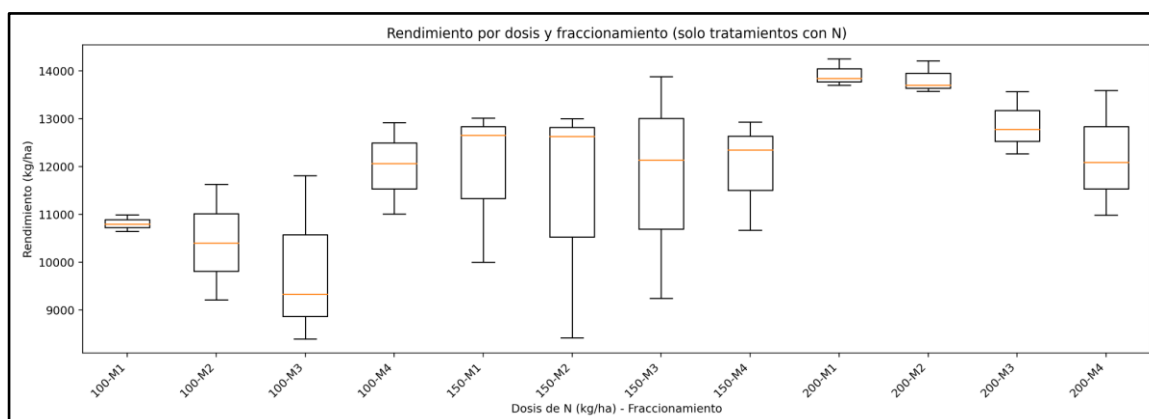
Como se puede observar en la Figura 8, en ambas gráficas existe una correlación positiva de la materia seca acumulada final con respecto al rendimiento en grano y al N° granos/m². Es decir, que, a mayor biomasa final, mayor número de granos por unidad de superficie y, por lo tanto, mayor rendimiento. En base a estos resultados podemos afirmar que el rendimiento del cultivo está fuertemente limitado por la biomasa producida, similar a lo mencionado por Walne y Reddy (2022).

4.3.3 Rendimiento en grano (kg/ha) según dosis de nitrógeno (N) aplicada y número de fraccionamientos.

En la Figura 9 se presenta el rendimiento en grano (kg/ha) en función de la dosis de nitrógeno aplicada y el número de fraccionamientos. Los resultados se muestran mediante diagramas de cajas, que permiten visualizar la distribución de los datos para cada tratamiento.

Figura 9

Rendimiento en grano en función de dosis y número de fraccionamientos del nitrógeno (N) aplicado



En términos generales, se observa una tendencia a mayores rendimientos a medida que aumenta la dosis de nitrógeno, aunque el efecto del fraccionamiento también influye en la distribución y variabilidad de los resultados. Algunos tratamientos presentan mayor dispersión, lo que indica respuestas menos uniformes, mientras que otros muestran cajas más compactas, sugiriendo mayor estabilidad en el rendimiento.

Para evaluar si estas diferencias observadas son estadísticamente significativas, se realizó un análisis de contrastes ortogonales entre los distintos niveles de nitrógeno y los esquemas de fraccionamiento. En la Tabla 7 se presenta la significancia de dichos contrastes sobre el rendimiento, el número de granos por unidad de superficie y el PMG, en función de los distintos momentos de aplicación de nitrógeno.

Tabla 7
Rendimiento en grano y los componentes principales según momentos de aplicación

	Rendimiento (kg/ha)	PMG (g)	Nº granos/m ²
Cte 1	ns	ns	ns
Cte 2	**	ns	ns
Cte 3	ns	ns	ns
Cte 4	ns	ns	ns
Cte 5	ns	*	ns
Cte 6	ns	ns	ns
Cte 7	***	***	***
Cte 8	***	***	***
Cte 9	***	***	***

Nota. Cte: contraste; ns: diferencia no significativa; *: tendencia ($p \leq 0,10$); **: diferencia significativa ($p \leq 0,05$); ***: diferencia altamente significativa ($p \leq 0,01$).

Cte 1: Aplicación única contra media de 2, 3 y 4 fraccionamientos (100 UN), Cte 2: 2 fraccionamientos contra media de 3 y 4 (100 UN), Cte 3: 3 fraccionamientos contra media de 4 (100 UN), Cte 4: Aplicación única contra media de 2, 3 y 4 fraccionamientos (150 UN), Cte 5: 2 fraccionamientos contra media de 3 y 4 (150 UN), Cte 6: 3 fraccionamientos contra media de 4 (150 UN), Cte 7: Aplicación única contra media de 2, 3 y 4 fraccionamientos (200 UN), Cte 8: 2 fraccionamientos contra media de 3 y 4 (200) y Cte 9: 3 fraccionamientos contra media de 4 (200 UN).

En cuanto al rendimiento, se observan diferencias significativas al fraccionar 100 UN en dos en comparación con esquemas de tres o cuatro aplicaciones. Esta diferencia de rendimiento podría atribuirse a aplicaciones de nitrógeno en etapas más tardías como V12, coincidente con el inicio del PC, lo que aseguraría una adecuada disponibilidad de nitrógeno en esta etapa clave. Esto coincide con lo mencionado por Ciampitti y Vyn (2012) quienes remarcan que la disponibilidad de nitrógeno durante el período crítico y cuajado de granos en maíz es determinante para la supervivencia de los óvulos fecundados y, en consecuencia, para el número final de granos por espiga.

Para dosis de 150 UN, no se observan diferencias en el rendimiento según nivel de fraccionamiento. En cuanto a la dosis 200 UN se pueden observar diferencias altamente significativas en todos los contrastes tanto en el rendimiento como en sus componentes. Es decir, que el aumento de fraccionamientos del nitrógeno siempre presenta diferencias altamente significativas para la dosis 200 UN. Al observar la Figura 9, se puede concluir que estas diferencias altamente significativas se explican por una disminución del rendimiento, y no por incrementos de este. Es decir, un mayor número de fraccionamientos de la dosis 200 UN lleva a una disminución del rendimiento en grano.

En el caso de 100 UN, los resultados muestran que, numéricamente con una sola aplicación se logra un rendimiento más estable (evidenciado por una caja de menor tamaño). En cambio, con dos o tres fraccionamientos el rendimiento tiende a disminuir. Por el contrario, con cuatro fraccionamientos se observa un incremento del rendimiento, aunque acompañado de una mayor variabilidad.

Para la dosis de 150 UN, se observa un rendimiento moderadamente constante, con medianas más altas respecto a 100 UN, pero también con mayor variabilidad (cajas más grandes y líneas de dispersiones más extensas).

Para la dosis de 200 UN, como ya fue mencionado, el aumento en el número de fraccionamientos lleva a una reducción en el rendimiento. Además, se observa que, a medida que aumentan los fraccionamientos, también lo hace la variabilidad de los rendimientos. No obstante, a esta dosis y con uno o dos fraccionamientos del nitrógeno, los rendimientos promedios alcanzados fueron los más altos.

La respuesta observada puede ser explicada en parte dada la importancia de la dosis de nitrógeno en V6. A medida que a una misma dosis de nitrógeno se incrementan los fraccionamientos, la cantidad de nitrógeno en V6 es cada vez menor, lo que podría explicar en parte las disminuciones en el rendimiento. Esto es respaldado por Fassio et al. (1998) que destaca el momento V6 como punto de aceleración del crecimiento del

cultivo, por lo que es esperable que el cultivo demande grandes cantidades de N. En tanto, Nielsen (2003), afirma que la espiga se forma desde los estadios de V5 y V6 hasta poco antes de la floración, en el cual se define el número de hileras y el largo de espiga. Esto último también explica la importancia del bienestar nutricional del cultivo en el estadio V6 y su relación con el componente de rendimiento del número de granos que afecta directamente el rendimiento final. Por el contrario, Ciampitti et al. (2013), mencionan que el cultivo al momento de la floración femenina absorbe el 70 % de los requerimientos de nitrógeno mientras que Ciampitti y Vyn (2012) remarcan que la disponibilidad de nitrógeno durante el período crítico y cuajado de granos en maíz es determinante para la supervivencia de los óvulos fecundados y, en consecuencia, para el número final de granos por espiga. En este trabajo al fraccionarse más la misma dosis, se terminaron aplicando una mayor cantidad de nitrógeno en etapas más tardías como V10 y V12 (aplicaciones más cercanas a R1). Sin embargo, esto tuvo una respuesta positiva solo con dosis bajas de 100 UN.

Los resultados obtenidos son similares a los de Gigena et al. (2023), donde se observó la misma tendencia de disminución de rendimiento a medida que aumentaban los fraccionamientos con dosis altas de 200 UN. Una forma de explicar estas disminuciones de rendimiento es analizando las PP, las cuales fueron elevadas en el mes de diciembre (Figura 1). A través de un análisis más detallado de la distribución de las PP en diciembre se obtuvo la información de que el 71% de las PP se concentraron en una semana (12/12-19/12), momento en el cual el cultivo se encontraba en el estadio V6 (Tabla 2). Además, el resto de las PP de este mes se acumularon previo a esta semana. Esto sugiere que pudieron existir pérdidas importantes por lixiviación en V6, lo que llevo a que, si adicionalmente la dosis aplicada era menor, por un mayor fraccionamiento de la misma, la disponibilidad de nitrógeno para el cultivo habría sido afectada en mayor medida en comparación a aplicaciones únicas. En síntesis, el aumento en el número de fraccionamientos solo generó incrementos del rendimiento a dosis bajas (100 UN) mientras que, a dosis medias no se observaron incrementos en rendimiento dentro de cada dosis de nitrógeno. En términos generales, una o dos aplicaciones resultaron suficientes para maximizar el rendimiento, mientras que mayor número de fraccionamientos no aportaron incrementos adicionales e incluso tendieron a aumentar la variabilidad. Para dosis altas de 200 UN, una o dos aplicaciones fueron suficientes para alcanzar los mayores rendimientos, mientras que un mayor número de fraccionamientos del nitrógeno condujo a disminuciones en el rendimiento.

4.4 SUBCOMPONENTES NUMÉRICOS DEL RENDIMIENTO

4.4.1 Subcomponentes numéricos y largo de espiga según dosis de nitrógeno aplicada y condición hídrica

En la Tabla 8 se presentan los resultados obtenidos para los subcomponentes del rendimiento y el largo de espiga en función de la dosis de nitrógeno aplicado y la condición hídrica.

Tabla 8

Subcomponentes del rendimiento según dosis de nitrógeno (N) aplicada y condición hídrica (secano vs riego)

Dosis de N (UN/ha)	Condición hídrica (Riego o seco)	Nº esp/pl	Nº hil/esp	Nº granos/hil	Nº grano/esp	Largo esp (cm)
0	S	1,07	15,1	27,0	409,1	10,9 b
0	R	1,07	15,0	27,1	405,3	11,1 b
100	R	1,06	14,7	27,3	402,2	11,2 b
150	R	1,13	14,8	28,9	429,4	11,9 ab
200	R	1,1	15,0	30,3	456,2	12,4 a

No se encontraron diferencias significativas en ninguno de los subcomponentes de rendimiento. Solo se registraron diferencias estadísticas en el largo de espiga. Para los tratamientos 100R, 0R y 0S se obtuvieron largos de espiga estadísticamente similares, mientras que en 150 UN se observa una tendencia hacia mayor largo que los tratamientos mencionados. En cuanto a 200 UN, es el tratamiento que presenta mayor largo de espiga.

Al no registrarse diferencias significativas en los subcomponentes, esto parece indicar que las diferencias observadas en el rendimiento principalmente por diferencias en el número de granos por unidad de superficie está dada por un efecto aditivo de cada uno de los mismos.

4.4.2 Subcomponentes numéricos según dosis de nitrógeno (N) aplicada y número de fraccionamientos.

En la Tabla 9 se presenta la significancia para los contrastes ortogonales para los subcomponentes del rendimiento y el largo de espiga.

Tabla 9

Evaluación de subcomponentes del rendimiento en función de contrastes ortogonales

	N° esp/pl	N° hil/esp	N° granos/hil	N° granos/esp	Largo esp (cm)
Cte 1	ns	*	ns	Ns	ns
Cte 2	*	ns	ns	Ns	ns
Cte 3	ns	**	ns	Ns	**
Cte 4	ns	ns	ns	Ns	ns
Cte 5	ns	ns	ns	Ns	ns
Cte 6	**	ns	ns	Ns	ns
Cte 7	***	***	***	***	***
Cte 8	***	***	***	***	***
Cte 9	***	***	***	***	***

Nota. Cte: contraste; ns: diferencia no significativa; *: tendencia ($p \leq 0,10$); **: diferencia significativa ($p \leq 0,05$); ***: diferencia altamente significativa ($p \leq 0,01$).

Cte 1: Aplicación única contra media de 2, 3 y 4 fraccionamientos (100 UN), Cte 2: 2 fraccionamientos contra media de 3 y 4 (100 UN), Cte 3: 3 fraccionamientos contra media de 4 (100 UN), Cte 4: Aplicación única contra media de 2, 3 y 4 fraccionamientos (150 UN), Cte 5: 2 fraccionamientos contra media de 3 y 4 (150 UN), Cte 6: 3 fraccionamientos contra media de 4 (150 UN), Cte 7: Aplicación única contra media de 2, 3 y 4 fraccionamientos (200 UN), Cte 8: 2 fraccionamientos contra media de 3 y 4 (200) y Cte 9: 3 fraccionamientos contra media de 4 (200 UN).

Para dosis de 100 UN, se observó una tendencia al fraccionar más de una vez y diferencias significativas al aumentar el número de fraccionamientos de 3 a 4, en cuanto a modificaciones en el número de hileras por espiga. Esta información no concuerda con el trabajo de Rameau y Van den Dorpel (2016) en el que no varía el número de hileras por espiga y se asegura que este depende del componente genético del híbrido

más que las condiciones ambientales. Además, se registra una diferencia significativa en el largo de espiga entre fraccionar 3 o 4 veces.

Con dosis de 150 UN, aplicar el nitrógeno en 4 fraccionamientos frente a 3 es el único de los contrastes con dicha dosis que presenta diferencias significativas en algún subcomponente: el número de espigas por planta.

En cuanto a la dosis 200 UN se reportan diferencias altamente significativas en los contrastes en todos los subcomponentes evaluados. Estas diferencias como ya fue visto en la Figura 9, es en detrimento del rendimiento.

5 CONCLUSIONES

En cuanto a la primer hipótesis planteada, de que a mayores dosis de nitrógeno en el cultivo de maíz bajo riego suplementario, mayor es el rendimiento en grano, la misma se debe aceptar. Se obtuvieron diferencias significativas en el rendimiento en grano con incrementos en el agregado de nitrógeno. Los incrementos en el rendimiento estuvieron dados principalmente por incrementos en el número de granos por unidad de superficie, evidenciando su mayor importancia en comparación con el PMG en la concreción del rendimiento.

En cuanto la segunda hipótesis, la cual menciona que, a mayor número de fraccionamientos de una misma dosis de nitrógeno, mayor será el rendimiento de maíz bajo riego, esta debe ser rechazada. El fraccionamiento no tuvo un efecto concreto en el rendimiento. Los resultados obtenidos indican que el aumento en el número de fraccionamientos no necesariamente mejora el rendimiento y, en ciertos casos, puede incluso reducirlo. Este efecto se evidencia especialmente en dosis altas (200 UN), donde el incremento en el número de aplicaciones condujo a una disminución significativa del rendimiento.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo Cruz, A. (2020). Evaluación del rendimiento de maíz amiláceo (*Zea mays* L.) bajo condiciones de riego por goteo y la fertilización nitrogenada. *Aporte Santiaguino*, 13(2), 260-273. <https://doi.org/10.32911/as.2020.v13.n2.739>
- Altamirano, A., Da Silva, H., Duran, A., Echeverria, A., Panario, D., & Puentes, R. (1976). *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay: Vol. 1. Clasificación de suelos*. MAP.
- Andrade, F., Neiff, N., & Andrade, J. (2023). Crecimiento del cultivo. En F. Andrade, M. E. Otegui, A. Cirilo & S. Uhart (Eds.), *Ecofisiología y manejo del cultivo de maíz* (pp. 73-106). Maizar. https://www.maizar.org.ar/documentos/cultivo%20de%20maiz_version%20digital.pdf
- Andrade, F., Vega, C., Cirilo, A., & Otegui, M. E. (2023). Determinación del número de granos. En F. Andrade, M. E. Otegui, A. Cirilo & S. Uhart (Eds.), *Ecofisiología y manejo del cultivo de maíz* (pp. 107-130). Maizar. https://www.maizar.org.ar/documentos/cultivo%20de%20maiz_version%20digital.pdf
- Armand Ugon, M. del P., & Ferrari, G. A. (2018). *Respuesta a la fertilización nitrogenada en maíz bajo riego* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/20623>
- Asibi, E. A., Chai, Q., & Coulter, J. A. (2019). Mechanisms of nitrogen use in maize. *Agronomy*, 9(12), Artículo e775. <https://doi.org/10.3390/agronomy9120775>
- Baethgen, W. E. (1996). El nitrógeno en los sistemas agrícola-ganaderos. En A. Morón, D. Martino & J. Sawchik (Eds.), *Manejo y fertilidad de suelos* (pp. 9-22). INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/8451/1/111219240807135249-Baethgen-p.9-22.pdf>
- Baethgen, W. E., & Terra, R. (2010). El riego en un clima cambiante. En Grupo de Desarrollo del Riego (Coord.), *Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas* (pp. 7-18). INIA. <https://www.inia.uy/sites/default/files/publications/2024-06/Libro-1-Seminario-Internacional-de-Riego-en-Cultivos-y-Pasturas.pdf>

- Barrios, M., & Basso, C. (2018). Efecto de la fertilización nitrogenada sobre componentes del rendimiento y calidad nutricional del grano de seis híbridos de maíz. *Bioagro*, 30(1), 39-48. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612018000100004
- Berger, A., Baráibar, N., Maltese, N., Lattanzi, F., Núñez, A., Rubio, V., & Mazzilli, S.R. (2024). OPTIFERT-N: Nueva herramienta para optimizar la fertilización nitrogenada en trigo. *Revista INIA*, (77), 42-46. <https://www.inia.uy/sites/default/files/publicaciones/2024-07/Revista-INIA-77-Junio-2024-10.pdf>
- Borrás, L., & Gambín, B. L. (2010). Trait dissection of maize kernel weight: Towards integrating hierarchical scales using a plant growth approach. *Field Crops Research*, 118(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.04.010>
- Boschi, F., & Cuadro, M. (2023). Previsibilidad en la producción de maíz: Conocimiento de la genética, tecnología de riego, modelos de previsión climática y estrategias de manejo. *Revista del Plan Agropecuario*, (187), 42-45. www.planagropecuario.org.uy/uploads/magazines/articles/203_3181.pdf
- Canzani, F. (2022). *Estudio del fraccionamiento de la fertilización nitrogenada* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/32956>
- Caorsi, M. L., Cruz, G., Terra, R., & Astigarraga, L. (2018). Variación de la precipitación y la ocurrencia de sequías en la cuenca lechera del SW del Uruguay en el período 1939 – 2011. *Agrociencia (Uruguay)*, 22(1), 116-123. <https://doi.org/10.31285/AGRO.22.1.12>
- Ceretta, S., & Sawchik, J. (2006). Soja: Resultados experimentales de la “Red de ensayos en chacra, AUSID-CALMER-INIA”, zafra 2005-2006. En S. Ceretta & J. Sawchik (Eds.), *Presentación de resultados Convenio INIA-AUSID-CALMER* (pp. 1-8). <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/15615/1/ad-467.pdf>
- Cerrudo, A., Di Matteo, J., Fernandez, E., Robles, M., Olmedo Pico, L. O., & Andrade, F. H. (2013). Yield components of maize as affected by short shading periods and thinning. *Crop and Pasture Science*, 64(6), 580-587. <https://doi.org/10.1071/cp13201>

- Cerrudo, D., Hernández, M., Tollenaar, M., Vega, C. R. C., & Echarte, L. (2020). Kernel number response to plant density in tropical, temperate, and tropical × temperate maize hybrids. *Crop Science*, 60(1), 381-390. <https://doi.org/10.1002/csc2.20077>
- Ciampitti, I. A., Camberato, J. J., Murrell, S. T., & Vyn, T. J. (2013). Maize nutrient accumulation and partitioning in response to plant density and nitrogen rate: I. Macronutrients. *Agronomy Journal*, 105(3), 783-795. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0467>
- 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>
- Cordi, M., Uhart, S. A., Echeverría, H. E., & Sainz Rozas, H. (1997, 1 de octubre). *Efecto de la disponibilidad de nitrógeno sobre la tasa y duración del llenado de granos en maíz* [Contribución]. VI Congreso Nacional de Maíz y III Reunión Suramericana de Maiceros, Pergamino. https://www.researchgate.net/publication/311710260_Efecto_de_la_disponibilidad_de_nitrogeno_sobre_la_tasa_y_duracion_del_llenado_de_granos_en_maiz
- Cuitiño, M. J., & Cardozo, V. (2018). Maíz: Clasificación y usos potenciales. *Revista INIA*, (54), 32-35. <https://www.inia.uy/sites/default/files/publications/2024-10/revista-INIA-54-setiembre-2018p2-35.pdf>
- Dabalá, L. (2009). *Guía de Siembra Directa*. AUSID. <http://ausid.com.uy/wp-content/uploads/2021/12/Guia-de-siembra-directa-Web.pdf>
- Delgado, R., Núñez, M. C., & Velásquez, L. (2004). Acumulación de materia seca, absorción de Nitrógeno, Fósforo y Potasio por el maíz en diferentes condiciones de manejo de la fertilización nitrogenada. *Agronomía Tropical*, 54(4), 447-460. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2004000400002
- Díaz Valdés, T., Partidas Ruvalcaba, L., Suárez Fernández, Y. E., Lizárraga Jiménez, R., & López López, Á. (2014). Uso eficiente del agua y producción óptima en maíz, con el uso de cuatro dosis de nitrógeno. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(1), 32-36. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542014000100005&lng=es&tlng=es

- Du, R., Li, Z., Xiang, Y., Sun, T., Liu, X., Shi, H., Li, W., Huang, X., Tang, Z., Lu, J., Chen, J., & Zhang, F. (2024). Drip fertigation increases maize grain yield by affecting phenology, grain filling process, biomass accumulation and translocation: A 4-year field trial. *Plants*, 13(14), Artículo e1903.
<https://doi.org/10.3390/plants13141903>
- Ernst Romero, J. M. (2020). *Alternativas de fertilización nitrogenada en maíz bajo riego por pivote central* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri.
<https://hdl.handle.net/20.500.12008/32534>
- Fassio, A., Carriquiry, A. I., Tojo, C., & Romero, R. (1998). *Maíz: Aspectos sobre fenología*. INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2844/1/111219240807135855.pdf>
- Fereres, E., & Soriano, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2), 147-159.
<https://doi.org/10.1093/jxb/erl165>
- García, A. (2008). Manejo de la fertilización en Girasol, Maíz y Soja: Hipótesis de trabajo de las líneas de investigación actuales. En S. Ceretta (Ed.), *Día de Campo Cultivos de Verano* (pp. 1-3). INIA.
<https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/16298/1/UY.INIA.2008.-SAD.n.526.Dia-de-Campo.-Cultivos-de-Verano.pdf;verano>
- García Lamothe, A. (s.f.). *Aspectos generales del nitrógeno en el ciclo del cultivo*. INIA.
<http://planagropecuario.org.uy/publicaciones/uedy/Publica/Cart11/Cart11.htm>
- Gigena, L. P., Viana, F., & Uribe, M. (2023). *Efecto del fertirriego en el cultivo de maíz* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri.
<https://hdl.handle.net/20.500.12008/43987>
- Giménez, L. (2012a). *¿Cuánto estamos perdiendo por no regar cultivos en Uruguay?* [Contribución]. 2º Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas, Paysandú. https://www.researchgate.net/publication/286439161_Cuanto_estamos_perdiendo_por_no_regar_cultivos_en_Uruguay
- Giménez, L. (2012b). Producción de maíz con estrés hídrico provocado en diferentes etapas de desarrollo. *Agrociencia (Uruguay)*, 16(2), 11-18.
<https://doi.org/10.31285/AGRO.17.544>

- Giménez, L. (2017). Respuesta del maíz y la soja a diferentes disponibilidades hídricas en diferentes etapas del desarrollo. *Agrociencia (Uruguay)*, 21(2), 90-77. <https://doi.org/10.31285/AGRO.21.2.10>
- Giménez, L., & García Petillo, M. (2011). Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*, 15(2), 47-56. <https://doi.org/10.31285/AGRO.15.598>
- Giménez, A., Castaño, J. P., Baethgen, W. E., & Lanfranco, B. (2009). *Cambio climático en Uruguay, posibles impactos y medidas de adaptación en el sector agropecuario*. INIA.
- Hill, C. B., & Li, C. (2022). Genetic improvement of heat stress tolerance in cereal crops. *Agronomy*, 12(5), Artículo e1205. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051205>
- Instituto Nacional de Estadística. (2024). *Anuario estadístico nacional 2024*. <https://www.gub.uy/instituto-nacional-estadistica/comunicacion/publicaciones/anuario-estadistico-nacional-2024-volumen-n-101/anuario-estadistico>
- Madeira de Quadros, W. (2019). *Efectos de la fertilización primavera-estival nitrógeno-fosfatada y del riego suplementario en la productividad y eficiencia de uso de nutrientes del campo natural* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/29801>
- Marchesi De León, E. (2000). La siembra directa en el Uruguay. *Revista Plan Agropecuario*, (90). https://www.planagropecuario.org.uy/publicaciones/revista/R90/R90_48.htm
- Maresma, Á., Guardia, G., Vallejo, A., & Carrasco, I. (2024). Eficiencia del nitrógeno y producción de maíz en sistemas de fertirriego por goteo. *Tierras Agricultura*, (328), 36-40. https://www.eurochemiberia.com/assets/images/wp-content/uploads/sites/9/2024/04/2024_EficienciaNitrogenoMaiz_TE328.pdf
- Martínez, D. (2015). Ecofisiología del cultivo del maíz. En J. A. Garay & J. C. Colazo (Eds.), *El cultivo de maíz en San Luis* (pp. 7-31). INTA. https://www.researchgate.net/publication/320805480_Ecofisiologia_del_cultivo_de_maiz

- Methol, M., & Pizzanelli, M. (2022). Maíz y sorgo: Situación y perspectivas. En *Anuario OPYPA 2022: Análisis sectorial y cadenas productivas*. MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-opypa-2022/analisis-sectorial-cadenas-productivas/maiz-sorgo>
- Molfino, J., & Califra, A. (2001). *Agua disponible en las tierras del Uruguay: Segunda aproximación*. MGAP. [https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/Comunicaciones/Agua%20disponible%20de%20las%20Tierras%20del%20Uruguay%20\(segunda%20aproximaci%C3%B3n\).pdf](https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/Comunicaciones/Agua%20disponible%20de%20las%20Tierras%20del%20Uruguay%20(segunda%20aproximaci%C3%B3n).pdf)
- Muhammad, I., Lv, J. Z., Yang, L., Ahmad, S., Farooq, S., Zeeshan, M., & Zhou, X. B. (2022). Low irrigation water minimizes the nitrate nitrogen losses without compromising the soil fertility, enzymatic activities and maize growth. *BMC Plant Biology*, 22(1), Artículo e159. <https://doi.org/10.1186/s12870-022-03548-2>
- Nielsen, R. L. (2003). *Ear initiation & size determination in corn*. Purdue University. <https://www.agry.purdue.edu/ext/corn/news/articles.03/EarSize-0609.html>
- Nielsen, R. L. (2025). *Tassel emergence & pollen shed*. Corny News Network. <http://www.kingcorn.org/news/timeless/Tassels.html>
- Ning, D., Qin, A., Duan, A., Xiao, J., Zhang, J., Liu, Z., Liu, Z., Zhao, B., & Liu, Z. (2019). Deficit irrigation combined with reduced N-fertilizer rate can mitigate the high nitrous oxide emissions from Chinese drip-fertigated maize field. *Global Ecology and Conservation*, 20, Artículo e00803. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00803>
- Obreza, T. A., & Morgan, K. T. (2008). Nutrition of Florida citrus trees, second edition: SL 253/SS478, rev. 1/2008. *EDIS*, 2008(2). <https://doi.org/10.32473/edis-ss478-2008>
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2025, 4 de agosto). *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

- Pedrol, N., 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 del 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. 147-182). MGAP. <https://descargas.mgap.gub.uy/OPYPA/Anuarios/Anuarioopypa2024/CP/10/CP10web/CP10-Maizysorgosituacion.pdf>
- Quincke, A., García Lamothe, A., & Morón, A. (2008). Manejo de la fertilización en cultivos de verano. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria & Sociedad Rural de Río Negro (Orgs.), *Jornada INIA La Estanzuela Cultivos de Verano* (pp. 1-3). INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/16427/1/ad-550.pdf>
- Rameau, D., & Van den Dorpel, M. (2016). *Respuesta del maíz a la población y a dos dosis de nitrógeno en condiciones de riego* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/19714>
- Ritchie, S. W., Hanway, J. J. & Benson, G. O. (s.f.). *Como se desarrolla una planta de maíz*. Iowa State University. <https://es.scribd.com/document/312274849/Como-Se-Desarrolla-Una-Planta-de-Maiz>
- Sawchik, J., & Cerreta, S. (2005). Consumo de agua por sojas de distinto grupo de madurez en diferentes ambientes de producción. En S. Ceretta (Ed.), *Jornada Técnica de cultivos* (pp. 41-45). INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/439/1/111219230807174556.pdf#page=37>
- Singh, A., Uppal, R. S., Singh, B., & Kaur, V. (2025). Effect of split application of nitrogen on growth and yield of maize. *International Journal of Environmental Sciences*, 11(14S), 70-78. <https://theaspd.com/index.php/ijes/article/download/1830/1505/3531>
- Torri, S. (2005). *Fertirriego*. https://www.researchgate.net/profile/Silvana-Torri/publication/305847937_Fertirriego/links/57a36f4108ae3f4529226ea7/Fertirriego.pdf

- Tovar Hernández, S., Salvagiotti, F., Carciochi, W., Lewczuck, N., Hernandez, K., Biassoni, M., Kehoe, E., García, G., Avila, O., Lapaz, A., Toribio, M., García, F., Sainz Rozas, H., & Reussi Calvo, N. (2022). *Rendimiento y eficiencia de uso de nitrógeno según dosis y fuente en el cultivo de maíz* [Contribución]. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Buenos Aires.
<https://www.researchgate.net/publication/374700157>
- United States Department of Agriculture. (2025). *Production - Corn*.
<https://www.fas.usda.gov/data/production/commodity/0440000>
- Villaú, J. M. (s.f.). *Manejo del riego en el cultivo de maíz*. Corteva Agriscience
https://www.pioneer.com/CMRoot/International/Spain/images/Publications/manejo_del_riego_en_el_maiz.pdf
- Walne, C. H., & Reddy, K. R. (2022). Temperature Effects on the Shoot and Root Growth, Development, and Biomass Accumulation of Corn (*Zea mays* L.). *Agriculture*, 12(4), Artículo e443. <https://doi.org/10.3390/agriculture12040443>