

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**EFFECTO DEL FERTIRRIEGO EN EL CULTIVO  
DE MAIZ**

**por**

**Luis Pedro GIGENA QUINTELA  
Florescia VIANA BARTH  
Matías URIBE DARRIGOL**

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

**PAYSANDÚ  
URUGUAY  
2023**

**PAGINA DE APROBACIÓN**

Trabajo final de grado aprobado por:

Director: -----

Ing. Agr. Dr. Luis Giménez

Tribunal:-----

Ing. Agr. Dr. Luis Giménez

-----

Ing. Agr. MSc Mauricio Bustamante

-----

Ing. Agr. MSc Federico Rovegno

Fecha: 10 de agosto de 2023

Estudiantes: -----

Luis Pedro Gigena Quintela

-----

Matías Uribe Darrigol

-----

Florencia Viana Barth

## **AGRADECIMIENTOS**

A los ingenieros agrónomos Luis Giménez y Oscar Bentancur por la tutoría y asesoramiento académico brindado respectivamente durante la realización de la tesis.

Al ingeniero agrónomo Federico Rovegno y funcionarios de la EEMAC por el apoyo brindado durante todo el proceso experimental.

A nuestros familiares, amigos y compañeros de profesión quienes nos apoyaron incondicionalmente durante todos estos años.

Muchas Gracias.

## TABLA DE CONTENIDO

PAGINA DE APROBACIÓN.....	2
AGRADECIMIENTOS .....	3
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS .....	6
RESUMEN.....	7
SUMMARY .....	8
1 INTRODUCCIÓN.....	9
2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1 CARACTERÍSTICAS DE LA ESPECIE.....	10
2.1.1 Ecofisiología del cultivo.....	10
2.1.2 Adaptación hídrica .....	12
2.2 NITRÓGENO.....	16
2.2.1 Importancia del nitrógeno.....	16
2.2.2 Respuesta al agregado de nitrógeno.....	21
2.2.3 Interacción entre nitrógeno y riego .....	24
2.2.4 Fuentes nitrogenadas .....	26
2.2.5 Métodos de aplicación.....	27
2.2.6 Fraccionamiento del nitrógeno .....	28
2.2.7 Respuesta de la fertilización nitrogenada a seis hojas (V6) .....	31
2.2.8 Respuesta a aplicación tardía de N (V10-11) .....	31
2.3 FERTIRRIEGO EN EL CULTIVO.....	33
2.3.1 Fertirriego en maíz .....	33
2.3.2 Fertirriego nitrogenado en el cultivo .....	35
3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	39
3.1 UBICACIÓN DEL EXPERIMENTO .....	39
3.2 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO .....	39
3.3 DETERMINACIONES REALIZADAS.....	41
3.3.1 A campo.....	41
3.3.2 En laboratorio.....	42
3.4 HIPÓTESIS BIOLÓGICA.....	42
3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	42
3.5.1 Modelo Estadístico.....	42
3.6 CARACTERÍSTICA CLIMÁTICAS.....	42

3.6.1	Precipitaciones .....	42
3.6.2	Radiación Solar .....	44
3.6.3	Temperatura .....	45
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	46
4.1	Evolución de la Materia Seca .....	46
4.2	Rendimiento en grano y componentes numéricos principales .....	48
4.3	Subcomponentes numéricos del rendimiento y tasa de crecimiento del cultivo durante el periodo crítico .....	53
4.4	Relación entre rendimiento, NG, PG y Dosis de N con MS .....	55
4.5	Relación entre Número de Granos, Peso de Granos y Dosis de N .....	57
4.6	Relación entre el rendimiento y sus principales componentes .....	58
5	CONCLUSIONES .....	60
6	BIBLIOGRAFÍA .....	62

## LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

### Tabla No

Tabla 1 <i>Tratamientos evaluados en el experimento</i> .....	40
Tabla 2 <i>Evolución de la materia seca (Mg MS ha<sup>-1</sup>) para cada tratamiento según dosis, momento y método de aplicación del fertilizante nitrogenado, evaluado al inicio del PC, final del PC y cosecha</i> .....	46
Tabla 3 <i>Rendimiento (Mg ha<sup>-1</sup>), número de granos por metro cuadrado (NG) y peso de mil granos (PG, g) según dosis, fuente y fraccionamiento del nitrógeno evaluados</i> .....	48
Tabla 4 <i>Subcomponentes del rendimiento: número de espigas por planta, número de hileras por espiga número de granos por hilera y número de granos por espiga para los distintos tratamientos</i> .....	53

### Figura No

<b>Figura 1</b> <i>Precipitaciones (mm) ocurridas en la zafra 2020-2021 y valores promedios para la serie histórica comprendida de 2002 a 2021 en la EEMAC</i> ..	43
<b>Figura 2</b> <i>Radiación solar (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) diaria incidente promedio según la EEMAC en la zafra 2020-2021 y la radiación diaria incidente promedio para la serie histórica 2020-2021</i> .....	44
<b>Figura 3</b> <i>Temperaturas (°C) medias mensuales durante la zafra 2020-2021 y promedios mensuales para dicho periodo según la serie histórica comprendida entre el 2002 y el 2021 en la EEMAC</i> .....	45
<b>Figura 4</b> <i>Relación entre rendimiento, NG, PG y Dosis de N con MS</i> .....	55
<b>Figura 5</b> <i>a) Relación entre número de granos (NG m<sup>2</sup>) y dosis de N agregada b) relación entre peso de grano promedio (PG g) y dosis de N agregada (100 y 200 kg N ha<sup>-1</sup> respectivamente)</i> .....	57
<b>Figura 6</b> <i>Relación entre el rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>) y el número de granos por metro cuadrado (NG m<sup>2</sup>)</i> .....	58
<b>Figura 7</b> <i>Relación entre el rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>) y el peso de granos (PG, g)</i> ....	59

## RESUMEN

En este trabajo se busca generar información sobre estrategias de fertilización con nitrógeno (N) en maíz bajo riego. El experimento se realizó en la estación experimental “Dr. M. A. Cassinoni” en Paysandú, Uruguay durante la primavera-verano 2020-2021. El diseño experimental utilizado fue de bloques completamente al azar con 4 repeticiones. Dicho experimento consistió en once tratamientos, de los cuales diez de ellos se tuvo en consideración diferentes dosis y fuente de N aplicados mediante tres fraccionamientos distintos durante el ciclo del cultivo y un testigo sin fertilizar. Las dosis evaluadas fueron 100 y 200 kg de N ha<sup>-1</sup>, mientras que las fuentes evaluadas fueron urea líquida (fertirriego) y sólida respectivamente. En cuanto a los fraccionamientos evaluados consistieron en: 1) aplicaciones del 100 % de la dosis a V6, 2) aplicaciones del 50% de la dosis a V6 y V10 respectivamente y 3) aplicaciones con un fraccionamiento semanal (cada 4 días) de la dosis entre los estadios V6 y R1, según escala fisiológica. Al realizar el análisis estadístico se encontró respuesta a la dosis y la fuente de N utilizada. Las diferencias observadas en rendimiento en este trabajo mostraron una tendencia positiva a partir del incremento de la dosis y además se observaron mejoras en la absorción del N agregado cuando la aplicación se realizó mediante fertirriego. Sin embargo, al evaluar el tratamiento 100 Liq. V6, utilizando la mitad de la dosis no mostró diferencias con respecto a los tratamientos superiores en relación a las variables analizadas. En este trabajo se demostró que el NG fue determinante en el rendimiento, dado que presentó una correlación con el rendimiento superior en relación al PG ( $R^2$ : 0,87 vs  $R^2$ : 0,74). En ese sentido, se observó una tendencia positiva en el NG asociado al incremento de la dosis y la aplicación en fertirriego. Mientras que fraccionamientos de dosis de 100 kg de N ha<sup>-1</sup> a partir de V6 presentaron efectos negativos en el NG. Con respecto al PG se observó una tendencia positiva asociada al incremento de la dosis y el uso de fuentes líquidas. A su vez, se destaca que aplicaciones del 100 % de la dosis a V6 tiene efectos en el PG mostrando una tendencia favorable en dicho componente al incrementar la dosis de 100 a 200 kg de N ha<sup>-1</sup>.

*Palabras Clave:* maíz, nitrógeno, fertirriego, fraccionamiento, riego

## SUMMARY

This work seeks to generate information on fertilization strategies with nitrogen (N) in corn under irrigation. The experiment was carried out at the experiment station “Dr. M. A. Cassinoni” in Paysandú, Uruguay during the spring-summer 2020-2021. The experimental design used was completely randomized blocks with 4 repetitions. Said experiment consisted of eleven treatments, of which ten of them took into account different doses and sources of N applied through three different divisions during the crop cycle and a control without fertilization. The doses evaluated were 100 and 200 kg of N ha<sup>-1</sup>, while the sources evaluated were liquid urea (fertigation) and solid, respectively. Regarding the evaluated fractionations, they consisted of: 1) applications of 100% of the dose to V6, 2) applications of 50% of the dose to V6 and V10 respectively and 3) applications with a weekly fractionation (every 4 days) of the doses between stages V6 and R1, according to physiological scale. When carrying out the statistical analysis, a response to the dose and the source of N used were found. The differences observed in yield in this work showed a positive trend from the increase in the dose and also improvements were observed in the absorption of added N when the application was carried out by fertigation. However, when evaluating the treatment 100 Liq. V6, using half the dose, did not show differences with respect to the superior treatments in relation to the variables analyzed. In this work it was shown that the NG was decisive in performance, since it presented a correlation with superior performance in relation to the PG (R<sub>2</sub>: 0.87 vs R<sub>2</sub>: 0.74). In this sense, a positive trend was observed in the NG associated with the increase in the dose and the application in fertigation. While fractional doses of 100 kg of N ha<sup>-1</sup> from V6 presented negative effects on the NG. Regarding the PG, a positive trend was observed associated with the increase in the dose and the use of liquid sources. In turn, it is highlighted that applications of 100 % of the dose to V6 have effects on the PG, showing a favorable trend in said component when increasing the dose from 100 to 200 kg of N ha<sup>-1</sup>.

*Keywords:* corn, nitrogen, fertigation, division, irrigation



## 1 INTRODUCCIÓN

El maíz pertenece a la familia de las Poáceas (Gramíneas), tribu Maydeas y es la única especie del género *Zea* cultivada (Paliwal et al., 2001). El cultivo de maíz es de suma importancia, ya que además de estar presente en la dieta humana, es el principal insumo energético para la producción animal. A nivel mundial, es uno de los cereales más importantes ya que ocupa el primer lugar en volumen de producción y rendimiento en grano (Paliwal et al., 2001).

A nivel nacional, es el tercer cultivo estival con mayor área de siembra y el de mayor área bajo riego por aspersión. Además, es el segundo cultivo en rendimiento luego del arroz, el cual se realiza sólo en condiciones de riego (Oficina de Estadísticas Agropecuarias [DIEA], 2018). El rendimiento promedio en secano se mantuvo en torno a los 5,3 Mg ha<sup>-1</sup> dadas las condiciones de disponibilidad hídrica variable durante el desarrollo del cultivo. Mientras que, en cultivos sin limitantes hídricas, se reportan rendimientos potenciales en torno a los 15 Mg ha<sup>-1</sup> (Giménez, 2012).

En condiciones de disponibilidad hídrica no limitante, el nitrógeno es con mayor frecuencia la principal limitante del crecimiento y rendimiento del maíz (Barraco & Díaz Zorita, 2006). En ese sentido, la fertilización tradicional al voleo es la más utilizada y racionalmente aceptada. En relación al manejo de la fertilización, en nuestro país, la tendencia es realizar dos aplicaciones una a la siembra y otra a V6 en base a indicadores de suelo. Aunque existen ciertas dudas en cuanto a la respuesta al agregado de N, ya que los niveles críticos no están definidos para las diversas situaciones de chacra. La desventaja de este manejo es que el N está expuesto a pérdidas asociadas a lixiviación, volatilización, desnitrificación y/o formar compuestos insolubles (precipitados, adsorción a arcillas, rastros), que determina una disminución del N disponible para ser absorbido.

En base a esta situación, se plantea generar información que permita mejorar el manejo de la fertilización nitrogenada de maíz bajo riego, aumentar la eficiencia del uso del nutriente y colaborar en el aumento de la adopción de la tecnología y la productividad de los cultivos. El objetivo de este trabajo fue evaluar la respuesta productiva del maíz frente a variaciones en la dosis y el fraccionamiento de N, a partir de fertilizaciones sólidas en cobertura y fertirriego.

## 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CARACTERÍSTICAS DE LA ESPECIE

#### 2.1.1 Ecofisiología del cultivo

El maíz es una especie gramínea C4 de ciclo estival, con una duración de ciclo entre 4 a 6 meses. No presenta fotorrespiración detectable, es muy eficiente en la producción de materia seca de la cual, la mitad corresponde a órganos reproductivos y ello se debe principalmente: a una elevada eficiencia fotosintética, un bajo coste energético de la materia seca producida y a una adecuada estructura vegetal del cultivo (Andrade et al., 2023).

La espiga femenina del maíz se trata del órgano de principal interés comercial (en cultivos para grano) el cual se encuentra en posición axial y es sometido a una dominancia apical de la panoja masculina durante el periodo crítico. Dicho periodo se concentra en un lapso de 30 días centrado en la floración y se trata del momento en el cual se determina el principal componente numérico del rendimiento que es el número de granos por unidad de superficie. Además, si se considera su ciclo de crecimiento determinado, el maíz presenta una alta inestabilidad en el rendimiento e índice de cosecha frente a estreses bióticos y abióticos durante el periodo crítico. Sin embargo, el elevado potencial de crecimiento sumado a la sensibilidad del rendimiento por estrés durante el periodo crítico le confiere una alta respuesta al manejo adecuado del cultivo, en cuanto a densidad de siembra, fertilización, riego, entre otros (Martínez, 2015).

El maíz presenta sensibilidad al déficit hídrico, generando pérdidas en los rendimientos de grano cuando los mismos ocurren en el periodo cercano a floración (Andrade et al., 2023; Giménez, 2012; Westgate & Boyer, 1985). Según Andrade et al. (2023), en ausencia de estreses bióticos como abióticos, ambientes de alta luminosidad y elevada amplitud térmica, el cultivo presenta buenos potenciales de rendimiento. En estas condiciones y tratándose de cultivos sin limitantes hídricas, para el Uruguay hay reportes de rendimientos potenciales en torno a los 15,3 Mg ha<sup>-1</sup>, valor registrado por Giménez (2012).

En cuanto a los factores que afectan a la tasa de desarrollo del cultivo, estos están asociados a la fecha de siembra, como la región, siendo explicados principalmente por la temperatura y el fotoperiodo. Con respecto a la temperatura su respuesta es

de tipo universal, afectando los procesos de desarrollo y crecimiento siendo implicadas en mayor o menor medida todas las etapas del cultivo (Martínez, 2015).

El rendimiento del maíz puede ser estudiado a través de sus componentes numéricos: número de granos por unidad de superficie y peso promedio de grano. El número de granos es el producto de los subcomponentes: número de plantas por unidad de superficie, el número de espigas por plantas y el número de granos por espiga. Mientras que el peso de grano (PG), está determinado por la duración del periodo de llenado y la tasa de llenado ( $\text{g día}^{-1}$ ) (L. Giménez, comunicación personal, s.f.).

Dichos componentes presentan respuesta a las condiciones de crecimiento y en el caso del número de granos  $\text{m}^2$  es la variable más relacionada con el rendimiento (Giménez & García Petillo, 2011). Esto se explica dado que, frente a un estrés hídrico o nutricional durante el periodo crítico de determinación del rendimiento, puede llevar a una menor expansión foliar e intercepción de la radiación que conlleva a una menor eficiencia de intercepción y eficiencia de uso de esta (Satorre, 2002). Esto determina una caída de la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) por debajo del umbral para alcanzar el potencial de rendimiento. Dicho umbral estaría en torno a 450 y 550  $\text{kg ha día}^{-1}$  para alcanzar rendimientos de 15  $\text{Mg ha}^{-1}$  en nuestra región (L. Giménez, comunicación personal, s.f.).

En cuanto al subcomponente, número de grano por espiga, se ha encontrado que el mismo depende en mayor medida de la supervivencia de las espiguillas y de grano más que del total de espiguillas diferenciadas, dado que esto último está asociado a los componentes: número de hileras por espiga y espiguillas por hilera. Siendo estos menos sensibles al ambiente y al manejo de la producción (Andrade & Sadras, 2000). El aborto de las espiguillas se concentra hasta la tercer semana post floración (Andrade et al., 2023), mientras que el crecimiento de la espiga femenina se detiene en la floración. Es por ello por lo que el número de granos por planta está determinado por la tasa de crecimiento por planta en torno a la floración (Prine, 1971, Tollenaar, 1977, como se cita en Andrade & Sadras, 2000).

En el caso del maíz, existe una gran dependencia a las variaciones de la tasa de crecimiento por planta (TCP) el cual presenta un umbral de dicha tasa durante la floración, que por debajo del mismo no ocurre el cuajado de grano (espiga estéril)

y por encima de éste es capaz de producir hasta dos espigas viables dependiendo de la prolificidad del cultivar. Entonces, cuando la TCP está por debajo de  $1 \text{ g d}^{-1}$ , generan plantas estériles. Por otra parte, cuando la tasa de crecimiento por planta es de  $6 \text{ g d}^{-1}$  es posible obtener dos espigas, mientras que reducciones de la tasa de crecimiento por planta, por debajo de  $4 \text{ g d}^{-1}$  producen pérdidas en el número de granos por espiga. Dado que dicho umbral y los valores mencionados presentan variabilidad genética, es por todo esto que el cultivo se ve afectado por el ajuste de densidad de siembra, lo que afecta al número de espigas por planta; así como también estreses bióticos y abióticos, que pueden llevar a condiciones generales de crecimiento desfavorable durante la floración para la planta, lo que se traduce en un mayor aborto de espigas y granos, y en definitiva esto explica las variaciones en el número de granos por unidad de superficie (Andrade & Sadras, 2000).

En lo que respecta al peso de mil semillas, este depende del proceso de llenado de grano el cual presenta dos grandes etapas de acumulación de peso: una etapa inicial en el que el grano cuajado gana poco peso, con una duración de dos semanas y se caracteriza por una gran actividad mitótica en el que se determina el número de células en los granos. Luego existe una segunda etapa con respuesta lineal, en la cual se acumula la mayor parte del peso del grano y depende de la temperatura. Esta fase se caracteriza por su tasa de crecimiento y duración del llenado efectivo del grano; siendo este último, el factor de mayor incidencia en el PG y está determinado de manera inversa por la temperatura. Por lo tanto, los incrementos en la temperatura reducen el periodo de llenado efectivo. (Andrade et al., 2023; Jones et al., 1981; Tollenaar & Bruuselman, 1988).

### **2.1.2 Adaptación hídrica**

Salvagiotti (2009) afirma que, si bien existen varios factores que afectan a la producción de maíz, así como su interacción entre ellos, la principal limitante del cultivo es la disponibilidad hídrica. Los cultivos realizados en secano en algún momento de su ciclo experimentan situaciones donde la demanda atmosférica supera la capacidad de absorción de las plantas para contrarrestar las pérdidas por transpiración y eso da lugar a deficiencias hídricas (Otegui, 2009).

Vila (2011) define el término déficit hídrico con un origen ecofisiológico que relaciona la incapacidad de la planta en reponer agua hacia los tejidos vegetales,

esta incapacidad puede deberse al déficit hídrico en el suelo, a la demanda atmosférica o la sumatoria de ambas causales. En esa línea, fisiológicamente se trata de modificaciones del funcionamiento normal de la planta con implicancias negativas en el crecimiento y/o desarrollo (Salisbury & Ross, 2000). En cuanto a estas modificaciones, determina un descenso en el potencial y conductividad hídrica, pérdida de turgencia en hojas y un incremento de la secreción de ABA a nivel radicular, que genera el cierre estomático. Las consecuencias para la planta son la reducción del gasto de agua y la disminución de la asimilación de CO<sub>2</sub>, por lo tanto, genera una menor actividad fotosintética, menor crecimiento y producción de granos (Medrano et al., 2007)

El déficit hídrico es uno de los principales factores que afectan al cultivo, a nivel local en Uruguay, las deficiencias hídricas estimadas por Giménez y García Petillo (2011) fueron de 170 y 300 mm para la región norte y sur respectivamente. Según Andrade y Gardiol (1995), el déficit hídrico en cualquier momento del ciclo puede causar pérdidas en el rendimiento, no obstante, la magnitud de dichas pérdidas varía con respecto al momento del ciclo en que ocurra. Por otro lado, los síntomas visibles en la planta son la disminución de la altura, desarrollo radicular, IAF (este último asociado a una mayor senescencia con respecto a la expansión foliar) y reducción del rendimiento (Traore et al., 2000).

Se ha encontrado que previo al periodo crítico, el maíz es sensible al déficit hídrico, debido a que es reducida la producción de área foliar, sin embargo presenta una gran capacidad de recuperación (superado el estrés); logrando importantes tasas de crecimiento y una menor pérdida en el potencial de rendimiento (Abrecht & Carberry, 1993; Eck, 1984). En ese sentido, Çakir (2004) observó pérdidas en la producción de biomasa entre 28 y 32 por ciento con respecto a un cultivo sin deficiencias hídricas que no mostraron diferencias en rendimiento. Sin embargo, Karam et al. (2005) demostraron que en escenarios de deficiencias hídricas en dicho momento llevaron a una menor acumulación de materia seca determinando pérdidas de rendimiento cercanas a 37 por ciento dentro de las cuales, un 18 por ciento fue explicado por un menor peso de grano, las cuales pueden atribuirse a una menor translocación de fotoasimilados hacia los granos (Aydinsakir et al., 2013). En cuanto a las deficiencias hídricas en torno a la floración, se detectaron pérdidas de 50 por ciento del rendimiento potencial (Andrade & Gardiol, 1995). Dichos autores

recomiendan evitar el estrés en dos momentos puntuales: durante los estadios V13 a R3 para no afectar al componente número de granos y entre R3 a R6 para así lograr altos niveles de producción.

El efecto del estrés es más significativo durante la etapa reproductiva debido en parte a la evapotranspiración del cultivo (ETc), que en ese momento se encuentra en su máximo valor y es más sensible a la falta de absorción del cultivo (Andrade et al., 2023; Çakir, 2004; NeSmith & Ritchie, 1992). En la misma línea, Westgate y Boyer (1985) demostraron que el efecto del estrés hídrico al comienzo de la etapa reproductiva tenía mayor incidencia en el número de granos debido a fallas en la absorción del ovario y esterilidad del polen, explicado por una interrupción del transporte de fotoasimilados. Asimismo, Andrade et al. (2023) encontraron que durante la floración hay una reducción en la eficiencia de conversión de la radiación a biomasa, asociado a mayores tasas de senescencia en hojas y una menor partición de asimilados a la espiga, que redundan en el aborto de las estructuras reproductivas ya mencionadas y por lo tanto tiene un efecto directo sobre la producción de grano.

La demanda atmosférica, se caracteriza a partir de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo), este es un parámetro relacionado con el clima que expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año específicas, y no considera ni las características del cultivo, ni los factores del suelo (Allen et al., 2006). Esta variable depende principalmente de la intensidad de la radiación incidente sobre la superficie; la cual es la fuente de energía necesaria para generar los cambios de estado del agua que se encuentra en el sistema suelo-planta-atmósfera (Otegui, 2009).

En referencia a la absorción de agua, Singh y Singh (1995) observaron que la misma ocurre a profundidades entre 0 a 0,5 m. En presencia de cultivos, el consumo de agua está representado por la ETc, este término refiere a la evapotranspiración en condiciones óptimas presentes en parcelas con un excelente manejo y adecuado aporte de agua, y que logra producciones potenciales de acuerdo a las condiciones climáticas (Allen et al., 2006). El consumo potencial de un cultivo está determinado por la energía solar incidente, el largo de ciclo (relacionado al régimen térmico) y características del cultivo (Giménez & García Petillo, 2011). Existen dos factores que explican la ETc: la transpiración de las plantas y la evaporación del agua desde

el suelo. La proporción de cada uno de ellos dentro de la ETc varía según: el IAF y el porcentaje de humedad del perfil del suelo (Otegui, 2009).

La transpiración, corresponde a la proporción del agua vinculada al crecimiento de los cultivos, existiendo una relación directa entre la producción de granos y la transpiración. Dicho proceso implica el transporte del agua almacenada desde el suelo hacia la atmósfera a través de los estomas a nivel de hoja (Dardanelli et al., 2003). La diferencia entre la ETc y la ETo está definida por el Kc del cultivo. Este coeficiente para el cultivo toma valores entre 0 y 1,1, alcanzando su valor máximo en las etapas de mayor cobertura del suelo que coinciden con el periodo de determinación del rendimiento (Otegui, 2009).

En cuanto a los requerimientos de agua del maíz se encontró que las necesidades se ubican por encima de los 650 mm, desde la siembra (mediados de septiembre) hasta la cosecha (mediados de marzo), y los mayores valores corresponden a los meses de diciembre y enero (Totis de Zeljkovich & Rebella, 1980; Zeljkovich et al., 1995). Por su parte Giménez (2012) encontraron para dicho cultivo que en los años agrícolas 2009-10 y 2010-11, el consumo de agua total para un tratamiento con riego durante todo el ciclo varió entre 466 y 605 mm, respectivamente. Las diferencias estarían explicadas por el efecto año, asociado a variaciones de la ETc, debido al número de días nublados y las PP. Además, el mismo autor resalta que en siembras tempranas (octubre) el mayor consumo de agua coincide con los meses de diciembre y enero, dado que para esa fecha de siembra fue la etapa de mayor insolación y temperaturas.

En cuanto a la habilidad de un cultivo para evitar condiciones de déficit hídricos, se reconocen dos estrategias: el escape al déficit o la tolerancia al mismo. Diversos autores de la región destacan que el mecanismo de escape no debería ser una estrategia útil para mejorar el balance hídrico en maíz, ya que en regiones templadas a pesar de que las precipitaciones promedio superan los requerimientos hídricos del cultivo, existe una variabilidad intra-estacional importante que disminuye su efectividad. A nivel local Giménez y García Petillo (2011), en una investigación en el litoral agrícola del país demostraron que, cambios en la fecha de siembra con el fin de ubicar el PC en épocas del año en que la demanda atmosférica no fuese máxima, no significó incrementos estables en los rendimientos a la adaptación hídrica del maíz.

## 2.2 NITRÓGENO

### 2.2.1 Importancia del nitrógeno

Entre los nutrientes con mayor relevancia en los esquemas de fertilización convencionales en maíz se encuentra el nitrógeno. Según Sinclair (1990) es el nutriente más importante para la producción de cultivos, debido a las cantidades que el cultivo absorbe y por la frecuencia con que se observan deficiencias en suelos agrícolas. En esa línea, varios autores reconocen que, de los nutrientes esenciales, el nitrógeno limita la producción en maíz dado que en suelos que no son fertilizados depende del aporte de la mineralización neta (Below, 2004; Maddonni & De la Fuente, 2003). El nitrógeno, limita tanto el crecimiento como el rendimiento del maíz; esto se debe a que las plantas requieren grandes cantidades de este nutriente (1,5 a 3,5 por ciento de peso seco de la planta) y en la mayoría de los suelos no presentan disponibilidades suficientes como para mantener dichos niveles demandados por la producción (Stangel, 1984).

En relación a la oferta de N en el suelo, según Below (2004), su entrada al sistema está dada por la fijación biológica, la descomposición de rastrojos vegetales y deyecciones animales, cuyo destino principal en el suelo será para formar parte de la materia orgánica (90 por ciento del N total) y es por ello que no está directamente disponible para el cultivo. En este sentido, el investigador reconoce que existe una porción del N de la fracción orgánica que puede volver a estar disponible para las plantas en función de la mineralización a través de los microorganismos del suelo. Las cantidades disponibles van a depender de las precipitaciones, temperaturas, humedad del suelo y prácticas de manejo. Sin embargo, su liberación es lenta para cubrir los requerimientos del maíz durante el ciclo de desarrollo, ya que solo el 2 a 3 por ciento del N total fijado a la materia orgánica pasa a su forma inorgánica que puede ser aprovechada por el cultivo.

En cuanto a la fracción inorgánica en el suelo, el nitrógeno se trata del único nutriente que se puede encontrar en dos formas distintas: como catión amonio ( $\text{NH}_4$ ) y anión nitrato ( $\text{NO}_3$ ) (Below, 2004). En ese sentido, diversos autores comentan que la disponibilidad de N como  $\text{NH}_4$  es relativamente menor en comparación al  $\text{NO}_3$  y esto se debe principalmente a que está ligado al complejo de intercambio catiónico. Además, resaltan que se trata de una forma mineral que,



si bien no conlleva un costo su absorción, dado que la misma se da por transporte pasivo a través de la superficie radicular, si presenta una particularidad con respecto a su asimilación; es que para ser exitosa debe existir suficiente cantidad de esqueletos carbonados para pasar a formar AA ya que, de lo contrario, en libre circulación puede generar toxicidad para la planta de maíz (Andrade et al., 2023; Maddonni & De la Fuente, 2003; Perdomo et al., 2008; Perdomo & Hoffman, 2011).

Para el caso de N, en su forma de  $\text{NO}_3^-$ , para el cultivo se trata de la forma química dominante para su absorción y asimilación. Esto en parte, está explicado por el ambiente en que se establece el cultivo el cual se caracteriza por ser bien drenado, con buena aireación y temperaturas templadas que favorecen la oxidación del  $\text{NH}_4^+$  disponible en el suelo (Below, 2004).

En relación a su utilización, se trata de una molécula que si bien su absorción depende de un transporte activo, por lo tanto, implica un costo energético para la planta, no resulta tóxico en altas concentraciones como anión libre dentro de la misma (Andrade et al., 2023; Maddonni & De la Fuente, 2003; Perdomo et al., 2008; Perdomo & Hoffman, 2011). Sin embargo, Below (2004) resalta que es el principal responsable de las pérdidas de N en el suelo, ya que es muy susceptible a la lixiviación, desnitrificación y hasta la inmovilización por parte de los microorganismos; cuyas implicancias económicas son visibles especialmente cuando limita la productividad del cultivo.

Es por esta razón que debemos mencionar los mecanismos de pérdidas de N, ya que varios autores resaltan el impacto que esto puede tener en el uso del fertilizante, dado que bajo determinadas condiciones se pueden esperar hasta un 70 por ciento de pérdidas de nitrógeno agregado (Hoffman et al., 2010). En ese sentido, se destacan las pérdidas temporales asociadas a la inmovilización de N por los microorganismos y la fijación de amonio de las arcillas; y las pérdidas permanentes: volatilización, lavado y desnitrificación, en las cuales esta revisión va a hacer énfasis.

Dentro de las principales pérdidas de N en el sistema suelo-planta, una de las más relevantes es la volatilización sobre todo si consideramos las aplicaciones de fuentes amoniacales (urea) y en situaciones de siembra directa, en la cual se realiza

la aplicación en superficie (Keller & Mengel, 1986, Fox & Piekielek, 1993, como se cita en Barbieri et al., 2003). Además, según Hauck (1981), las pérdidas de N a partir de este proceso pueden llegar a estar en el orden del 15 a 20 por ciento del N total.

En cuanto al proceso químico, este ocurre inicialmente en el suelo a partir de la hidrólisis de urea a ion  $\text{NH}_4$  por la enzima ureasa, siendo necesario el consumo de un átomo de hidrógeno lo que conlleva a aumentar el pH, y la formación de  $\text{NH}_3$  por lo que aumenta la susceptibilidad de este catión a la volatilización. Al respecto de la hidrólisis de la urea, este proceso se ve favorecido a temperaturas de suelo por encima de  $15^\circ\text{C}$ , pH neutros, condiciones de humedad cercana a capacidad de campo o cuando el suelo comienza a secarse. Sin embargo, dicho proceso se ve reducido si se aplica la urea a suelos secos en superficie y/o si se producen precipitaciones superiores a 10 mm luego de la aplicación (García, 1996)

La volatilización según Ferraris et al. (2009) se entiende como un proceso complejo y los factores asociados son ambientales, suelo (temperatura y humedad), materia orgánica, CIC y asociados al manejo, como la fertilización, cobertura y calidad del rastrojo. En esa línea dicho autor, resalta la importancia de la cobertura (asociada a la presencia de la enzima ureasa) para un cultivo de maíz con fertilizaciones de  $80 \text{ kg N ha}^{-1}$  en presencia de rastrojo bajo y rastrojo alto, para los meses de octubre y noviembre. En los cuales observó pérdidas por volatilización de 14 a 21 por ciento para el mes de octubre y 26 a 36 por ciento en el mes de noviembre para ambos niveles de cobertura respectivamente. Además, resalta el impacto que podría generar una dosis alta sobre suelos con bajos valores de materia orgánica, ya que esto supone una menor CIC, determinando un menor número de sitios de intercambio, para poder amortiguar o retener el incremento de  $\text{NH}_4$  que se generaría a partir de la hidrólisis de la urea.

La lixiviación es otro mecanismo de pérdida de N, y consiste en el lavado del  $\text{NO}_3$  por el agua que percola en el suelo hacia zonas no exploradas por las raíces. Se da con mayor frecuencia en las estaciones de otoño-invierno, dado que en la primavera y verano el lavado es bajo debido a que es menos probable que haya excesos hídricos. Sin embargo, en momentos de precipitaciones intensas posteriores a la aplicación de fertilizante nitrogenado, este puede ocasionar el lavado de nitrato a

partir del flujo preferencial del agua a través de los macroporos (Sainz Rozas et al., 2004).

Los principales factores que afectan a la lixiviación son aquellos asociados a la tecnología de aplicación: dosis, fuente de N, momento y método de aplicación, uso de inhibidores de la nitrificación; a la necesidad de la planta (absorción de N), características fisicoquímicas del suelo, cantidad y distribución de las precipitaciones y posibilidad de aplicación de riego (Echeverría & García, 2014)

En cuanto al proceso, se da con el nutriente en su forma de nitrato ( $\text{NO}_3$ ) dado que el mismo es un ion soluble y que además presenta carga negativa, por lo tanto, no es adsorbido por los coloides del suelo y ello determina que esté sujeto a pérdidas por lavado (Echeverría & García, 2014). Perdomo et al. (2008) considera que este mecanismo de pérdida se da con mayor intensidad en suelos de texturas arenosas, con mala estructura y con cierta humedad previo a una lluvia, en comparación a un ambiente contrastante.

Por su parte, García (1996) considera que las pérdidas por lavado están relacionadas directamente con el volumen de agua y la cantidad de  $\text{NO}_3$  disponible, por lo que una forma de minimizar dichas pérdidas podría ser reducir los niveles de  $\text{NO}_3$  durante el barbecho (épocas sin cultivo) y sincronizar la fertilización con la demanda real del cultivo para favorecer su uso y absorción.

Por último, la desnitrificación se basa en un proceso de reducción biológica, en el que interceden microorganismos anaeróbicos facultativos. En resumen, en condiciones de anaerobiosis, dichos microorganismos utilizan el  $\text{NO}_3$  y  $\text{NO}_2$  disponibles en el suelo como aceptores de electrones en lugar de  $\text{O}_2$ , como resultado se obtiene N molecular y  $\text{N}_2\text{O}$  en formas gaseosas. Según Perdomo et al. (2008), como todo proceso de reducción demanda energía, en este caso a nivel del suelo, es indispensable que esté presente materia orgánica con elevada relación C/N.

El principal factor del ambiente que regula las pérdidas por desnitrificación es la humedad del suelo, no obstante, es relevante la incidencia que poseen otras características fisicoquímicas del suelo como pH, concentración de carbono, nitrato y temperatura del suelo. Con respecto a las pérdidas por este proceso, según García (1996), las pérdidas pueden llegar al 70 por ciento del nitrógeno agregado. Otros investigadores mencionan que sistemas regados deberían aumentar las emisiones

de  $N_2O$  en relación con sistemas de secano, debido a las diferencias en humedad del suelo (Gregorich et al., 2015). En esa línea, se ha encontrado diferencias en cuanto a las emisiones de  $N_2O$  a favor del riego con un incremento del 50 a 140 por ciento en comparación a sistemas de secanos con el agregado de la misma dosis de N (Trost et al., 2013).

Sin embargo, otros autores en Balcarce Argentina, para un cultivo bajo riego demostraron pérdidas de N por desnitrificación acumulada bastante menores: según Echeverría y Sainz Rozas (2001) cuando la aplicación es a partir de V6, las pérdidas de N encontradas fueron en torno a 6,4 de kg de  $N_2O$  y representó menos del 2% del N aplicado. Estos investigadores concluyen que el momento de aplicación tuvo cierta incidencia, dado que correspondió a una mayor demanda del cultivo lo que redujo la humedad del suelo y por ende las pérdidas asociadas. En ese sentido, un ensayo en la misma región registró mayores pérdidas cuando la aplicación se dio entre la siembra y V6: cuyas pérdidas fueron de 6,8 y 3,4% para dosis de 70 y 210 kg de N respectivamente, en comparación a las pérdidas observadas a partir de V6 que en ese año no superaron el 1% del N aplicado (Sainz Rozas et al., 2004). Nuevamente estos investigadores destacan el efecto de la mayor humedad del suelo entre siembra y V6 asociado a una menor demanda del cultivo como una posible explicación de los resultados.

Retomando la importancia del  $NO_3$ , es de destacar los altos contenidos de N en la planta expresados en relación con su peso seco total el cual puede variar entre 1 y 5% . Además, una vez que ingresa a la misma, tiene un rol esencial en el crecimiento vegetal, ya que es constituyente de moléculas como hormonas, clorofila, aminoácidos esenciales, proteínas, nucleoproteínas, enzimas y trifosfato de adenosina (ATP) (Perdomo et al., 2008). A nivel general, en cuanto a sus principales funciones dicho anión se encarga del establecimiento y mantenimiento de la fotosíntesis y del crecimiento y desarrollo de órganos reproductivos (Below, 2004).

En el caso del establecimiento y mantenimiento de la fotosíntesis depende de la cantidad de N disponible y que este no afecte a las partes de dicho sistema involucradas (enzimas, pigmentos, etc.) (Below, 2004). Además las deficiencias de este nutriente, puede acelerar los procesos de senescencia al reducir el contenido de clorofila en hojas (Kaur et al., 2012).

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

En esa línea, Below (2004) observa que un 60% del N está contenido en las proteínas de las células del cloroplastos, tratándose de la principal fuente de N para la removilización del mismo durante la floración. Además, el investigador resalta, que la capacidad de transporte de fotoasimilados hacia órganos reproductivos va a depender de forma negativa al estado de madurez de la hoja. Por lo tanto, en situaciones de déficit de N, es posible que tanto el aporte de N y fotoasimilados se vea reducido más rápido y se vea perjudicado el tamaño de la espiga, afectando el número de granos/plantas. Es por esto, por lo que varios autores coinciden en la gran importancia del N, asegurando un óptimo estado fisiológico del cultivo en los momentos críticos y definitorios en satisfacer la demanda de granos en desarrollo (Andrade et al., 2023).

En cuanto a factores de estrés que limitan la fuente de asimilados durante el llenado de los granos en maíz, deficiencias nitrogenadas reducen el peso de estos, pero afectan más el flujo de N que el de carbono, generando mermas en la concentración de N en grano (Uhart & Andrade, 1995), rendimiento y una correcta acumulación de N en órganos vegetativos. Además, Andrade et al. (2023) afirman que deficiencias de N en maíz afecta el número de granos por espiga, lo cual implica efectos negativos en el rendimiento. Dichas deficiencias provocan no solo una reducción en la tasa de crecimiento del cultivo sino también disminuciones en la partición de asimilados hacia la espiga.

### **2.2.2 Respuesta al agregado de nitrógeno**

El rendimiento presenta correlación lineal y positiva con el número de granos (Andrade & Sadras, 2000). Esto coincide con Quiroga et al. (2006) quienes encontraron que en condiciones hídricas no limitantes el número de granos por espiga es uno de los componentes de rendimiento más influenciados por el agregado de N en maíz. Biscaro et al. (2011) encontraron que al utilizar distintas dosis de

nitrógeno (0, 90, 180 y 360 kg ha<sup>-1</sup>) se modifica el rendimiento del maíz, generando incrementos en el rendimiento a medida que se aumentan las dosis. Este resultado está explicado por un aumento en el NG por hilera, un mayor NG por espiga y el aumento en el PG; mientras que las distintas dosis no generaron efectos en el diámetro de la mazorca, número de hileras por mazorca, ni en la altura de la planta.

La respuesta a la fertilización es un proceso complejo, regulado por distintos procesos, en el que interactúan: el cultivo y el medio edafoclimático, cuya magnitud dependerá tanto de la fertilidad del campo, determinada por la disponibilidad de nutrientes durante el ciclo del cultivo, como también del rendimiento potencial que el cultivo pueda lograr, relacionado con la oferta de radiación, las temperaturas y la disponibilidad de agua (Salvagiotti, 2009). En ese sentido, Torres Martignoni (1996) considera que la respuesta al N está determinada principalmente por cuatro factores: las características térmicas e hídricas del suelo, la historia de la chacra y el nivel de nitrógeno disponible como nitrato (NO<sub>3</sub>). Esto permite inferir que los patrones de respuesta pueden no ser los mismos entre y dentro de cada año o ciclo de cultivos. En ausencia de limitaciones en la disponibilidad hídrica u otros nutrientes, la disponibilidad de N será el factor que limite la expresión del rendimiento máximo que el cultivo pueda alcanzar.

Meroni et al. (2010) encontraron diferencias significativas en cuanto a la capacidad de mineralización del N según el nivel de humedad en el suelo. Cuando mayor es el agua disponible, más cercano a capacidad de campo, encontraron que la tasa de mineralización fue máxima. Por otro lado, de acuerdo con Pagani et al. (2009) la tendencia a la implementación de sistemas sin laboreo ha aumentado la probabilidad de respuesta al agregado N dado que reduce la temperatura del suelo y esto afecta la tasa de mineralización.

Es bien conocido que la alta presencia de la soja ha generado externalidades en los sistemas agrícolas y uno de ellos es el balance de N en el suelo. Salvagiotti et al. (2002) ya afirmaban que dicho cultivo, a pesar de contar con la fijación biológica de nitrógeno, está resultaba insuficiente para mantener los requerimientos de extracción de grano en la cosecha llevando a balances negativos.

En concordancia con lo expuesto en nuestro país, Ernst et al. (2009) y Perdomo y Hoffman (2011) afirman que en los últimos 13 años se ha reducido un 70 por ciento

del potencial de mineralización del N para la región del litoral oeste. Así como también, en suelos de la unidad San Manuel, Ackerman y Gasparri (2011) evidenciaron respuesta al agregado de N de manera lineal con el transcurso de los años para situaciones de agricultura continua, debido a la baja capacidad de aporte de N por parte del suelo.

La eficiencia en el uso de nutrientes es un aspecto fundamental a tener en cuenta desde la perspectiva económica, ya que el beneficio de la fertilización está directamente relacionado con la cantidad de producto (grano) que se obtiene por unidad de insumo utilizada (fertilizante). Sin embargo, el conocimiento de dicha eficiencia presenta relevancia ambiental, debido a que los nutrientes no utilizados por el cultivo y que no permanecen en el sistema suelo, corren el riesgo de ser lixiviados o emitidos a la atmósfera con negativas consecuencias ambientales (Snyder & Bruulsema, 2007).

En N, se han determinado eficiencias de uso del fertilizante nitrogenado (EUN) que varían desde 4 a 54 kg grano por kg N aplicado<sup>-1</sup> según dosis, nivel inicial de N, condiciones ambientales, tecnología de aplicación, etc. (Sainz Rozas et al., 2004). En concordancia con lo mencionado anteriormente, Below et al. (2007) observaron una EUN promedio de 21,6 kg grano por kg N ha<sup>-1</sup> que permitió obtener un rendimiento de 10,1 Mg ha<sup>-1</sup> con una dosis óptima de 150 kg de N ha<sup>-1</sup>.

En cuanto al manejo de la fertilización, en nuestro país la tendencia es realizar dos aplicaciones a la siembra y a V6 en base a indicadores de suelo: porcentaje de materia orgánica, y nitratos. Según Ceriani e Innella (2012), hay dudas en cuanto la respuesta al agregado de N ya que los niveles críticos no están definidos para todas las situaciones de chacras; es por esto que las cantidades a agregar quedan restringidas al potencial del cultivo.

Perdomo y Hoffman (2011) afirman que la mayoría de las situaciones de secano no se hace uso de los indicadores de suelo para el ajuste de la fertilización, sino que se basan en fertilizaciones promedio de 130 kg ha<sup>-1</sup> de 18-46-0 y luego se fertiliza a V6 con 90 kg ha<sup>-1</sup> de urea (65 kg de N ha<sup>-1</sup> aproximadamente), por lo que actualmente existe el riesgo de que la dosis de N sea subóptima o excesiva.

Según Echeverría y García (2014) y Perdomo et al. (2008) los requerimientos totales del cultivo para producir 12 Mg MS ha<sup>-1</sup> son 275 kg N ha<sup>-1</sup>

aproximadamente. Otros autores destacan que para la producción de una tonelada de grano, los valores de N deben ser en el orden de 20 y 25 kg N ha<sup>-1</sup> (Melgar & Torres Duggan, 2004; Vidal et al., 2015) lo cual se aproxima a lo que concluyeron Ciampitti et al. (2010) siendo el rango de valores más bajo, en torno a 14 y 18 kg N ha<sup>-1</sup>. Cabe destacar el aporte de Andrade et al. (2023), como se cita en Cordi et al. (1997), para la región de Balcarce en situaciones de riego y secano quienes encontraron una acumulación máxima de N entre 240 y 320 kg ha<sup>-1</sup> totales para ambos ambientes de producción respectivamente, cuyas tasas de acumulación diarias fueron de 2,7 y 3,7 kg N ha d<sup>-1</sup> entre V5 y R5.

### **2.2.3 Interacción entre nitrógeno y riego**

Varios investigadores han encontrado que el maíz presenta un elevado requerimiento de agua en torno a los 600 mm y una alta sensibilidad a la escasez de dicho factor cuando este ocurre durante el periodo crítico en un rango de 30 días en torno a la floración (Andrade & Sadras, 2000; Giménez, 2012).

Andrade y Sadras (2000) y Echeverría y García (2014) destacan la importancia de la disponibilidad de agua en el suelo sobre la demanda de nutrientes por parte del cultivo y cómo interactúa este con la oferta disponible en el suelo. En esa línea dichos investigadores observaron que la falta de agua durante el barbecho hasta bien entrada la fase vegetativa, seguido por una buena condición hídrica durante la floración reduce de manera significativa la oferta de N en comparación a la demanda de este nutriente por lo que la respuesta al agregado es mayor. Mientras que, en una situación contraria, si existe buena disponibilidad en dichas fases iniciales y una escasez posterior durante la floración, genera una mayor oferta de nutrientes por lo que la respuesta al agregado disminuye. Por lo que existe una respuesta en la mineralización del N cuando el cultivo todavía no se ha instalado asociado a la condición hídrica, que afecta positiva o negativamente la respuesta al fertilizante.

En esa línea, Echeverría y García (2014) también destacan el efecto de las precipitaciones en función de su frecuencia e intensidad y cómo esto puede afectar la mineralización del N gracias a su efecto en los procesos de secado y humedecimiento del horizonte superficial. En ese sentido, los investigadores concluyen que precipitaciones poco frecuentes e intensas, reducen la



mineralización de N por una mayor tendencia al secado superficial del suelo en comparación a lluvias más frecuentes. Además, altas intensidades de precipitaciones independiente de su frecuencia demostraron reducir la disponibilidad de nutrientes por favorecer los mecanismos de pérdidas.

Por otro lado, existen varias investigaciones que destacan la respuesta potencial al riego suplementario en maíz. Pedrol et al. (2008) observaron que es posible alcanzar buenas eficiencias de uso del agua en la producción de materia seca con valores que oscilan los 20 a 40 kg MS mm<sup>-1</sup> de agua consumida en ambientes de baja y alta productividad respectivamente; siempre y cuando el cultivo haya sido bien manejado en cuanto a la ubicación de la fecha de siembra, densidad de plantas, fertilización, etc.

En cuanto a la interacción del N con la condición hídrica se ha encontrado que el rendimiento del cultivo fue afectado positivamente por la inclusión del riego y el agregado de N, e incluso la interacción entre ambas variables fue significativa (Di Paolo & Rinaldi, 2007). En una serie de ensayos en Texas, Eck (1984), con el objetivo de comparar la respuesta en rendimiento según la intensidad y momento del estrés hídrico y a su vez como este factor interacciona con el agregado de N, concluye que no existió efecto negativo de fertilizar con nitrógeno en situaciones de déficit hídrico. Sin embargo, el efecto de fertilizar no reduce las pérdidas y es probable que la respuesta al agregado de N sea inferior a condiciones de buena disponibilidad hídrica.

A nivel regional, Ceriani e Innella (2012) concluyen que el riego suplementario puede llegar a duplicar el rendimiento obtenido en años de bajas precipitaciones para condiciones de secano. Además, también encontraron que frente a bajas ofertas de N el maíz presenta buena respuesta al agregado de N independientemente de la disponibilidad hídrica. Cuando se evaluó la interacción entre ambas variables, la misma fue significativa y en cuanto a la EAN se obtuvieron valores entre 25,3 y 16,4 kg grano por kg N ha<sup>-1</sup> en riego y secano respectivamente. Mientras que para la obtención del máximo rendimiento en situaciones de riego fue necesario disponer hasta 188 UN y en secano 123 UN.

#### 2.2.4 Fuentes nitrogenadas

La inclusión de maíz en los sistemas de agricultura continua bajo siembra directa es una herramienta posible para mejorar el balance de carbono a partir de su elevada producción de biomasa y por lo tanto de rastrojos en superficie (Studdert & Echeverría, 2000). Sin embargo, la inclusión de esta especie, la intensificación agrícola y el mayor potencial productivo de las variedades presentes han incrementado las necesidades de agregar nutrientes y en particular nitrógeno.

Domínguez et al. (2001) destacan para maíz en el sudoeste bonaerense, que la mayor utilización de la SD ha llevado a una menor disponibilidad de N para el cultivo con respecto a la labranza convencional. Esto puede atribuirse a una menor mineralización de la materia orgánica y pérdidas de N por desnitrificación, lavado, volatilización e inmovilización por los microorganismos del suelo. Por lo que las dosis nitrogenadas para obtener similares resultados en ambos sistemas de labranza resultaron ser más altas en SD frente al laboreo convencional. Además, sumado al alto costo de los fertilizantes, surge la necesidad de buscar alternativas de fertilización más eficientes en el uso del nutriente.

A nivel nacional, los fertilizantes nitrogenados más utilizados son sólidos: urea, nitrato de amonio; aunque cada vez con mayor presencia aparecen variantes del UAN el cual es un fertilizante líquido compuesto por los iones  $\text{NH}_4$  y  $\text{NO}_3$  (DIEA, 2011).

Varios autores resaltan que, en nuestra región en situaciones de SD, las fuentes amoniacaes (urea) tienden a ser menos eficientes debido a su mayor susceptibilidad a la volatilización (Barbieri et al., 2003; Bonelli et al., 2017; Sainz Rozas et al., 2004). En ese sentido, se ha propuesto la fertilización bajo rastrojos o el uso de otras fuentes de N con menor potencial de volatilización: ya sean fertilizantes líquidos (UAN y sus variantes), nitrato de amonio; como estrategias para disminuir la volatilización que se produce con la aplicación de urea en superficie (Barbieri et al., 2010).

En la región, en Balcarce Argentina en un ensayo elaborado por Bonelli et al. (2017) que consistió en evaluar la respuesta en rendimiento y eficiencia de recuperación de N (ERN), en función de la fertilización con distintas fuentes de N con mayor o menor riesgo de volatilización, como urea, UAN, UAN + Tiosulfato de amonio,

nitrate de amonio calcáreo (CAN); aplicados en diferentes etapas del cultivo de maíz (siembra, V6 y V10) durante 2 años. Dichos investigadores, encontraron respuesta en rendimiento con respecto al testigo sin fertilizar, sin embargo, no encontraron diferencias significativas para las variables estudiadas por el hecho de utilizar fuentes nitrogenadas con menor riesgo de volatilización con respecto a la urea. Además, destacan que la razón de ello puede deberse al menor potencial de volatilización de la región del ensayo: debido a la menor temperatura, la alta capacidad buffer del suelo (altos contenidos de MO), que permite reducir cambios bruscos del pH durante la hidrólisis de la urea y la ocurrencia de lluvias a los pocos días de realizada la aplicación lo que permitió la incorporación del fertilizante al suelo y no a la superficie.

En el noreste del estado de Missouri, se evaluaron cuatro fuentes distintas de N, durante tres años en sistemas de maíz continuo de secano, en donde encontraron que la respuesta en rendimiento en grano fue afectada por la fuente de N utilizada en cada año. Siendo la respuesta en rendimiento más alta obtenida por el uso de nitrate de amonio  $7090 \text{ kg ha}^{-1}$ , urea  $6260 \text{ kg ha}^{-1}$ , UAN  $5680 \text{ kg ha}^{-1}$  y UAN más sulfato de amonio  $5710 \text{ kg ha}^{-1}$  (Stecker et al., 1993). Además, resaltan que con la aplicación sólida de urea se obtuvo una mayor respuesta frente a las aplicaciones líquidas de UAN y UAN más sulfato de amonio y que ello se debe a las buenas condiciones hídricas durante los años de evaluación.

### **2.2.5 Métodos de aplicación**

El método y el momento de aplicación de fertilizantes nitrogenados puede alterar su eficiencia de uso y por lo tanto puede ajustarse para mejorar la EUN (Peterson & Frye, 1989). Los métodos de aplicación son variados existen aplicaciones superficiales que pueden ser al voleo o en bandas, otro tipo de aplicaciones que se dan a nivel subsuperficial es la inyección de fertilizantes líquidos en conjunto con la semilla (a la siembra) o entre hileras. Por último, existen aplicaciones de fertilizantes líquidos incorporados al agua de riego ya sea pulverizados o chorreados, siendo este último asociado a la tecnología de fertirriego (Maddonni & De la Fuente, 2003).

Fontanetto et al. (2008), al comparar distintas fuentes (Urea, Solmix y Nitrate de amonio calcáreo), observaron una tendencia a mayores rendimientos debido a la

incorporación de fertilizantes en comparación a aplicaciones al voleo o chorreados sobre el suelo. Sin embargo, al contrastar la respuesta para las distintas fuentes, los fertilizantes CAN y Solmix obtuvieron una respuesta diferencial al voleo en comparación a los tratamientos con urea, dado que la misma es más susceptible a la pérdida por volatilización en aplicaciones superficiales, mientras que aplicaciones incorporadas al suelo no mostraron diferencias entre fuentes cuyos rendimientos oscilan entorno a los 10 Mg ha<sup>-1</sup>. En ese sentido Piedrahita (2012) tampoco encontró diferencias debido a la incorporación del N tanto en rendimiento como en sus subcomponentes: largo de mazorca, diámetro de mazorca, número de hileras por mazorca y PG. Con respecto a las aplicaciones nitrogenadas mediante el riego por pulsos (fertirriego), tiende a incrementar los valores de nitrato cercano a la superficie y esto podría explicarse debido a un mayor control de las pérdidas por lixiviación (Ortiz-Calle et al., 2021). Además se ha observado que reduce las pérdidas de nitrógeno como óxido nitroso en un 78 por ciento para el caso de urea en comparación a la aplicación del mismo fertilizante al voleo en riego por aspersión (Guardia et al., 2017).

### **2.2.6 Fraccionamiento del nitrógeno**

En maíz el número de granos por espiga depende del número hileras por espiga y el número de granos por hilera, y estos dependen de las condiciones de crecimiento entre V6 y V12. La absorción de nutrientes, en especial N, durante ese periodo va a ser importante para definir el número de granos totales y en consecuencia el rendimiento. Por otro lado, la planta necesita bajas cantidades de nutrientes durante su crecimiento inicial por lo que afirma la necesidad de evitar pérdidas con una única aplicación y aumentar la eficiencia de utilización del N, haciendo que este sea disponible en el momento de mayor absorción (Armand & Ferrari, 2018; García & Espinosa, 2009). Estos investigadores proponen maximizar la eficiencia agronómica del fertilizante, la cual se define como la cantidad de grano producido por cada kg de nutriente agregado, como una alternativa gracias al fraccionamiento.

En esa línea, una investigación de García (2009), como se cita en García y Espinosa (2009) en Colombia, con el objetivo de medir el efecto de distintos fraccionamientos del N sobre el rendimiento y la eficiencia agronómica de las aplicaciones en maíz. En el experimento se evaluó el fraccionamiento doble (siembra y V6) y triple (siembra, V6, V10), con variaciones en el porcentaje de la

dosis. En el caso de los tratamientos dobles, se midió el efecto de fraccionar 50-50 y 20-80 entre siembra y V6; mientras que en aplicaciones triples se midió el fraccionamiento 20-40-40 y 30-40-30 para los momentos siembra, V6 y V10 respectivamente. Los resultados confirmaron que existió una respuesta significativa al fraccionamiento, los mayores rendimientos se obtuvieron a partir de los fraccionamientos triples con respecto al fraccionamiento doble: se destacó el fraccionamiento 20-40-40, que obtuvo un rendimiento de 7,2 Mg ha<sup>-1</sup> en comparación al fraccionamiento 30-40-40 (6,2 Mg ha<sup>-1</sup>) y los tratamientos dobles los cuales no se diferenciaron entre sí (5,9 Mg ha<sup>-1</sup>).

En concordancia, García y Espinosa (2009) resaltan que la posible diferencia en rendimiento que presentó el tratamiento triple pudo estar explicada por la dinámica del N en el suelo, la cual dificulta que aplicaciones tempranas de fertilizantes puedan cubrir las necesidades más tardías en el ciclo y por lo tanto no sería conveniente altas dosis entre siembra y V6. Por otro lado, el hecho de coincidir o “acercar temporalmente” las aplicaciones con los momentos de mayor necesidad por parte del cultivo resultó favorable: dado que a partir de V6 inicia la diferenciación de la espiga, el tallo comienza a elongarse mientras que a partir de V10, la espiga define el número de hileras, el número de granos por hilera y a partir de este momento la planta comienza una rápida acumulación de materia seca (Ritchie et al., 2002, como se cita en García & Espinosa, 2009). En relación a la eficiencia agronómica, los resultados mantuvieron la misma tendencia: en la cual los fraccionamientos triples fueron superiores a los tratamientos dobles, en el caso del tratamiento 20-40-40 se logró una EA de 33 kg de grano por kg N ha<sup>-1</sup> aplicado en comparación a los tratamientos dobles, los cuales se mantuvieron en 25 kg de grano por kg N ha<sup>-1</sup>, sin diferencias entre ambos casos (García, 2009, como se cita en García & Espinosa, 2009).

Chauhdary et al. (2019), al evaluar la respuesta de maíz en términos de biomasa, rendimiento y absorción de nutrientes para tres niveles de dosis crecientes, los cuales fueron fraccionados en tres, cuatros y cinco momentos. Los investigadores concluyen que existe una respuesta al fraccionamiento, siendo el caso del fraccionamiento en cuatro momentos el que presentó mayor respuesta en cuanto a las variables evaluadas. Dicho tratamiento se basó en la aplicación en partes iguales en las etapas de siembra, V4-V6, V8 y R1.

Por su parte, Silva et al. (2005) al evaluar el efecto de la aplicación de tres dosis de N divididas en partes iguales durante las etapas V3-V4, V7-V8 y V10-V11 en combinación con tres niveles de N aplicados en R1 (0, 50 y 100 kg/ha). Para dos híbridos de maíz observaron que una explicación de la respuesta en rendimiento se debe a la interacción entre las dosis aplicadas durante la fase vegetativa y R1. Cuando la dosis en el periodo vegetativo era baja ( $30 \text{ kg N ha}^{-1}$ ), con el agregado de 50 y  $100 \text{ kg N ha}^{-1}$  en R1 se lograba un rendimiento de 7,2 y  $8 \text{ Mg ha}^{-1}$  respectivamente, superando al testigo ( $4,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) asociado a una mejora en el componente número de granos por mazorca. Mientras que dosis altas ( $130 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) en la fase vegetativa, manteniendo los mismos niveles de N agregado en R1, las diferencias en rendimiento con respecto al testigo fueron menores: 0,7 y  $1,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Dado que esta fue explicada por diferencias en cuanto al PG logrado. Para dosis intermedia previo a R1 ( $80 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) no mostraron diferencias significativas en cuanto a la respuesta a N en R1.

Abraham y Falco (2016), con el objetivo de evaluar el incremento en la dosis N en condiciones de riego y seco, para distintos momentos del cultivo y el fraccionamiento de la dosis, concluyeron que, a pesar de la buena capacidad de aporte y los niveles iniciales de N hubo una respuesta al agregado de N con dosis óptimas de 173 y  $162 \text{ kg N ha}^{-1}$ , para riego y seco respectivamente. Además, destacan en el caso del riego, no se obtuvieron diferencias significativas entre fertilizar con una sola dosis a V6 y el fraccionamiento, mientras que en seco la aplicación del 100 por ciento de la dosis a V6, obtuvo una menor respuesta en rendimiento en comparación al fraccionamiento en diferentes etapas del cultivo.

Por otro lado, según Cazaban y Rubio (2014) al evaluar la respuesta de la fertilización tardía en comparación al método tradicional para condiciones de seco. Estos autores encontraron respuestas al agregado de N de 3331, 3411 y  $2516 \text{ kg ha}^{-1}$ , cuyas dosis óptimas físicas fueron algo menores de 89,7, 142,6 y 138,7 UN. En cuanto al momento de fertilización, estos autores resaltan la importancia de la disponibilidad inicial de N a V6 (la cual fue baja), y ello determinó que los mejores resultados se obtuvieron con el agregado de la dosis a V6 en comparación al fraccionamiento de 50/50 en V6 y V10.

### **2.2.7 Respuesta de la fertilización nitrogenada a seis hojas (V6)**

Varios investigadores sugieren que la mayor respuesta en rendimiento al N aplicado en V6 con respecto a la aplicación a la siembra está explicado por una mayor demanda del cultivo, dado que es el momento donde comienza la mayor utilización del N por lo que se contrasta la oferta con la demanda (Ceriani & Innella, 2012). Además, hay un mayor consumo que en general determina una menor humedad en el suelo (Calviño & Echeverría, 2003) y por lo tanto se reducen los procesos de pérdidas de N por desnitrificación (Wells & Bitzer, 1984, Sainz Rozas & Echeverría, 2001, como se cita en Calviño & Echeverría, 2003), inmovilización (Jokela & Randall, 1997, como se cita en Calviño & Echeverría, 2003) y lavado (Thomas et al., 1973, como se cita en Calviño & Echeverría, 2003). En esa línea, en condiciones de altas precipitaciones las aplicaciones en el estadio V6 serían más eficientes con respecto a las aplicaciones a siembra dado que se reducen las pérdidas de N (Barraco & Diaz Zorita, 2006).

Ceriani e Innella (2012), en un ensayo en nuestro país con el objetivo de evaluar la respuesta al fraccionamiento de la dosis en V6 y V10, en condiciones de riego y secano con respecto al manejo típico en V6, encontraron una importante respuesta al agregado de N y resaltan que en situaciones de secano resultó mejor aplicar todo en V6 que fraccionar la dosis en V6 y V10. Esto se explica dado que en secano un estrés nitrogenado a partir de V6 que se mantenga hasta estadios más avanzados compromete la capacidad del cultivo para recuperar rendimiento. Mientras que en situaciones de riego el cultivo puede tolerar un estrés nitrogenado temprano en el ciclo si se agrega N a V10.

En esa línea, en la región del litoral oeste del país Armand y Ferrari (2018) evaluaron la respuesta en dos sitios a dosis creciente de  $N\ ha^{-1}$  en tres momentos distintos: V6, V10 y VT. Estos investigadores, observaron una importante respuesta en V6, con dosis óptimas físicas de 252 y 189  $kg\ N\ ha^{-1}$ , cuyas diferencias estarían dadas por la capacidad de aporte de N del suelo, en la cual el sitio 2 presentó una superioridad del 38 por ciento.

### **2.2.8 Respuesta a aplicación tardía de N (V10-11)**

Según Maturano (2002) en el estado de V10, una deficiencia de N puede llevar a un menor número de hojas verdes por planta lo que provoca una reducción del IAF

en un 30 por ciento. En un trabajo sobre fertilización en maíz, Scharf et al. (2002), encontraron pérdidas de rendimiento de tres por ciento cuando la re-fertilización se retrasó hasta V12-V15, y de 15 por ciento cuando la re-fertilización ocurrió a partir de VT; dichos autores destacan la importancia de aplicar más tarde que V10-V11 para así evitar pérdidas de rendimiento.

En Uruguay desde hace 11 años se viene estudiando el efecto de la fertilización tardía en maíz, principalmente por el bajo aporte de N de los suelos y la necesidad de mayores dosis para expresar el potencial productivo de la especie. Perdomo y Hoffman (2011) encontraron que el agregado de 100 kg N ha<sup>-1</sup> en V10 obtuvo mejor respuesta que la misma dosis en V6 y su fraccionamiento en partes iguales en los momentos V6-V10, mientras que las aplicaciones en V10 obtuvieron la misma eficiencia de uso en comparación a la misma dosis en V6, y además resaltan que esto podría estar explicado por las abundantes precipitaciones que promovieron la expresión de altos rendimientos.

En relación al momento y dosis de fertilización, Cazaban y Rubio (2014) afirman que, en condiciones de secano, con una sola aplicación de 100 kg N ha<sup>-1</sup> a V10-11 los rendimientos se ven deprimidos (6427 kg ha<sup>-1</sup>), en comparación al agregado en V6 y su fraccionamiento en V6-V10 (9579 kg ha<sup>-1</sup> y 9.118 kg ha<sup>-1</sup> respectivamente), resultado de esperar teniendo en consideración los bajos niveles de nitratos en suelo a V6 (3,3 y 2,7 ppm). En línea con lo expuesto anteriormente, Ceriani e Innella (2012) afirman que en condiciones de buena disponibilidad hídrica no encontraron diferencias entre agregar N en V6, V10 y el fraccionamiento en V6 y V10, dado que los rendimientos fueron 8958 kg ha<sup>-1</sup> vs 8697 kg ha<sup>-1</sup> y 9233 kg ha<sup>-1</sup> respectivamente. En cambio, en condiciones de secano, el mejor resultado en la fertilización se obtuvo al agregar el N temprano (V6), logrando un rendimiento de 5071 kg ha<sup>-1</sup>, ya que los tratamientos con N en V10 y el fraccionamiento rindieron similar al testigo (3432 kg ha<sup>-1</sup>). Por tanto, el agregado de N tardío (V10) generó pérdidas en rendimiento y esto también pudo estar explicado debido a las bajas concentraciones de nitrato en suelo en el estadio V6.

Por otro lado, Abraham y Falco (2016) obtuvieron resultados distintos en función del régimen hídrico, por lo que, en secano, cuando el 100 por ciento del N fue aplicado en V6, se obtuvo un rendimiento menor al logrado cuando la aplicación



fue fraccionada en V6-V10 o V6-V12. En riego, por otra parte, se obtuvo el mismo rendimiento independientemente del momento de aplicación del N

## **2.3 FERTIRRIEGO EN EL CULTIVO**

### **2.3.1 Fertirriego en maíz**

A nivel mundial, el 85 por ciento del área agrícola regada se debe al manejo del riego superficial, el cual presenta ciertas desventajas para los sistemas agroecológicos, dado que los altos volúmenes de agua llevan a disminuir su eficiencia de su uso y genera pérdidas de nutrientes por lixiviación y escorrentía. Es por ello por lo que resulta necesario reducir dichas pérdidas de nutrientes para así reducir el costo de las aplicaciones de fertilizante, los cuales representan hasta un 40 por ciento de los costos de producción de maíz y poder mejorar así la competitividad del cultivo (Vidal et al., 2015). Según Sánchez (2000), en países como Israel, USA, Holanda, Italia y España, en donde utilizan esta técnica de manera generalizada en el desarrollo de su sistema de riego debido a la calidad de los fertilizantes. En ese sentido, destaca la capacidad que tiene este tipo de tecnología para generar el desarrollo de la producción agrícola en regiones semiáridas y áridas logrando rendimientos excelentes tanto en calidad como en cantidad.

Tanto la fertilización como el riego son dos de los factores de manejo más importantes que el productor es capaz de controlar durante el desarrollo del cultivo, generando la capacidad de influenciar positivamente en el rendimiento y calidad de la cosecha. Según Vidal et al. (2015) y Ernst et al. (2021), se podría lograr un mejor uso de los fertilizantes nitrogenados si este se incorpora al agua de riego, ya que las plantas lo absorben de manera más eficiente y la aplicación se distribuye de manera más homogénea. En ese sentido, el uso de la fertirrigación en los cultivos es una técnica que aprovecha el flujo hídrico para realizar el transporte de los nutrientes que requiere la planta como complemento a los que se le son proporcionados por el suelo.

La fertirrigación de los cultivos permite realizar una optimización en el uso del agua y los nutrientes, ya que los mismos son aplicados en un pequeño volumen de suelo denominado bulbo húmedo, que es donde se concentra el sistema radical de las plantas con el objetivo de promover la absorción radicular y no foliar. Es por esto

por lo que resulta importante conocer las exigencias del cultivo y la movilidad de los nutrientes a agregar para mejorar el manejo de los fertilizantes (Jasso et al., 2004; Hochmuth, 1992; Sánchez, 2000).

Diversos trabajos han implementado el fertirriego a través del método de riego por goteo en maíz. En dos trabajos, realizados por Wang et al. (2021) y Zhang et al. (2019), encontraron que la implementación de esta tecnología permite incrementar el rendimiento, acompañado de un aumento de la EUN y en conjunto a una mejora en la EUA del cultivo. Tal es así, que estudios realizados en maíz utilizando riego por goteo, constatan que la tecnología permite ahorrar entre el 30 y 50 por ciento de fertilizante sin afectar el crecimiento, ni el rendimiento del maíz (Fan et al., 2020; Zhang et al., 2019). En concordancia Chauhdary et al. (2019) encontraron que tratamientos bajo riego por goteo ahorraron un 48 por ciento de agua de riego con una profundidad de riego promedio de 556 mm, en comparación con 1063 mm bajo siembra en camellones.

En relación a los sistemas de riego por goteo, se trata de un sistema de riego de alta frecuencia, localizado, que se relaciona a producciones intensivas en el cual el agua es un recurso escaso y por ello depende de un diseño adecuado, de manera tal que el agua y el fertilizante tengan el mayor contacto posible con las raíces y así minimizar riesgo por aplicaciones excesivas y/o deficientes (Jasso et al., 2004).

En esa línea, varios investigadores resaltan una serie de ventajas que presenta el fertirriego, en sistemas de riego por goteo y entre ellas se destaca, además de aumentar el rendimiento y la calidad de la cosecha, la automatización del sistema de producción y la posibilidad de aprovechar el agua en regiones donde es muy escasa; dado que optimiza su uso de manera tal de reducir pérdidas por percolación y escurrimiento. En cuanto a la aplicación de fertilizantes, permite aplicar otros productos químicos, no daña al cultivo asociado al quemado de hojas como puede suceder en las aplicaciones terrestres tradicionales, reduce las labores, tiempo y dinero debido a la aplicación de fertilizantes. También permite realizar aplicaciones cuando el cultivo no está en condiciones para el ingreso de maquinaria, evita la compactación por huellas de dichas máquinas, es capaz de controlar la dosificación en función de la demanda del cultivo y reduce la contaminación de cuerpos de agua y acuíferos ya que es capaz de reducir pérdidas por lixiviación (Jasso et al., 2004; Sánchez, 2000; Vidal et al., 2015).

### 2.3.2 Fertirriego nitrogenado en el cultivo

Dentro de los nutrientes minerales, el nitrógeno, potasio, fósforo, calcio, magnesio y azufre son los más demandados por el cultivo de maíz. La acumulación más grande de los mismos ocurre entre las etapas V12 y R1, siendo la tasa de acumulación diaria para nitrógeno de  $4,1 \text{ kg N ha d}^{-1}$ . La fertilización se realiza en función a la curva de absorción de los nutrientes; brindando a la planta la cantidad necesaria de nutrientes en el momento adecuado para generar el máximo rendimiento. Dichas cantidades se obtienen de la diferencia entre lo que el cultivo requiere, la meta de rendimiento objetivo y el aporte del suelo (Castellanos et al., 2019). En esa línea, Sánchez (2000) afirma que en el caso de N se debe tener en cuenta que es un nutriente que responde a la curva de acumulación de biomasa, por lo que, si el objetivo es optimizar el uso, es necesario conocer y determinar la absorción y acumulación en las diferentes etapas del cultivo para así definir épocas de aplicación del fertilizante.

En cuanto a la producción de grano a partir de riego por goteo Martínez Gamiño et al. (2014), al comparar los efectos del fertirriego de N a dosis creciente, observó que solo por el suministro del fertilizante a través de este método, dosificada según etapa fenológica mejoró significativamente el rendimiento en grano, dado que todos los tratamientos superaron en un rango de 37 y 51 por ciento el rendimiento obtenido por el testigo ( $6936 \text{ kg ha}^{-1}$ ) manejado por riego en gravedad. A su vez, dosis de  $200 \text{ kg de N ha}^{-1}$  dosificado en el agua de riego fue suficiente para satisfacer los requerimientos nutricionales del cultivo. En concordancia Vidal et al. (2015), demostró que independientemente del método de aplicación del fertilizante y la dosis, el riego por pulso expresó un mayor rendimiento frente al riego tradicional.

Por su parte, Ernst et al. (2021) en un experimento cuyo objetivo fue evaluar alternativas de fraccionamiento de N en maíz bajo riego, ya sea manejada de forma tradicional o través del fertirriego, encontró diferencias significativas a favor del agregado de N, logrando un rendimiento promedio de  $11 \text{ Mg ha}^{-1}$ , superando al testigo cuyo rendimiento fue de  $3,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Sin embargo, no fue posible encontrar diferencias entre tratamientos asociados al método de fraccionamiento con el agregado del nutriente. En contraposición, Valencia García (2015) observó que, a partir de niveles crecientes de N, 10 de 12 variables analizadas presentaron diferencias significativas, siendo los niveles de  $180$  y  $240 \text{ kg N ha}^{-1}$  los que

presentaron para la variable rendimiento, los valores más altos en el experimento (cercano a  $10 \text{ Mg ha}^{-1}$ ).

En relación al uso de distintas fuentes (urea azufrada, urea líquida+TSA), Ernst et al. (2021) encontraron que no generó diferencias significativas en rendimiento. Esto puede deberse al efecto año, asociado una baja demanda atmosférica que redujo pérdidas por volatilización y de esta forma no se encontró diferencias en lo que refiere a la EUN. En esa línea, Valencia García (2015) resalta que por efecto fuentes de N (urea, nitrato de amonio) tampoco se encontraron diferencias significativas.

Ku

En contraposición a lo mencionado, Li et al. (2021) evaluaron los efectos de diferentes fuentes nitrogenadas (urea, CAN, nitrato de amonio y sulfato de amonio), durante 3 temporadas, aplicados en Fertirrigación, con la misma dosis, y se estimó para maíz: el rendimiento en grano, EUN y pérdidas de N aparente. Estos investigadores concluyen que la fertilización N en fertirriego mostró diferencias significativas en el rendimiento, específicamente en él, número de espigas, número de granos por espiga y PG con respecto al testigo. Además, al usar urea y sulfato de amonio, se demostró una superioridad promedio de 12 por ciento, en comparación al resto de los fertilizantes. En cuanto a la EUN y las pérdidas de N, la urea presentó en promedio un incremento en la absorción de N de 12 por ciento y redujo las pérdidas de N en un 73 por ciento, en comparación con sulfato de amonio, CAN y nitrato de amonio. Por lo tanto, dichos autores recomiendan la urea como fuente óptima de N en sistemas de fertirrigación.

En relación con la biomasa producida, Ernst et al. (2021) al determinar la variable en los estados: V3, V6, R1 y R6, concluyeron que a partir del estado R1 se diferenciaron los tratamientos fertilizados con respecto al testigo, dado que el promedio de tratamientos fertilizados obtuvo una producción de biomasa de  $25 \text{ Mg ha}^{-1}$  y  $14 \text{ Mg ha}^{-1}$  para el testigo. Con respecto a los tratamientos fertilizados, no existieron diferencias significativas, sin embargo, existe una tendencia a un incremento de la producción de biomasa de los tratamientos a partir de R1 bajo fertirriego y fraccionamiento semanal.

De acuerdo con Martínez Gamiño et al. (2014) al comparar en función de la dosis y fraccionamiento tanto en rendimiento como la producción de rastrojo, observó

que todos los tratamientos que recibieron N a través de riego por goteo superior a los 200 kg N ha<sup>-1</sup> fueron estadísticamente iguales (no hubo efecto dosis entre ellos) y superiores a los tratamientos testigo con dosis de 140 kg N ha<sup>-1</sup>; siendo el tratamiento con 300 kg N ha<sup>-1</sup> el que obtuvo la mayor biomasa de rastrojo de 42,5 Mg ha<sup>-1</sup> del ensayo. En el caso de la variable forraje verde, independientemente de la dosis de N. Los tratamientos cuyo suministro del nutriente fue a partir de riego por goteo, fueron superiores al tratamiento en riego por gravedad. Además, existió una tendencia favorable en la medida que se incrementó la dosis de 200 a 400 kg N ha<sup>-1</sup> y a su vez, se encontró a dosis baja respuesta al fraccionamiento: dado que el tratamiento con 140 kg N ha<sup>-1</sup> suministrado en riego por goteo fue superior en un 51 por ciento a la misma dosis, pero en un sistema de riego por gravedad (73,4 Mg ha<sup>-1</sup> vs 49,2 Mg ha<sup>-1</sup>).

Chauhdary et al. (2019), al comparar la productividad de maíz en función de frecuencias de riego diarias, cada 3 días y 5 días, y tasas de fertirrigación del 100, 75 y 50 por ciento de la dosis recomendada, observaron que los mejores resultados en cuanto a rendimiento de grano, peso de materia seca, altura de planta y productividad de agua se lograron a frecuencia de riego diaria y con el total de la dosis recomendada. En ese sentido, Kumar et al. (2016) al comparar distintas frecuencias de fertirrigación quincenal, semanal y diarios a distintas presión de trabajo, concluye que a igualdad de dosis de fertilizante, los rendimientos más altos se asocian a frecuencias de fertirriego más altas.

En esa línea Canzani Valenzuela (2022), al evaluar estrategias de fertilización con nitrógeno (N) en condiciones de riego y seco, con dosis de 150 kg N ha<sup>-1</sup> entre los estadios V2-V6 y V2-VT: siendo en este último caso con fraccionamientos de 5 y 8 momentos respectivamente. Dicho autor, observó una interacción en condiciones de riego y el fraccionamiento de N, siendo en el caso del tratamiento de 8 momentos de fraccionamientos, el que obtuvo incrementos significativos en el rendimiento. A nivel de componentes de rendimiento, la variable determinante de las diferencias entre tratamientos fue el PG y no el NG. En este trabajo, se concluye que bajo condiciones de riego, el fraccionamiento de N no presentó efectos sobre el NG, posiblemente porque las aplicaciones hasta V6 permiten satisfacer las necesidades hasta el final del PC, sin necesidad de otro momento de fertilización. Mientras que la variable PG sí mostró diferencias significativas, dejando en

evidencia la necesidad del cultivo bajo riego de acompañar la demanda a lo largo del ciclo, incluyendo los requerimientos de N durante la etapa de llenado para lograr rendimientos potenciales.

### **3 MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1 UBICACIÓN DEL EXPERIMENTO**

El experimento tuvo lugar en la Estación Experimental “Dr. Mario A. Cassinoni” (EEMAC) de Facultad de Agronomía, Universidad de la República, ubicada sobre ruta 3, km 363, en el Departamento de Paysandú, Uruguay, durante el año agrícola 2020-2021. El ensayo se realizó en el campo experimental de riego, en un suelo clasificado como Brunosol eútrico típico (Háplicos) superficial a moderadamente profundos, pertenecientes a la unidad de suelo San Manuel desarrollada sobre la Formación Fray Bentos. El material híbrido utilizado en la siembra fue Nidera 7818 viptera 3 con una población de 100 mil plantas ha<sup>-1</sup>, el cual fue sembrado el 31 de octubre de 2020.

#### **DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO**

El cultivar utilizado fue NS7818Viptera3, que posee tres eventos transgénicos los cuales les confieren resistencia a lepidópteros (BT11 y MIR162) y a glifosato (GA21). La población lograda fue de 100 mil plantas ha<sup>-1</sup>, siendo sembrado el 31 de octubre de 2020. El control de malezas se realizó a través de una aplicación en pre-emergencia de Dual Gold (2l/ha<sup>-1</sup>). Mientras que no fue necesaria la aplicación de insecticidas para el control de plagas.

El experimento consistió en la aplicación de 10 tratamientos con manejos diferentes de fertilización nitrogenada dentro de los cuales variaron las dosis, el fraccionamiento y el método de aplicación siendo estas última fertirriego y fertilización por cobertura. El diseño utilizado fue un Diseño Completamente al Azar que se conformó de cuatro bloques, diez tratamientos y un testigo por bloque, teniendo así un total de cuarenta y cuatro unidades experimentales (UE). Los bloques fueron de 46,2 m de largo y 8 m de ancho, cuya área total fue de 369,6 m<sup>2</sup>. Con respecto a las dimensiones de cada UE, estas se manejaron a través de parcelas experimentales cuya dimensión fue de 8 m de largo por 4,2 m de ancho totalizando un área por parcela de 34 m<sup>2</sup>.

**Tabla 1***Tratamientos evaluados en el experimento*

<b>Tratamientos</b>	
<b>T1</b>	Fertilizante sólido 100 kg N ha <sup>-1</sup> aplicado a V6
<b>T2</b>	Fertilizante sólido 100 kg N ha <sup>-1</sup> fraccionado 50% a V6 y 50% en V10
<b>T3</b>	Fertilizante sólido 200 kg N ha <sup>-1</sup> aplicado a V6
<b>T4</b>	Fertilizante sólido 200 kg N ha <sup>-1</sup> fraccionado 50% a V6 y 50% en V10
<b>T5</b>	Fertirriego 100 kg N ha <sup>-1</sup> aplicado a V6
<b>T6</b>	Fertirriego 100 kg N ha <sup>-1</sup> fraccionado 50% a V6 y 50% en V10
<b>T7</b>	Fertirriego 200 kg N ha <sup>-1</sup> aplicado a V6
<b>T8</b>	Fertirriego 200 kg de N ha <sup>-1</sup> fraccionado 50% a V6 y 50% en V10
<b>T9</b>	Fertirriego 100 kg N ha <sup>-1</sup> con frecuencia de aplicación cada 4 días
<b>T10</b>	Fertirriego 200 kg N ha <sup>-1</sup> con frecuencia de aplicación cada 4 días
<b>T11</b>	Testigo sin N

Se buscó comparar en primer lugar, las fertilizaciones sólidas de N en cobertura y sus respectivas formas de fraccionamiento frente a las mismas dosis de fertilización y fraccionamiento, pero a través del fertirriego. En segundo lugar, comparar el fertirriego con un fraccionamiento de alta frecuencia de aplicación de N frente a las estrategias ya mencionadas en el punto anterior a través del fertirriego.

Los tratamientos contaron con el mismo manejo de riego, sin deficiencias hídricas durante todo el ciclo. El método de riego utilizado 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 manejo de riego, consistió en disponer un nivel de agua disponible (AD) del suelo por encima del 60% durante el PC y por encima del 40% en el resto de las etapas del cultivo. Se consideró como PC a la etapa ubicada 15 días antes del inicio de la floración femenina y 15 días posteriores a la misma. El riego fue empleado según balances hídricos de paso diario, los cuales consideraron  $\Delta H = PP + R - ET_c$  siendo  $\Delta H$  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 PP, temperaturas y radiación solar incidente utilizados se obtuvieron a partir de la Estación meteorológica automática de la EEMAC (Vantage Pro 2TM modelo 6510).



En esa condición hídrica, se evaluó la producción de biomasa y el rendimiento en grano del cultivo en función de los diferentes manejos de fertilización planificados que implican distintas disponibilidades del nutriente en diferentes momentos como lo son a inicio del periodo crítico, fin del periodo crítico y a cosecha.

## **3.2 DETERMINACIONES REALIZADAS**

### **3.2.1 A campo**

A inicios del periodo crítico (entendiéndose el mismo por periodo comprendido entre 15 días antes y 15 días después de la floración femenina) para contabilizar el contenido de materia seca, se cortaron y pesaron las plantas que se encontraban en un metro lineal de cada tratamiento en cada bloque; de la misma línea, se eligió una planta como submuestra representativa del resto y se le midió el peso en fresco.

Al finalizar el periodo crítico del cultivo, se realizó el mismo procedimiento, se contó el número de plantas que se encontraron en un metro lineal de cada tratamiento en cada bloque y el peso de estas; así como el número de espigas, el peso de las mismas y el peso de las chalas. Se volvió a tomar una planta como submuestra, a la cual se le determinó su peso en fresco, así como el de la chala y la espiga. Finalmente, con los mismos se determinó kg MS de la planta, kg MS de chala, kg MS de espiga y peso total en kg de MS.

El rendimiento en grano se estimó a partir de la cosecha de nueve metros lineales de plantas de los tres surcos centrales de cada tratamiento, en cada bloque. De las mismas, se determinó número de plantas/ocho metros y peso de estas, número de espigas/ocho metros y peso de estos, peso de marlos/ocho metros, peso de grano/ocho metros y el peso promedio de 100 granos.

A dichos ocho metros se le sumó una submuestra de un metro lineal a la cual se le habían determinado los mismos parámetros que se mencionó anteriormente: número de plantas/metro, peso de plantas/metro, número de espigas/metro y peso de espigas/metro. A esta submuestra además se determinó altura de cada espiga, número de hileras/espiga y número de granos/hilera de cada espiga recolectada del metro lineal; a las mismas también se le determinaron los kg de granos totales, los kg de chalas totales, los kg de marlos totales; y de los marlos y chalas del metro se le realizó el peso individual a una chala y un marlo respectivamente.

### **3.2.2 En laboratorio**

Las submuestras de planta, chala y marlo que se recolectaron fueron secadas hasta obtenerse el peso constante de las mismas para obtener el peso total de MS ha<sup>-1</sup>. Las espigas cosechadas se desgranaron y se determinó la humedad del grano cosechado y el rendimiento corrigiendo la humedad a 14%.

## **3.3 HIPÓTESIS BIOLÓGICA**

- 1) La eficiencia de la fertilización nitrogenada en maíz con riego se mejora a través de la fertirrigación.
- 2) La eficiencia de la fertirrigación nitrogenada en maíz se mejora con el fraccionamiento de las dosis

## **3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

### **3.4.1 Modelo Estadístico**

El modelo estadístico utilizado fue el Diseño en Bloques Completamente al Azar (DBCA), con cuatro bloques:

El análisis se realizó mediante el software estadístico “InfoStat” versión estudiantil 2020. Por medio de este software, se realizó un análisis de varianza y se hicieron pruebas de comparación múltiple de medias (según Tukey al 5%).

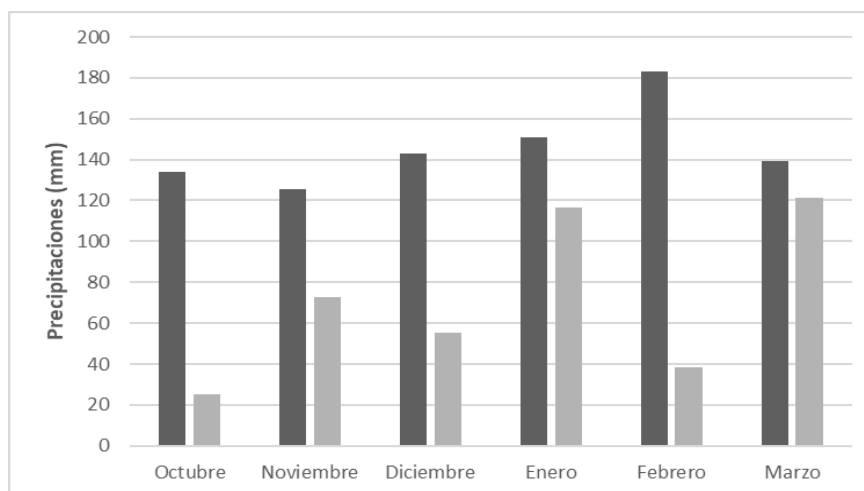
## **3.5 CARACTERÍSTICA CLIMÁTICAS**

### **3.5.1 Precipitaciones**

En la Figura 1, se pueden observar las precipitaciones acumuladas en la zafra 2020-2021 y las precipitaciones medias acumuladas mensualmente de la serie histórica 2002-2021, obtenidas según los registros de la estación meteorológica de la Estación Experimental “Dr. Mario A. Cassinoni” (EEMAC).

### Figura 1

*Precipitaciones (mm) ocurridas en la zafra 2020-2021 y valores promedios para la serie histórica comprendida de 2002 a 2021 en la EEMAC*



*Nota.* Columna gris oscura: PP promedio mensual acumulado (mm-histórico 2002-2021). Columna gris clara: PP mensual zafra 2020-2021.

En la Figura 1, se puede observar que las precipitaciones comprendidas entre octubre (2020) y marzo (2021) fueron inferiores a la media histórica. Dentro de los cuales, los meses de enero y marzo fueron los que presentaron valores de precipitación (mm) levemente inferiores a la media histórica, cuya diferencia con respecto al acumulado histórico fue de 35 y 18 mm, respectivamente. Por otra parte, los meses de octubre, noviembre, diciembre y febrero, fueron los meses en los cuales se registraron las mayores diferencias con respecto a la media histórica. En ese sentido, se observa una diferencia de precipitaciones de 109, 65, 83 y 144 mm respectivamente en relación a los valores promedio observados a partir de la serie histórica de 2002 a 2021.

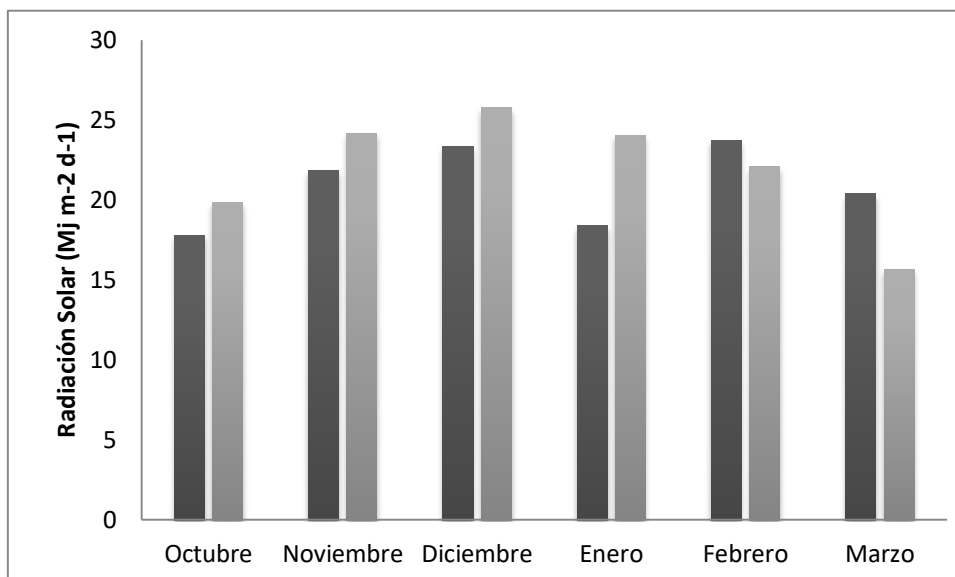
En relación a las precipitaciones acumuladas durante el ciclo del cultivo, fueron de 429 mm obteniendo así una diferencia de 446 mm con la media histórica (2002-2021) que fue de 875 mm.

### 3.5.2 Radiación Solar

En la Figura 2, se muestran los valores diarios promedios de radiación solar incidente en los meses de la zafra 2020-2021 y los valores medios diarios mensuales de radiación solar incidente para la serie histórica 2002-2021, según los registros de la estación meteorológica de la EEMAC.

**Figura 2**

*Radiación solar ( $MJ m^{-2} d^{-1}$ ) diaria incidente promedio según la EEMAC en la zafra 2020-2021 y la radiación diaria incidente promedio para la serie histórica 2020-2021*



*Nota.* Columna gris oscura: Radiación media diaria incidente de la serie histórica 2002-2021. Columna gris clara: Radiación media diaria incidente de la zafra 2020-2021.

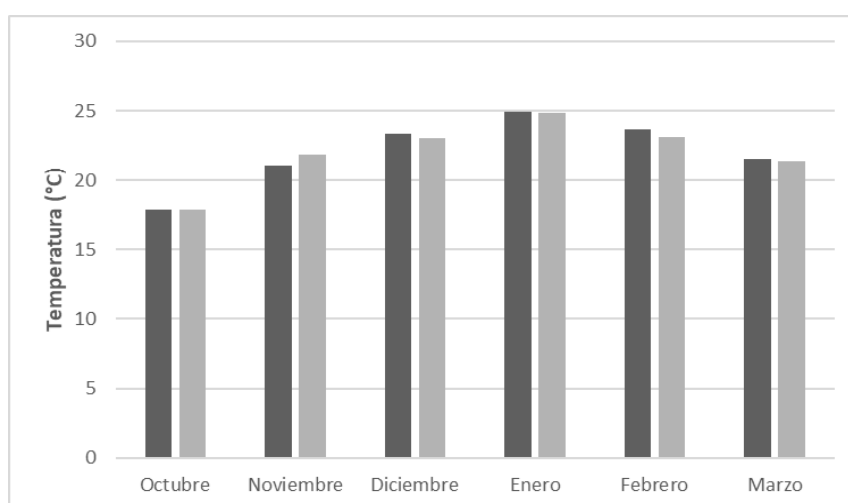
Se puede observar que, en los meses del periodo comprendido entre octubre 2020 y marzo 2021, el promedio de radiación solar diaria incidente se encontró por encima del promedio histórico los meses de octubre, noviembre, diciembre y enero. En contraposición los meses de febrero y marzo, se encontraron más alejados del promedio histórico con una diferencia de 1.6 y 4.7  $MJ m^{-2} d^{-1}$  respectivamente, en relación con el promedio de radiación diaria incidente de la serie histórica 2002-2021.

### 3.5.3 Temperatura

La Figura 3, muestra las medias mensuales de temperatura según la serie histórica 2002-2021 y las temperaturas medias mensuales para la zafra 2020-2021 según los registros de la estación meteorológica de la Estación Experimental Mario A Cassinoni (EEMAC).

#### Figura 3

*Temperaturas (°C) medias mensuales durante la zafra 2020-2021 y promedios mensuales para dicho periodo según la serie histórica comprendida entre el 2002 y el 2021 en la EEMAC*



*Nota. Columna gris oscura: Temperatura promedio mensual de la serie histórica 2002-2021. Columna gris clara: Temperatura promedio mensual de la zafra 2020-2021.*

Como se puede observar en la Figura 3, las temperaturas promedio ocurridas durante la zafra 2020-2021 y la serie histórica fueron similares entre sí, alcanzado el valor máximo promedio en el mes de enero y siendo levemente inferiores en una única oportunidad durante el mes de noviembre.

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Evolución de la Materia Seca

En la Tabla 2, se puede apreciar la MS acumulada por unidad de superficie, durante las tres etapas evaluadas: inicio del periodo crítico (PC), final del periodo crítico (PC) y cosecha, para las distintas combinaciones de dosis, fraccionamiento y método de aplicación estudiadas. Los fraccionamientos de los tratamientos se basaron en la escala fenológica Ritchie y Hanway (1966).

**Tabla 2**

*Evolución de la materia seca (Mg MS ha<sup>-1</sup>) para cada tratamiento según dosis, momento y método de aplicación del fertilizante nitrogenado, evaluado al inicio del PC, final del PC y cosecha*

Tratamientos	INICIO PC	FIN PC	COSECHA
100 Sol.V6	5,9	14,95 ab	22,6 abc
200 Sol.V6	5,1	14,3 ab	26,1 ab
100 Sol. 50V6-50V10	5,1	13,3 ab	19,2 bcd
200 Sol. 50V6-50V10	4,8	15,2 a	25,3 abc
100 Liq.V6	6,2	16,2 a	25,2 abc
200 Liq.V6	5,8	16,8 a	29,2 a
100 Liq. 50V6-50V10	6	15,7 a	23 abc
200 Liq. 50V6-50V10	4,7	14,5 ab	29,5 a
100 c/4d	4,7	15,4 a	18,1 cd
200 c/4d	5,6	15,6 a	27,8 a
Testigo	4,6	8,8 b	13,4 d

*Nota.* Las letras diferentes en cada componente indican diferencias significativas (p-valor < 0,05). Siendo el tratamiento V6 una única fertilización, mientras que en V6-V10 se fraccionó 50% en cada estadio respectivamente. El tratamiento c/4d hace referencia a una fertilización de alta frecuencia con fraccionamientos periódicos cada 4 días entre los estadios V6 y R1. Las siglas Sol y Liq. hacen referencia al tipo de fuente que compone el fertilizante, urea sólida (aplicado en cobertura) o líquida (fertirriego). La dosis 100 y 200 está expresada en kg de N/ha. Elaborado a partir de Ritchie y Hanway (1966).

En la tabla 2, se puede constatar que no se detectaron diferencias en la MS depositada al inicio del PC, mientras que al final del PC se aprecia diferencias con respecto al testigo, lo cual indica que la fertilización con N mostró una respuesta positiva en la producción de MS. Por otro lado, al observar la MS a cosecha, la mayor diferencia entre tratamientos se explica por una tendencia positiva en la MS asociada principalmente a la fertilización líquida. En ese sentido, se evidencia una interacción entre la fertilización líquida y dosis de 200 kg de N ha<sup>-1</sup> que determinó

diferencias de hasta 10 Mg MS ha<sup>-1</sup> a favor con respecto a los demás tratamientos. Los resultados observados son superiores a los reportados por Rameau y Van den Dorpel (2016), quienes evaluaron la producción de MS a partir de la fertilización sólida. Por lo tanto, se puede concluir que la fertilización líquida mejoró la eficiencia de absorción del N agregado y en conjunto con dosis iguales o superiores a 100 kg de N ha<sup>-1</sup> a partir de V6 se tradujo en una mayor producción de MS.

En cuanto a la evolución de la MS, la mayor proporción de la acumulación de MS ocurrió durante el PC, ya que al final del PC los tratamientos lograron triplicar el valor de MS con respecto al valor inicial. En cambio, durante el periodo que consiste entre el final del PC y cosecha, no se observaron mayores diferencias en la acumulación de MS. La menor evolución de la MS a cosecha se explica debido a lo que sucede durante la fase de llenado de granos. Durante dicha fase, los órganos vegetativos experimentan una removilización y translocación de reservas hacia los granos, dando lugar a una pérdida neta en el peso de dichos órganos vegetativos hacia el final del ciclo del cultivo, no experimentando aumentos significativos en la MS (Andrade et al., 2023).

#### 4.2 Rendimiento en grano y componentes numéricos principales

En la Tabla 3, se presentan el rendimiento, PG y NG en función de las distintas estrategias de fertilización evaluadas. Los fraccionamientos de los tratamientos se basaron en la escala fenológica Ritchie y Hanway (1966).

**Tabla 3**

*Rendimiento ( $Mg\ ha^{-1}$ ), número de granos por metro cuadrado (NG) y peso de mil granos (PG, g) según dosis, fuente y fraccionamiento del nitrógeno evaluados*

Tratamiento	Rendimiento (Mg.ha-1)	NG.m2	PMG (g)
100 Sol.V6	11,7 cd	3970 ab	295 cd
200 Sol.V6	14,5 abc	4231 ab	343 abc
100 Sol. 50V6-50V10	10,7 d	3590 bc	300 bcd
200 Sol. 50V6-50V10	14 abc	4209 ab	332 abc
100 Liq. V6	14,1 abc	4486 ab	315 abcd
200 Liq V6	15,9 a	4569 a	347 ab
100 Liq. 50V6-50V10	12,3 bcd	4037 ab	305 bcd
200 Liq. 50V6-50V10	15,2 ab	4272 ab	355 a
100 Liq. c/4d	9,7 d	3346 c	291 d
200 Liq. c/4d	14,8 ab	4504 ab	331 abcd
Testigo	5,4 e	2306 d	233 e

*Nota.* Las letras diferentes en cada componente indican diferencias significativas ( $p$ -valor < 0,05). Siendo el tratamiento V6 una única fertilización, mientras que en V6-V10 se fraccionó 50% en cada estadio respectivamente. El tratamiento c/4d hace referencia a una fertilización de alta frecuencia con fraccionamientos periódicos cada 4 días entre los estadios V6 y R1. Las siglas Sol y Liq. hacen referencia al tipo de fuente que compone el fertilizante, urea sólida (aplicado en cobertura) o líquida (fertirriego). La dosis 100 y 200 está expresada en kg de N/ha. Elaborado a partir de Ritchie y Hanway (1966).

En la Tabla 3, se muestran los resultados de rendimiento, en ese sentido, es importante destacar que el testigo permite estimar el N aportado por el suelo. Por tanto, si se considera el rendimiento del testigo y además que el maíz requiere  $22\ kg\ N\ ha^{-1}$  aproximadamente para producir una tonelada de grano (Melgar & Torres Duggan, 2004; Vidal et al., 2015), se observa que el suelo aportó  $124\ kg\ N\ ha^{-1}$  durante el ciclo del cultivo. Por otro lado, se aprecia una respuesta importante al N agregado, lo cual era esperable en condiciones de riego (Ceriani & Innella, 2012). En relación a los tratamientos fertilizados, se aprecia que 200 Liq.V6, 200 Liq. 50V6-50V10, 200 Liq c/4d, 100 Liq.V6, 200 Sol.V6 y 200 Sol. 50V6-50V10,



fueron iguales entre ellos y superiores al resto; cuyos valores fueron similares a los reportados por Giménez (2012) y Vidal et al. (2015).

En la Tabla 3, se puede observar que el factor que presentó mayores diferencias entre tratamientos fue la dosis, cuya respuesta en rendimiento al variar de 100 a 200 kg N. ha<sup>-1</sup> representó un aumento de 21 %. Esto deja en evidencia, que hay una tendencia a obtener mayores rendimientos con dosis de 200 kg N ha<sup>-1</sup>. Por otro lado, Salvagiotti (2014) afirma que para producir 13 a 15 Mg ha<sup>-1</sup> es necesario que el cultivo absorba entre 260 y 300 kg N ha<sup>-1</sup> durante el ciclo. En este sentido, si se considera el aporte de N del suelo y las dosis agregadas en este ensayo, se observa una tendencia a obtener los mismos resultados, pero con una absorción que se ubica entre 224 y 324 kg N ha<sup>-1</sup>. En contraposición Rameau y Van den Dorpel (2016) observaron rendimientos similares con dosis de 150 kg N ha<sup>-1</sup>, no reportando diferencias con dosis mayores.

En relación a los resultados sobre el fraccionamiento, se aprecia que dosis de N aplicadas únicamente a V6 fueron suficientes para cubrir las necesidades de N durante el PC y el ciclo de cultivos. Esto se podría explicar debido a la ausencia de precipitaciones importantes durante dicho periodo y a una posible interacción positiva entre el N y el riego, que determinó menores diferencias entre los fraccionamientos evaluados en cuanto a pérdidas de N. Se interpreta que en dichas condiciones, cuando el N es aplicado a V6, coincide con una demanda creciente del cultivo, por ende, esto llevó a incrementos en la tasa de absorción del N, redujo la humedad del suelo generando pérdidas de N similares con respecto a otros fraccionamientos siendo comparable con lo observado por Calviño y Echeverría (2003).

Por otro lado, al comparar los rendimientos obtenidos por 100 Liq. c/4d con respecto a 100 Liq. V6 en Tabla 3, se observan diferencias explicadas por el fraccionamiento de la dosis. Es posible que la mayor frecuencia de aplicación del N en fertirriego haya expuesto a mayores pérdidas por desnitrificación al tratamiento 100 Liq. c/4d con respecto a 100 Liq. V6. En ese sentido, se ha reportado que los eventos de riego y fertirrigación nitrogenada en conjunto pueden provocar incrementos en las pérdidas de N mencionadas (Ning et al., 2019). Estos resultados demuestran la importancia de poner en estudio estrategias que permitan optimizar el momento y los niveles apropiados de riego, combinados con la

aplicación de N para así disminuir las pérdidas de dicho nutriente cuando se utilizan estrategias con dosis menores a  $200 \text{ kg de N ha}^{-1}$ . Por lo tanto, se concluye que para el rango de dosis evaluado la estrategia más recomendable fue aplicar la dosis de N a V6.

Ahora bien, al contrastar las fuentes evaluadas no se observaron diferencias entre tratamiento, lo que podría explicarse por las condiciones climáticas del año. Esto pudo determinar una reducción en el potencial de pérdidas de N en todos los tratamientos lo cual coincide con lo reportado por Ferraris et al. (2009), Guardia et al. (2017) y Li et al. (2021). Por otro lado, al comparar los rendimientos obtenidos para cada fuente, se aprecia un comportamiento de superioridad de la fuente líquida con respecto a la fuente sólida. En ese sentido, se observa que la incorporación del N al agua de riego presentó una tendencia positiva, que podría estar explicada en cuanto a efectos beneficiosos sobre la absorción radicular, mejoras en la uniformidad y la eficiencia de la aplicación del fertilizante, lo cual es comparable con los resultados de Vidal et al. (2015). Esto podría explicar el rendimiento observado de 100 Liq. V6 con respecto a los demás tratamientos superiores cuya principal diferencia se debe a la dosis de N utilizada. Por lo tanto, se deja en evidencia que las ventajas de la elección de la fuente líquida y las condiciones climáticas durante el año evaluado tuvieron influencia en los resultados para la estrategia de fertilización mencionada.

En relación a los resultados con dosis de  $100 \text{ kg N ha}^{-1}$ , se observa que la elección de la fuente de fertilizante y el fraccionamiento de la dosis pueden tener un impacto significativo en el rendimiento del cultivo. Al considerar el aporte del suelo, se observó que 100 Sol. V6 necesitó  $16 \text{ kg N Mg}^{-1}$  grano producido y 100 Liq. V6 requirió  $11 \text{ kg N Mg}^{-1}$  grano producido, lo que representa una mejora en eficiencia de uso del fertilizante de  $5 \text{ kg N Mg}^{-1}$  grano al cambiar la fuente de sólido a líquido. Por otra parte, al fraccionar la dosis de fertilizante líquido, se observó una pérdida de eficiencia de  $12 \text{ kg N Mg}^{-1}$  grano producido de la estrategia 100 Liq. c/4d ( $23 \text{ kg N Mg}^{-1}$ ) con respecto a 100 Liq. V6. Esto último difiere con lo informado por Ernst et al. (2021), quienes no reportan diferencias en cuanto a la eficiencia de uso por efecto del fraccionamiento.

En relación al NG, se observan diferencias a favor de la estrategia 200 Liq.V6 con respecto a 100 Sol. 50V6-50V10 y 100 Liq. c/4d. Por lo tanto, se desprende que

estas diferencias entre tratamientos están explicadas por el efecto de la dosis de 200 kg N ha<sup>-1</sup> con respecto a los 100 kg N ha<sup>-1</sup>. Además, se constató que esta disminución en la dosis con respecto a 200 Liq. V6, implicó una reducción de 22 y 27% en el NG obtenido para los tratamientos mencionados, respectivamente. Por otro lado, los bajos valores de NG mostrados por ambas estrategias con respecto a los demás tratamientos, sugieren un efecto negativo del fraccionamiento de la dosis de N a V6 cuando esta es de 100 kg N ha<sup>-1</sup>. Esto indica que, para las condiciones evaluadas, fraccionamientos que determinen dosis menores a 100 Kg de N ha<sup>-1</sup> a partir de V6 no permiten cubrir la demanda creciente de N por parte de la espiga lo que afectó su crecimiento y por lo tanto el NG.

En lo que respecta a la fuente, no se muestran diferencias en el NG, lo cual concuerda con Bonelli et al. (2017), quien afirma que usar fuentes sólidas y líquidas puede no generar diferencias y que esto está asociado al potencial de pérdidas de N. En ese sentido, si se considera que la principal pérdida de N a partir de la urea está asociada al proceso de volatilización, el cual depende principalmente de las temperaturas y la humedad del suelo. Se interpretó que, a partir de la suma del agua de riego y precipitaciones durante el PC, difícilmente se haya saturado el suelo, por lo tanto, es posible que las pérdidas potenciales por volatilización fueran bajas y no afectarán al NG.

En la Tabla3, se observan diferencias en el PG explicadas por una tendencia a favor de los tratamientos que adicionaron 200 kg de N ha<sup>-1</sup>, cuya superioridad promedio fue de 13% en el PG en relación a los tratamientos con dosis de 100 kg de N ha<sup>-1</sup>. Por otra parte, se observa que al comparar los tratamientos cuya aplicación se realizó a V6, las diferencias entre ellos estuvieron explicadas por la dosis de N, ya que se aprecia una tendencia positiva en el PG por el incremento de esta. Se concluye que a través de la aplicación a V6 lo que se afecta negativamente es el PG y la forma de evitar el riesgo de que el N sea deficiente durante el llenado de granos y por tanto obtener un PG bajo, es manejando la dosis de N.

En relación a los fraccionamientos, no se observan diferencias importantes entre agregar 100 y 200 kg de N ha<sup>-1</sup> a V6 o fraccionado, aunque el PG máximo se obtuvo con la estrategia 200 Liq. 50V6-50V10. Estos resultados coinciden con Ceriani e Innella (2012) y Armand y Ferrari (2018) quienes tampoco observaron diferencias al evaluar el fraccionamiento de 100 y 200 kg de N ha<sup>-1</sup> respectivamente. Por otra

parte, es posible que el volumen bajo de precipitaciones del año agrícola haya influenciado los resultados. Por lo tanto, se concluye que no hubo respuesta al fraccionamiento con respecto a la aplicación de la dosis total a V6, debido a un bajo potencial de pérdidas de N durante el llenado de granos.

Los resultados del PG muestran que el uso de fuentes líquidas tuvo una tendencia favorable, se observa que el uso de esta podría modificar la disponibilidad de N durante el llenado de grano. Por lo tanto, es posible que la tendencia observada esté asociada a una reducción del costo metabólico de la translocación de nutrientes para la planta, mejorando así la relación fuente-fosa debido a la mayor disponibilidad de N en el suelo durante la etapa de llenado efectivo de granos. De esta forma, se mantuvo un flujo constante de nutrientes hacia los granos, lo que explicaría la respuesta observada en el PG de 100 Liq. V6, a pesar de que presentó una dosis baja. En este trabajo se concluye que el uso de fuentes líquidas de N en la fertilización de maíz puede ser beneficioso para mejorar el rendimiento, el llenado de granos, ya que la planta puede destinar menos recursos desde hojas y tallos y acompañar la demanda de nutrientes para el crecimiento de los granos.

### 4.3 Subcomponentes numéricos del rendimiento y tasa de crecimiento del cultivo durante el periodo crítico

En la Tabla 4 se presentan los resultados de los subcomponentes numéricos del rendimiento: NEP, NH Esp., NGH, NGE Esp según dosis, fraccionamiento y fuentes nitrogenadas evaluadas. Los fraccionamientos de los tratamientos se basaron en la escala fenológica Ritchie y Hanway (1966).

**Tabla 4**

*Subcomponentes del rendimiento: número de espigas por planta, número de hileras por espiga número de granos por hilera y número de granos por espiga para los distintos tratamientos*

<b>Sub-Componentes numéricos del rendimiento</b>				
<b>Tratamientos</b>	<b>NEP</b>	<b>NH Esp.</b>	<b>NGH</b>	<b>NG Esp.</b>
<b>100 Sol. V6</b>	1	16 abc	26 b	296 cd
<b>200 Sol. V6</b>	1	16 abc	28 ab	343 abc
<b>100 Sol. 50V6-50V10</b>	1	15 bc	24 b	300 bcd
<b>200 Sol. 50 V6-50 V10</b>	1	17 abc	32 a	332 abcd
<b>100 Liq. V6</b>	1	16 abc	31 a	316 abcd
<b>200 Liq. V6</b>	1	17 ab	32 a	348 ab
<b>100 Liq. 50V6-50V10</b>	1	16 abc	29 ab	305 bcd
<b>200 Liq. 50V6-50V10</b>	1	17 a	31 a	356 a
<b>100 Liq. c/4d</b>	1	15c	26 b	292 d
<b>200 Liq. c/4d</b>	1	17 abc	31 a	331 abcd

*Nota.* Las letras diferentes en cada componente indican diferencias significativas (p-valor < 0,05). Siendo el tratamiento V6 una única fertilización, mientras que en V6-V10 se fraccionó 50% en cada estadio respectivamente. El tratamiento c/4d hace referencia a una fertilización de alta frecuencia con fraccionamientos periódicos cada 4 días entre los estadios V6 y R1. Las siglas Sol. y Liq. hacen referencia al tipo de fuente que compone el fertilizante, urea sólida (aplicado en cobertura) o líquida (fertirriego). La dosis 100 y 200 está expresada en kg de N/ha. Elaborado a partir de Ritchie y Hanway (1966).

En la Tabla 4, se puede observar que no hubo diferencias en el NEP, lo cual era esperable al tratarse de un ensayo bajo riego. En dichas condiciones, si se considera que el desarrollo de la espiga comienza aproximadamente entre V7 y V9 (Cárcova et al., 2003) y que todos los tratamientos recibieron una dosis de N a V6, esto indicaría que no hubo diferencias entre tratamientos que haya afectado el crecimiento individual de cada planta logrando así el mayor número de espigas. Por lo tanto, en condiciones hídricas no limitantes el ajuste de la fertilización temprana en maíz permite cubrir las necesidades de N para alcanzar la máxima tasa de

crecimiento durante el PC, manteniendo el flujo de asimilados hacia las espigas, lo cual coincide con lo reportado por Canzani Valenzuela (2022).

En relación al NH Esp., se observó que no hubo diferencias importantes entre tratamientos, lo cual podría estar explicado debido a la ausencia de limitantes hídricas y a la fertilización nitrogenada que recibieron a V6, si se considera que a partir de V9 se define el NH Esp (Martínez, 2015). Sin embargo, los resultados muestran diferencias a favor de 200 Liq. 50V6-50V10 con respecto a 100 Sol. 50V6-50V10 y 100 Liq. c/4d. Esto demuestra que aun sin limitantes hídricas se puede esperar una caída en el NH Esp. a partir del fraccionamiento de la dosis cuando esta es de 100 kg de N ha<sup>-1</sup>. Se observa que dicha estrategia no permite satisfacer los requerimientos crecientes de N al momento de definir dicho subcomponente, siendo coincidente con lo observado por Armand y Ferrari (2018).

En la Tabla 4, se observa que el NGH fue el subcomponente de mayor impacto en el NG Esp. Los resultados de NGH, indican que hubo una tendencia a favor de los tratamientos con dosis 200 con respecto a 100 kg N ha<sup>-1</sup>, sin embargo, los tratamientos con dosis 100 kg N ha<sup>-1</sup> en fertirriego no mostraron diferencias. Esto podría estar explicado por la fuente líquida utilizada, que en conjunto con el riego haya permitido incrementos en la tasa de absorción de N, mejorando su eficiencia de uso durante el PC. En ese sentido, esto coincide con lo reportado por Canzani Valenzuela (2022) quien afirma que no hubo diferencias en el NGH en condiciones de riego. Por lo tanto, se interpreta que el uso de fuentes líquidas es una estrategia por considerar para cubrir las necesidades nutricionales durante el PC, debido a que es posible disminuir la dosis y lograr mejoras en los subcomponentes del NG.

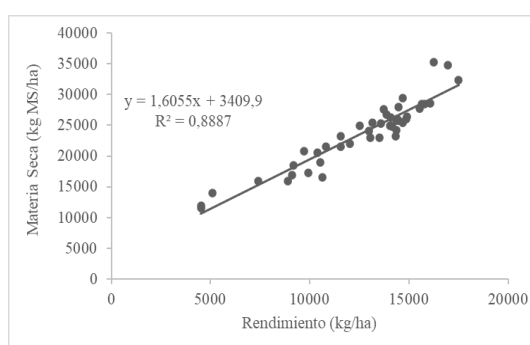
#### 4.4 Relación entre rendimiento, NG, PG y Dosis de N con MS

En la Figura 4, se muestra la relación entre la MS y el rendimiento, dosis de N y los principales componentes numéricos del rendimiento, para los diferentes niveles de dosis, fraccionamiento y método de aplicación evaluados.

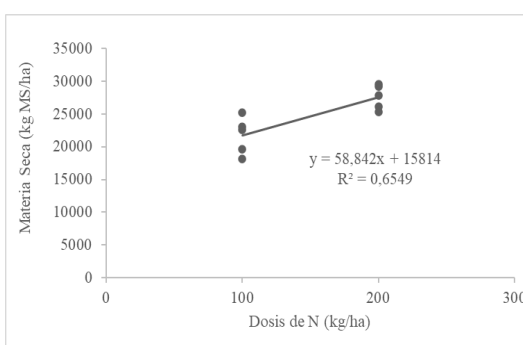
**Figura 4**

*Relación entre rendimiento, NG, PG y Dosis de N con MS*

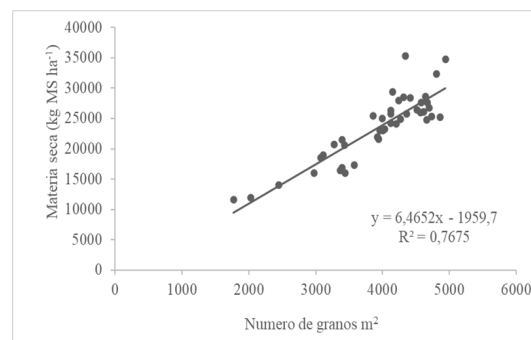
**a)**



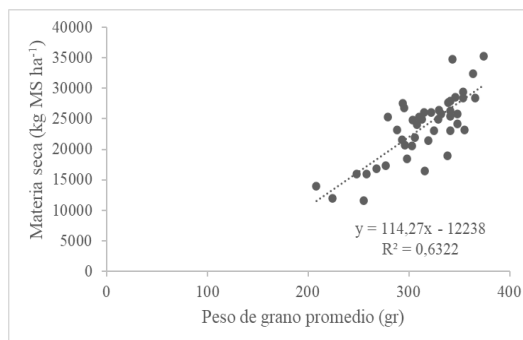
**b)**



**c)**



**d)**



*Nota.* a) Relación entre MS (kg MS ha<sup>-1</sup>) y el rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>). b) Relación entre MS (kg MS ha<sup>-1</sup>) y la dosis de N agregada (100 y 200 kg de N ha<sup>-1</sup>). c) Relación entre el número de granos por metro cuadrado y la MS (kg MS ha<sup>-1</sup>). d) Relación entre el peso de grano promedio (g) y la MS (kg MS ha<sup>-1</sup>)

En las Figuras 4 a) y 4 b) se observa que la asociación entre la MS y el rendimiento, y la regresión evaluada respectivamente, en ambos casos mostraron una respuesta lineal. Esto indica que un incremento en la MS se tradujo en una respuesta similar del rendimiento, mientras que dichos incrementos en la MS estuvieron asociados a

incrementos en la dosis de N evaluadas. En relación al  $R^2$ , se observan valores elevados para ambas figuras. Esto indica que el rendimiento estuvo explicado directamente por la MS, y a su vez gran parte de la variabilidad observada en los resultados de MS estuvo explicado por la dosis de N agregado. Por lo tanto, en base a los resultados de la Figura 4, se desprende que el principal efecto de la dosis de N estuvo asociado principalmente al crecimiento y producción de MS. Además, si tiene en consideración lo reportado por Martínez (2015) en cuanto a la estabilidad del índice de cosecha (IC), es posible que la MS haya explicado los resultados en cuanto a rendimiento.

En la Figura 4 c), se observa que la correlación analizada fue lineal y positiva, indicando que un incremento en la MS se traduce en una respuesta similar al NG. El valor del  $R^2$  obtenido se considera moderado, por tanto, gran parte de la variabilidad que se muestra en los valores de NG estuvo explicada por incrementos en la MS, y por lo tanto fue el componente numérico más afectado por la MS. En cuanto a la Figura 5 d), se evidencia una relación lineal y positiva entre el PG y la MS, cuyo  $R^2$  indica que incrementos en la MS no generaron una respuesta similar en el PG. Esto indicaría que las diferencias en la MS asociadas a la dosis estuvieron presentes durante la etapa de llenado, lo cual coincide con lo reportado por Dreccer et al. (2003) quien afirma que la fase de llenado efectivo se ve afectada por la disponibilidad de N.



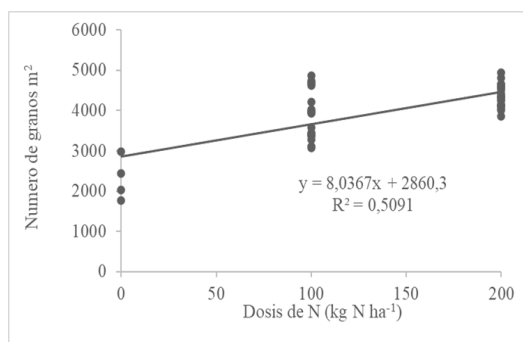
#### 4.5 Relación entre Número de Granos, Peso de Granos y Dosis de N

En la Figura 5, se presentan las relaciones entre el NG por metro cuadrado y el PG promedio con respecto a la dosis de N agregada.

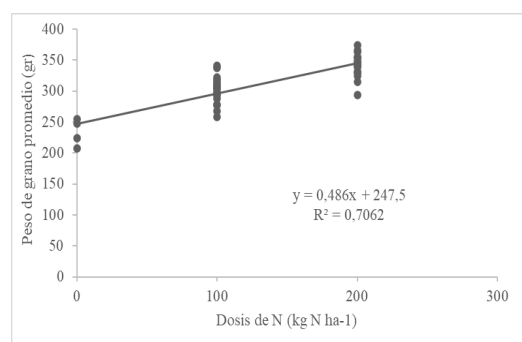
**Figura 5**

a) Relación entre número de granos ( $NG\ m^2$ ) y dosis de N agregada b) relación entre peso de grano promedio ( $PG\ g$ ) y dosis de N agregada (100 y 200  $kg\ N\ ha^{-1}$  respectivamente)

a)



b)



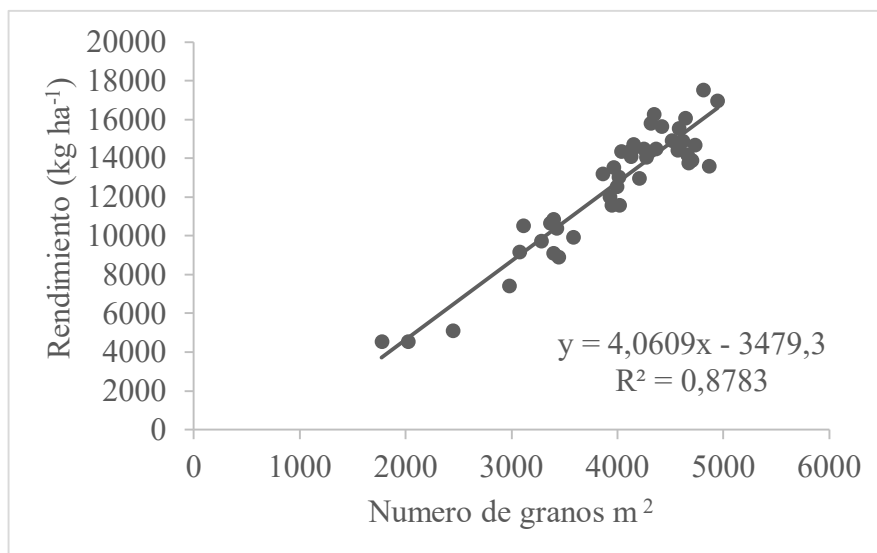
A partir de la Figura 5a) y 5b), se puede observar que tanto el NG como el PG, presentan una relación lineal con respecto a la dosis de N. Sin embargo, en ambos gráficos se puede apreciar que, en un rango de dosis de 100 y 200  $kg\ de\ N\ ha^{-1}$ , tanto el NG como el PG lograron resultados similares. Con respecto a los  $R^2$ , estos indican que las variables estudiadas no estuvieron relacionadas entre sí, por lo tanto, a partir del rango de dosis evaluado fue posible obtener valores similares de NG y PG, respectivamente. En ese sentido, al observar los resultados promedios de ambas variables (Cuadro 2), se observa una tendencia favorable por el uso de fuentes líquidas con respecto a las fuentes sólidas. Esto demuestra la relevancia de la elección de la fuente, así como una correcta recomendación de la dosis, no solo para reducir los costos de producción, sino por el potencial riesgo de contaminación que conlleva, ya que altas dosis de N pueden verse afectadas por los procesos de pérdidas de N, y generar contaminaciones a nivel de cursos de agua y fuentes subterráneas.

#### 4.6 Relación entre el rendimiento y sus principales componentes

En la Figura 6, se presenta la relación entre el rendimiento y el NG para las diferentes estrategias de fertilización nitrogenada evaluadas.

**Figura 6**

*Relación entre el rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) y el número de granos por metrocuadrado ( $\text{NG m}^2$ )*

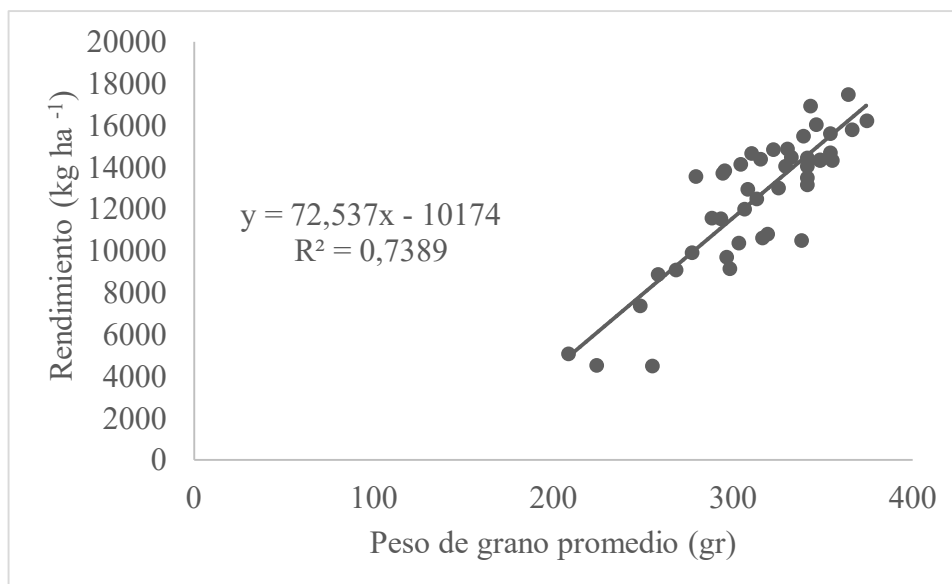


En la Figura 6, se observa una relación lineal y positiva, mostrando que un incremento en el componente NG se traduce en mayores rendimientos, al igual que lo indicado por Abraham y Falco (2016). En cuanto al  $R^2$ , este mostró un valor alto, por lo tanto, gran parte de la variabilidad en el rendimiento estuvo explicada por incrementos en el NG, siendo dicho componente determinante para el rendimiento, lo cual se contradice a lo observado por Canzani Valenzuela (2022). Esto último podría explicarse por un lado por la baja frecuencia de precipitaciones del ensayo, las cuales no favorecieron a los procesos de pérdidas de N (Echeverría & García 2014). Por otro lado, se aprecia una interacción positiva entre el N y el riego, que pudo determinar una mayor respuesta en kg de grano por kg N aplicado (EAN) que explicaría la respuesta en NG y por tanto la relación observada con el rendimiento.

En la Figura 7, se presenta la relación entre el rendimiento con respecto y PMG para las diferentes estrategias de fertilización.

### Figura 7

*Relación entre el rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) y el peso de granos (PG, g)*



En la Figura 7, se aprecia una relación lineal, positiva entre el PG y el rendimiento. El  $R^2$  muestra un valor moderado, indicando que incrementos en el componente PG no explican una respuesta similar en el rendimiento del cultivo. Esto puede explicarse debido a que la oferta de recursos durante el periodo de llenado fue suficiente para alcanzar altos valores de PG, pero de igual forma se apreciaron diferencias en rendimiento. Las diferencias, indican que una vez logrado el NG máximo, el rendimiento pasaría a depender de la capacidad del ambiente para mantener la oferta de N, afectando la producción y translocación de fotoasimilados durante la etapa más extensa del cultivo.

## 5 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que la dosis y fuentes utilizadas presentaron efectos sobre el rendimiento. El rendimiento presentó aumentos significativos variando la dosis de N en el rango evaluado, y mostró mejoras en la eficiencia de uso del nutriente con la utilización de fertilizante líquido (fertirriego). Se aprecia una tendencia favorable con dosis de 200 kg de N ha<sup>-1</sup>, sin embargo al evaluar la estrategia 100 Liq. V6 no mostró diferencias en rendimiento utilizando la mitad de la dosis de N. En cuanto al fraccionamiento, la ausencia de diferencias importantes en rendimiento estuvo influenciada por las condiciones climáticas durante el año evaluado. Para las condiciones evaluadas, la estrategia a fertilizar más recomendable fue aplicar la dosis de N a V6. Por lo tanto, se acepta la hipótesis biológica de que la eficiencia de la fertilización nitrogenada en maíz con riego se mejora a través de la fertirrigación.

En este trabajo, el aumento del rendimiento estuvo asociado en mayor medida al incremento en el NG. Se evidencia una tendencia a obtener incrementos en el NG a partir de dosis de 200 kg N ha<sup>-1</sup> mientras que hubo una estrategia con dosis de 100 kg N ha<sup>-1</sup> en fertirriego que obtuvo resultados similares con la mitad de la dosis. Esto se explica a partir de mejoras en la tasa de absorción del N durante el PC que determinó incrementos en el NGH y NG Esp. Por otra parte, con dosis de 100 kg de N ha<sup>-1</sup>, se observa un menor NG por efecto del fraccionamiento, esto se debe a una menor disponibilidad de N a V6, momento en el cual comienza una demanda creciente por N durante el PC para la definición del NG.

En relación al PG, en este trabajo se observó una respuesta por variar la dosis de 100 a 200 kg de N ha<sup>-1</sup>. Además, al comparar tratamientos cuya aplicación se realizó a V6 se observa diferencias en el PG asociado a una tendencia positiva explicada por el incremento de la dosis de N. Por otra parte, se observa una tendencia a obtener incrementos en el PG cuando se realiza la fertilización mediante fertirriego. Por lo tanto, estos resultados muestran que la fertilización líquida puede ser beneficioso para el cultivo de maíz, ya que permite mantener la disponibilidad de N en el suelo y acompañar los requerimientos nutricionales durante el llenado de granos.

En síntesis, teniendo en consideración el principal objetivo de este trabajo, el cual apuntó a evaluar estrategias que permitan reducir la contaminación ambiental y

mejorar la eficiencia de uso del fertilizante. Luego de analizar las características del año evaluado y los tratamientos superiores, se destacó un tratamiento con 100 kg de N ha<sup>-1</sup>. Estos resultados indicaron que se debe considerar el estudio de dosis intermedias entre 100 y 200 UN ha<sup>-1</sup>, ya que se aprecia la posibilidad de disminuir las dosis de N habituales más altas mediante el fertirriego.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- Abraham, I., & Falco, N. (2016). *Efecto de la fertilización nitrogenada tardía (V10-V12) sobre el rendimiento de maíz en condiciones de riego y secano* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Abrecht, D. G., & Carberry, P. S. (1993). The influence of water deficit prior to tassel initiation on maize growth, development and yield. *Field Crops Research*, 31(1-2), 55-69.
- Ackermann, P., & Gasparri, N. (2011). *Efecto de la intensidad de uso agrícola del suelo sobre el balance de nitrógeno, fósforo y potasio* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del Cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. FAO.
- Andrade, F., & Gardiol, J. (1995). *Sequía y producción de los cultivos de maíz, girasol y soja*. INTA.
- Andrade, F. H., Otegui, M. E., Cirilo, A., & Uhart, S. (Eds.). (2023). *Ecofisiología y manejo del cultivo de maíz*. MAIZAR.
- Andrade, F. H., & Sadras, V. O. (Eds.). (2000). *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*. Facultad de Ciencias Agrarias.
- Armand, M., & Ferrari, I. G. (2018). *Respuesta a la fertilización nitrogenada en maíz bajo riego* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Aydinsakir, K., Erdal, S., Buyuktas, D., Bastug, R., & Toker, R. (2013). The influence of regular deficit irrigation applications on water use, yield, and quality components of two corn (*Zea mays* L.) genotypes. *Agricultural Water Management*, 128, 65-71.
- Barbieri, I. P., Echeverría, H. E., & Sainz Rozas, H. (2003). Respuesta del cultivo de maíz bajo siembra directa a la fuente y al método de aplicación de nitrógeno. *Ciencia del Suelo*, 21(1), 18-23.

- Barbieri, I. P., Echeverría, H. E., Sainz Rozas, H., & Maringolo, M. (2010). Fertilización de maíz con urea de liberación lenta: Pérdida por volatilización y eficiencia de uso de nitrógeno. *Ciencia del Suelo*, 28(1), 57-66
- Barraco, M., & Díaz Zorita, M. (2006). Fertilización postergada de nitrógeno en maíz en la región de la pampa arenosa. En Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (Ed.), *XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, I Reunión de Suelos de la Región Andina* (pp. 36-38).
- Below, F. E. (2004). Fisiología, nutrición y fertilización nitrogenada del maíz. *Informaciones Agronómicas*, (54), 3-9.
- Below, F. E., Uribelarrea, M., Moose, S. P., & Seebauer, J. R. (2007). ¿Podemos mejorar la eficiencia de uso del N en maíz? *Fertilizar Asociación Civil*, (7), 23-31.
- Biscaro, G. A., Motomiya, A. V. A., Ranzi, R., Vaz, M. A. B., Do Prado, E. A. F., & Silveira, B. L. R. (2011). Desempenho do milho safrinha irrigado submetido a diferentes doses de nitrogênio via solo e foliar. *Agrarian*, 4(11), 10-19.
- Bonelli, L. E., Sainz Rozas, H. R., Echeverría, H. E., & Barbieri, P. A. (2017). Fuente y momento de aplicación de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en Balcarce. *Ciencia del Suelo*, 36(1), 88-98.
- Çakir, R. (2004). Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Research*, 89(1), 1-16.
- Calviño, P. A., & Echeverría, H. E. (2003). Incubación anaeróbica del suelo como diagnóstico de la respuesta a nitrógeno del maíz bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo*, 21(1), 24-29.
- Canzani Valenzuela, F. (2022). *Estudio del fraccionamiento de la fertilización nitrogenada en maíz* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.

- Cárcova, J., Borrás, L., & Otegui, M. E. (2003). Ciclo ontogénico, dinámica del Desarrollo y generación del rendimiento y calidad en maíz. En E. H. Satorre, R. L. Benech, G. A. Slafer, E. G. de la Fuente, D. J. Miralles, M. E. Otegui, & R. Savin (Eds.), *Producción de granos: Bases funcionales para su manejo* (pp. 133-163). Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Castellanos, Z. J., Etchevers Barra, J. D., Peña Datoli, M., García Huerta, S., Ortiz-Monasterio, I., Arango González, A., Macías Cervantes, J., & Venegas Villaroel, C. (2019). *¿Cómo crece y se nutre una planta de maíz?* Fertilab.
- Cazaban, M., & Rubio, N. (2014). *Efecto de la fertilización nitrogenada tardía (V10-11) sobre el rendimiento del maíz* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Ceriani, M., & Innella, J. (2012). *Efecto de la fertilización nitrogenada tardía (V10-11) sobre el rendimiento de maíz en condiciones de riego y secano* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Chauhdary, J. N., Bakhsh, A., Engel, B. A., & Ragab, R. (2019). Improving corn production by adopting efficient fertigation practices: Experimental and Modeling approach. *Agricultural Water Management*, 211, 449-461.
- Ciampitti, I., Boxler, M., & García, F. (2010). Nutrición de maíz: Requerimientos y absorción de nutrientes. *Informaciones Agronómicas*, (48), 14-18.
- Cordi, M., Uhart, S., Echeverría, H., & Sainz Rozas, H. (1997, octubre). *Efecto de la disponibilidad de nitrógeno sobre la tasa y duración del llenado de granos en maíz* [Contribución]. VI Congreso Nacional de Maíz, III Reunión Suramericana de Maiceros, Balcarce.
- Dardanelli, J., Collino, D., Otegui, M. E., & Sadras, V. O. (2003). Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano. En E. H. Satorre, R. L. Benech, G. A. Slafer, E. G. de la Fuente, D. J. Miralles, M. E. Otegui, & R. Savin (Eds.), *Producción de granos: Bases funcionales para su manejo* (pp. 375-440). Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.



- Di Paolo, E., & Rinaldi, M. (2007). Yield response of corn to irrigation and nitrogen fertilization in a Mediterranean environment. *Field Crops Research*, 105(3), 202-210.
- Domínguez, G. F., Studdert, G. A., Echeverría, H. E., & Andrade, F. H. (2001). Sistemas de cultivo y nutrición nitrogenada en maíz. *Ciencia del Suelo*, 19(1), 47-56
- Dreccer, M., Ruiz, R. A., Maddonni, G. A., & Satorre, E. H. (2003). Bases ecofisiológicas de la nutrición en los cultivos de grano. En E. H. Satorre, R. L. Benech, G. A. Slafer, E. G. de la Fuente, D. J. Miralles, M. E. Otegui, & R. Savin (Eds.), *Producción de granos: Bases funcionales para su manejo* (pp. 479-497). Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Echeverría, H. E., & García, F. O. (Eds.). (2014). *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. INTA.
- Echeverría, H. E., & Sainz Rozas, H. S. (2001). Eficiencia de recuperación de hojas del nitrógeno aplicado al estadio de seis del maíz bajo riego en siembra directa y labranza convencional. *Ciencia del Suelo*, 19(1), 57-66.
- Eck, H. V. (1984). Irrigated corn yields responses to nitrogen and water. *Agronomy Journal*, 76(3), 421-428.
- Ernst, J. M., Beretta, A., Barbazán, M. M., & Puppo, L. (2021). Nitrogen fertilization strategies for center-pivot irrigated maize crop. *Agrociencia Uruguay*, 25(2), Artículo e412.  
<https://agrocienciauruguay.uy/index.php/agrociencia/article/view/412/1045>
- Ernst, O., Siri Prieto, G., & Cadenazzi, M. (2009). Influence of crop-pasture rotation and tillage system on yields of wheat, soybean, barley, sorghum and sunflower in Uruguay. *Journal of Agricultural Machinery Science*, 5(3), 253-262.
- Fan, J., Lu, X., Gu, S., & Guo, X. (2020). Improving nutrient and water use efficiencies using water-drip irrigation and fertilization technology in Northeast China. *Agricultural Water Management*, 241, 106-352.

- Ferraris, G. N., Couretot, L. A., & Toribio, M. (2009). Pérdidas de nitrógeno por volatilización y su implicancia en el rendimiento del cultivo de maíz: Efectos de fuente, dosis y uso de inhibidores. *Informaciones Agronómicas*, (43), 19-22.
- Fontanetto, H., Keller, O., Gialevera, D., Belotti, L., & Negro, C. (2008). *Aspectos del manejo del cultivo de maíz de segunda y de la fertilización nitrogenada en la región pampeana norte de Argentina*. INTA
- García, F. O. (1996). *El ciclo del nitrógeno en ecosistemas agrícolas*. INTA.
- García, J. P., & Espinosa, J. (2009). Efecto del fraccionamiento de nitrógeno en la productividad y en la eficiencia agronómica de macronutrientes en maíz. *Informaciones Agronómicas*, (72), 1-5.
- Giménez, L. (2012). Producción de maíz con estrés hídrico provocado en diferentes etapas de desarrollo. *Agrociencia (Uruguay)*, 16(2), 92-102.
- Giménez, L., & García Petillo, M. (2011). Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*, 15(2), 100-108.
- Governatori, S., & Uhart, S. (1997). Efecto de la disponibilidad del nitrógeno sobre la calidad física de los granos de cultivares de maíz liberados en diferentes épocas. En Asociación de Ingenieros Agrónomos del Norte de Buenos Aires (Ed.), *Actas VI Congreso Nacional de Maíz* (Vol. 2, pp. 46-53).
- Gregorich, E., Henry Janzen, H., Helgason, B., & Ellert, B. (2015). Nitrogenous gas emissions from soils and greenhouse gas effects. *Advances in Agronomy*, 132, 39-74.
- Guardia, G., Cangani, M., Andreu, G., Sanz, A., García, S., Álvarez, J., Recio, J., & Vallejo, A. (2017). Effect of inhibitors and fertigation Strategies on GHG emissions, NO fluxes and yield in irrigated maize. *Field Crops Research*, 204, 135-145.

- Hauck, R. D. (1981). Nitrogen fertilizer effects in nitrogen cycle processes. En F. E. Clark & T. Roswell (Eds.), *Terrestrial nitrogen cycle: Processes, ecosystem strategies and management impacts* (pp. 551-562). Swedish National Science Research Council.
- Hochmuth, G. J. (1992). Fertilizer management for drip-irrigated vegetables in Florida. *HortTechnology*, 2(1), 27-32.
- Hoffman, E., Perdomo, C., Ernst, O., Bardoli, M., Pastorini, M., Pons, C., & Borghi, E. (2010). Propuesta para el manejo del nitrógeno en cultivos de invierno en Uruguay. *Informaciones Agronómicas*, (46), 13-18.
- Jasso, C., Martínez, M., & Huerta J. (2004). *Tecnología para producir altos rendimientos de maíz con fertirriego en San Luis de Potosí*. INIFAP; CIRNE.
- Jones, E. E., Rhodewalt, F., Berglas, S., & Skelton, J. A. (1981). Effects of strategic self-presentation on subsequent self-esteem. *Journal of Personality and Social Psychology*, 41(3), 407-421.  
<https://doi.org/10.1037/0022-3514.41.3.407>
- Karam, R. M., Sfeir, F., Mounzer, O., & Rouphael, Y. (2005). Evapotranspiration and seed yield of field grown soybean under deficit irrigation conditions. *Agricultural Water Management*, 75(3), 226-244.
- Kaur, A., Bedi, S., Gill, G., & Kumar, M. (2012). Effect of nitrogen fertilizer on radiation use efficiency, crop growth and yield in some maize (*Zea mays* L) genotypes. *Maydica*, 57(1), 75-82.
- Kumar, M., Rajput, T., Kumar, R., & Patel, N. (2016). Water and nitrate dynamics in baby corn (*Zea mays* L.) under different fertigation frequencies and operating pressures in semi-arid regions of India. *Agricultural Water Management*, 163, 263-274.

- Li, H., Mei, X., Nangia, V., Guo, R., Liu, Y., Hao, H., & Wang, J. (2021). Effects of different nitrogen fertilizers on the yield, water- and nitrogen-use Efficiencies of drip-fertigated wheat and maize in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 243, Artículo e106474.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037837741932342>  
[X](#)
- Maddoni, G.A., & De la Fuente, E. B. (2003). ¿Qué se entiende por estructura del cultivo? En E. H. Satorre, R. L. Benech, G. A. Slafer, E. G. de la Fuente, D. J. Miralles, M. E. Otegui, & R. Savin (Eds.), *Producción de granos: Bases funcionales para su manejo* (pp. 245-275). Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Martínez, D. (2015). Ecofisiología del cultivo de maíz. En J. A. Garay & J. C. Colazi (Eds.), *El cultivo de maíz en San Luis* (pp. 7-31). INTA.  
[https://www.researchgate.net/publication/320805480\\_Ecofisiologia\\_del\\_cultivo\\_de\\_maiz](https://www.researchgate.net/publication/320805480_Ecofisiologia_del_cultivo_de_maiz)
- Martínez Gamiño, M. Á., Jasso Chaverria, C., Osuna Ceja, E. S., Reyes Muro, L., Huerta Díaz, J., & Figueroa Sandoval, B. (2014). Efecto del fertirriego y labranza de conservación en propiedades del suelo y el rendimiento de maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(6), 937-949.
- Maturano, M. (2002). *Estudio del uso del agua y del nitrógeno dentro del marco de una agricultura sostenible en las regiones maiceras Castellano-Manchega y Argentina* [Disertación Doctoral]. Universidad de Castilla.
- Medrano, H., Bota, J., Cifre, J., Flexas, J., Ribas-Carbó, M., & Gulías, J. (2007). Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geográficas*, (43), 63-84.
- Melgar, R., & Torres Duggan, M. (2004). Manejo de la fertilización en maíz. *Idia XXI*, 4(6), 114-121.
- Meroni, G., Del Pino, A., Mori, C., Cerveñasky, A., & Casanova, O. (2010). *Efecto del contenido de agua sobre la mineralización de l62 materia orgánica en suelos del sur de Uruguay* [Contribución]. I Reunión Técnica: Dinámica de las propiedades del suelo bajo diferentes usos y manejos, Colonia.

- NeSmith, D. S., & Ritchie, J. T. (1992). Effects of soil water deficits during tassel emergence or development and yield components of maize (*Zea mays*). *Field Crops Research*, 28(3), 251-256.
- 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>
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2011). *Anuario estadístico agropecuario 2011*. MGAP
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2018). *Anuario estadístico agropecuario 2018*. MGAP.
- Ortiz-Calle, R., Chile-Asimbaya, M., Cartagena-Ayala, Y., Morillo-Velarde, R., Vásquez-Mejía, C., Romero-Anchapanta, M., Erique-Agila, D., Alomoto-Panoluisa, W., & Torres-Fierro, P. (2021). Efecto del riego por goteo de bajo volumen en el rendimiento del cultivo de fréjol variedad “Rojo del Valle” en los andes ecuatorianos. *Manglar*, 18(3), 253-260.
- Otegui, M. E. (2009). Bases ecofisiológicas para el manejo del agua en cultivos para grano conducidos en secano. *Informaciones Agronómicas*, (44), 16-20.
- Pagani, A., Echeverría, H., & Sainz Rozas, H. (2009). Respuesta a nitrógeno y azufre en el cultivo de maíz en diferentes ambientes de la provincia de Buenos Aires. *Ciencias del Suelo*, 27(1), 21-29. [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1850-20672009000100003&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1850-20672009000100003&script=sci_arttext&tlng=en)

- Paliwal, R. L., Granados, G., Lafitte, H. R., Violic, A. D., & Marathée, J. P. (Eds.). (2001). *El maíz en los trópicos: Mejoramiento y producción*. FAO. [https://books.google.com.uy/books?hl=es&lr=&id=os79dx6BcmsC&oi=fnd&pg=PP1&dq=El+ma%C3%ADz+en+los+tr%C3%B3picos:+Mejoramie nto+y+producci%C3%B3n.+FAO.+&ots=OXGPkGV6c&sig=sX7Ok049v kaIg6ZzahlR9eQOY0I&redir\\_esc=y#v=onepage&q=El%20ma%C3%AD z%20en%20los%20tr%C3%B3picos%3A%20Mejoramie nto%20y%20pro ducci%C3%B3n.%20FAO.&f=false](https://books.google.com.uy/books?hl=es&lr=&id=os79dx6BcmsC&oi=fnd&pg=PP1&dq=El+ma%C3%ADz+en+los+tr%C3%B3picos:+Mejoramie nto+y+producci%C3%B3n.+FAO.+&ots=OXGPkGV6c&sig=sX7Ok049v kaIg6ZzahlR9eQOY0I&redir_esc=y#v=onepage&q=El%20ma%C3%AD z%20en%20los%20tr%C3%B3picos%3A%20Mejoramie nto%20y%20pro ducci%C3%B3n.%20FAO.&f=false)
- Pedrol, M., Castellarín, J. M., Ferraguti, F., & Rosso, O. (2008). Respuesta a la fertilización nitrogenada y eficiencia en el uso del agua en el cultivo de maíz según nivel hídrico. *Informaciones Agronómicas*, (40), 17-20.
- Perdomo, C., Barbazán, M., & Durán Monzoni, J. M. (2008). *Nitrógeno*. Facultad de Agronomía.
- Perdomo, C., & Hoffman, E.M. (2011). Manejo de nitrógeno en maíz: Actualidad y perspectivas. En E. Hoffman (Coord.) & A. Ribeiro (Ed.), *II Simposio Nacional de Agricultura* (pp. 61-75). Facultad de Agronomía.
- Peterson, G. A., & Frye, W. W. (1989). Fertilizer nitrogen management. En R. F. Follett (Ed.), *Nitrogen management and ground water protection* (pp. 183-219). Elsevier.
- Piedrahita, J. (2012). *Épocas y formas de aplicación de nitrógeno en el cultivo de maíz (Zea mays L.) bajo el sistema de siembra directa y su efecto en la producción de granos en la zona de Buena Fe-Provincia de los Ríos* [Trabajo final de grado]. Universidad Técnica Estatal de Quevedo.
- Quiroga, A., Saks, M., Funaro, D., & Fernández, R. (2006, 19-22 de septiembre). *Aspectos del manejo del agua y la nutrición nitrogenada de maíz en la región semiárida y subhúmeda pampeana* [Contribución]. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta.
- Rameau, D., & Van den Dorpel, M. (2016). *Respuesta del maíz a la población y a dos dosis de nitrógeno en condiciones de secano* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.

- Ritchie, S. W., & Hanway, J. J. (1966). *How a corn plant develops*. Iowa State University.
- Sainz Rozas, H. R. S., Echeverría, H. E., & Barbieri, P. A. (2004). Nitrogen balance as affected by application time and nitrogen fertilizer rate in irrigated no-tillage maize. *Agronomy Journal*, 96(6), 1622-1631.
- Salisbury, F., & Ross, C. (2000). *Fisiología de las plantas*. Paraninfo; Thomson Learning.
- Salvagiotti, F. (2009). Rendimientos potenciales en maíz: Brechas de producción y prácticas de manejo para reducirlas. *Para Mejorar la Producción*, (41), 61-66.
- Salvagiotti, F. (2014). Bases para el manejo nutricional en maíz y soja de alto rendimiento. En L. Giménez, L. Puppo, L. Bentancor, R. Hayashi, J. Sawchik, C. García, & B. Bocking (Eds.), *Riego en cultivos y pasturas: 3<sup>er</sup> Seminario Internacional* (pp. 36-41). INIA.
- Salvagiotti, F., Pedrol, H., & Castellarín, J. (2002). Diagnóstico de la fertilización nitrogenada en maíz: II. Relación entre la respuesta en rendimiento y la concentración de N-NO<sub>3</sub> en el suelo en el estadio V4-V6. *Para Mejorar la Producción*, (20), 71-74.
- Sánchez, J. (2000, 28 de febrero). *Fertirrigación: Principios, factores y aplicaciones* [Contribución]. Seminario de Fertirrigación, Lima.
- Satorre, E. H. (2002). Generación del rendimiento en el cultivo de maíz: Efectos de la nutrición nitrogenada. En *Jornada de Actualización Técnica para Profesionales: Fertilidad 2002* (pp. 18-22). INPOFOS Cono Sur.
- Scharf, P. C., Wiebold, W. J., & Lory, J. A. (2002). Corn yield response to nitrogen fertilizer timing and deficiency level. *Agronomy Journal*, 94(3), 435-441.
- Silva, P. R. F. D., Strieder, M. L., Silva, R. P. D., Rambo, L., Sangoi, L., Argenta, G., Forsthofer, E. L., & Silva, A. A. D. (2005). Grain yield and kernel crude protein content increases of maize hybrids with late nitrogen side-dressing. *Scientia Agricola*, 62(5), 487-492.

- Sinclair, T. R. (1990). Nitrogen influence on the physiology of crop yield. En R. Rabbinge, J. Goudriaan, H. van Keulen, F. W. T. Penning de Vries, & H. van Laar (Eds.), *Theoretical production ecology: Reflections and prospects* (pp. 41-54). Pudoc.
- Singh, B. R., & Singh, D. P. (1995). Agronomic and physiological responses of sorghum, maize and pearl millet to irrigation. *Field Crops Research*, 42(2-3), 57-67.
- Snyder, C. S., & Bruulsema, T. W. (2007). *Nutrient use efficiency and effectiveness in North America: Indices of agronomic and environmental benefit*. International Plant Nutrition Institute.
- Stangel, P. J. (1984). World nitrogen situation—trends, outlook, and requirements. En R. D. Hauck (Ed.), *Nitrogen in crop production* (pp. 23-54). ASA; CSSA; SSSA.
- Stecker, J. A., Buchholz, D. D., Hanson, R. G., Wollenhaupt, N. C., & McVay, K. A. (1993). Application placement and timing of nitrogen solution for no-till corn. *Agronomy Journal*, 85(3), 645-650.
- Studdert, G. A., & Echeverría, H. E. (2000). Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Science Society of America Journal*, 64(4), 1496-1503.
- Tollenaar, M., & Bruulsema, T. W. (1988). Effects of temperature on rate and duration of kernel dry matter accumulation of maize. *Canadian Journal of Plant Science*, 68(4), 935-940.
- Torres Martignoni, D. A. (1996). *Tecnologías en cultivos de verano: II. Maíz y sorgo* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Totis de Zeljkovich, L., & Rebella, C. M. (1980). Necesidades de agua de un cultivo de maíz en la región de Pergamino. En Asociación de Ingenieros Agrónomos del Norte de Buenos Aires (Ed.), *Actas del II Congreso Nacional de Maíz* (pp. 211-219).
- Traore, S. B., Carlson, R. E., Pilcher, C. D., & Rice, M. E. (2000). Bt and non-Bt maize growth and development as affected by temperature and drought stress. *Agronomy Journal*, 92(5), 1027-1035.



- Trost, B., Prochnow, A., Drastig, K., Meyer-Aurich, A., Ellmer, F., & Baumecker, M. (2013). Irrigation, soil organic carbon and N<sub>2</sub>O emissions. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(4), 733-749.
- Uhart, S. A., & Andrade, F. H. (1995). Nitrogen deficiency in maize: I. Effects on crop growth, development, dry matter partitioning and kernel set. *Crop Science*, 35(5), 1376-1383.
- Valencia García, G. M. (2015). *Efecto de cinco niveles de nitrógeno en el cultivo de maíz (Zea mays L.) vía riego por goteo, utilizando dos fuentes de fertilizante* [Trabajo final de grado]. Universidad de Guayaquil.
- Vidal, M., Antúnez, A. B., Felmer, S., Morales, R., & Ruiz, R. (2015). Fertirrigación nitrogenada en maíz: Innovando en cultivos tradicionales. *Revista Tierra Adentro*, (105), 21-26.  
<https://pyrargentina.com.ar/wp-content/uploads/2019/01/fertirrigacion-de-maiz-en-chile-2014.pdf>
- Vila, H. F. (2011). *Regulación de la hidratación y la turgencia foliares por mecanismos evitadores del estrés, y resistencia a déficit hídrico en vid Modelo vs. Experimentos* [Disertación Doctoral]. Universidad Nacional de Cuyo.
- Wang, D., Mo, Y., Li, G., Wilkerson, C. J., & Hoogenboom, G. (2021). Improving maize production and decreasing nitrogen residue in soil using mulched drip fertigation. *Agricultural Water Management*, 251, Artículo e106871. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106871>
- Westgate, M. E., & Boyer, J. S. (1985). Carbohydrate reserves and reproductive development at low leaf water potentials in maize. *Crop Science*, 25(5), 762-769.
- Zhang, X., Meng, F., Li, H., Wang, L., Wu, S., Xiao, G., & Wu, W. (2019). Optimized fertigation maintains high yield and mitigates N<sub>2</sub>O and NO emissions in an intensified wheat-maize cropping system. *Agricultural Water Management*, 211, 26-36.

Zeljovich, V. J., Totis de Zeljkovich, L., & Hansen O. M. (1995). Estudios de alternativas de labranza en el área maicera argentina. En J. P. Piugnau (Ed.), *Maíz: Sistemas de producción* (pp. 119-130). IICA.