

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

**EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE NITRÓGENO DURANTE EL
CRECIMIENTO DEL CULTIVO DE CEBOLLA MEDIANTE SENSORES PARA
DETERMINACIONES RÁPIDAS**

por

Tomas BETANCOR FARIÁS

Joaquín Nicolás RÍOS MENDARO

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

MONTEVIDEO

URUGUAY

2026

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



PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Directora:

Ing. Agr. (Mag.) Mariana Arias Pandolfo

Codirector:

Ing. Agr. (Dr.) Guillermo Galván

Tribunal:

Ing. Agr. (Mag.) Mariana Arias Pandolfo

Ing. Agr. Marcelo Ferrando

Ing. Agr. (Dra.) Mariana Scarlato García

Fecha:

7 de abril de 2026

Estudiantes:

Tomas Betancor Farías

Joaquín Nicolás Ríos Mendaro

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este trabajo final de grado.

A nuestra tutora, Mariana Arias, y a nuestro cotutor, Guillermo Galván, por su dedicación, guía y apoyo constante durante todo el proceso. Sus orientaciones fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo y para nuestra formación profesional.

A los trabajadores del CRS, en especial a Natalia Curbelo y Óscar Costa, por su compromiso y ayuda durante la etapa experimental, facilitándonos el trabajo de campo y aportando siempre predisposición y experiencia.

A las personas del Laboratorio de Suelos, por su colaboración y disposición en cada instancia analítica, contribuyendo de manera decisiva al avance de este estudio.

A nuestras familias, por su apoyo incondicional y por acompañarnos en cada etapa de la carrera. Un agradecimiento especial a Pablo Ríos, cuya ayuda en la parte estadística fue clave para poder finalizar este trabajo.

A nuestras parejas, Fernanda y Analía, por su paciencia, comprensión y por sostenernos incluso en los momentos más demandantes.

Finalmente, agradecemos a nuestros compañeros de carrera y amigos personales, quienes hicieron este camino más llevadero, aportando siempre compañía, motivación y amistad.

A todos ustedes, muchas gracias.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN	3
AGRADECIMIENTOS	4
LISTA DE CUADROS Y FIGURAS.....	8
RESUMEN.....	9
SUMMARY	10
1. INTRODUCCIÓN	11
2. OBJETIVOS.....	13
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1 EL CULTIVO DE CEBOLLA.....	14
3.2 FISIOLOGÍA DE LA CEBOLLA	14
3.3 FORMACIÓN DEL RENDIMIENTO DE CEBOLLA	15
3.4 IMPORTANCIA DE LA NUTRICIÓN MINERAL	18
3.5 NITRÓGENO EN EL CULTIVO DE CEBOLLA.....	19
3.5.1 Importancia y funciones del nitrógeno en la planta.....	19
3.5.2 Requerimientos de nitrógeno	20
3.5.3 Deficiencias, excesos y toxicidad por nitrógeno	21
3.5.4 Fuentes de nitrógeno	23
3.5.5 Absorción de nitrógeno	26
3.6 FERTILIZACIÓN CON NITRÓGENO EN CEBOLLA	27
3.7 DIAGNÓSTICO DE LA DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES EN EL SUELO	28
3.8 MÉTODOS PARA EL DIAGNÓSTICO DE NUTRIENTES EN LA PLANTA	29
3.8.1 Análisis de planta o de tejido vegetal	30
3.8.2 Interpretación de resultados de los análisis foliares	31
3.8.3 Análisis de Savia.....	32
3.9 MÉTODOS RÁPIDOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL NITRÓGENO EN PLANTAS	32
4. MATERIALES Y MÉTODOS	34
4.1 UBICACIÓN DEL EXPERIMENTO	34
4.2 DESCRIPCIÓN DEL SUELO	34
4.3 INSTALACIÓN DEL CULTIVO	35
4.4 MANEJO DEL CULTIVO.....	36
4.5 NIVELES DE NITRÓGENO	37
4.6 DISEÑO EXPERIMENTAL Y MEDICIONES	38
4.7 RECOLECCIÓN DE LAS MUESTRAS	39
4.8 ANÁLISIS EN LABORATORIO	40
4.8.1 Muestreo destructivo.....	40

4.8.2	Análisis de savia	41
4.8.3	Análisis de planta o tejido vegetal	42
4.9	DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO	43
4.10	DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL USO DEL NITRÓGENO.....	43
4.11	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	44
4.11.1	Verificación de supuestos de normalidad y homogeneidad de las varianzas	44
4.11.2	Modelos estadísticos.....	44
4.11.3	Correlaciones y regresiones.....	46
4.11.4	Estructura de la comunidad.....	46
4.11.5	Análisis en la composición de las comunidades entre los diferentes grupos	47
5.	RESULTADOS	48
5.1	EFFECTO DE LOS NIVELES DE NITRÓGENO Y las VARIEDADES EN EL ÍNDICE DE BULBIFICACIÓN A LOS 95 DÍAS	48
5.2	EFFECTO DE LOS NIVELES DE NITRÓGENO Y LAS VARIEDADES EN LA EVOLUCIÓN DEL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR.....	50
5.3	EFFECTO DE LOS NIVELES DE NITRÓGENO Y LAS VARIEDADES EN EL RENDIMIENTO	51
5.4	RELACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS DE ANÁLISIS DE NO ₃ ⁻ EN RAÍZ, BULBO, TALLO Y HOJA.....	54
5.4.1	Relación entre el NO ₃ ⁻ foliar y la concentración de NO ₃ ⁻ en la savía de las hojas	54
5.4.2	Relación entre el NO ₃ ⁻ , la concentración de NO ₃ ⁻ en la savía y el % de N medido en laboratorio para raíz, bulbo y tallo	55
5.5	EFICIENCIA EN EL USO DEL NITRÓGENO	56
5.6	DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LA POBLACIÓN	57
5.6.1	Análisis de Ordenación con NMDS	57
5.6.2	Evaluación de Ajuste mediante envfit.....	57
5.6.3	Análisis de Varianza Multivariante (adonis)	60
5.6.4	Análisis Completo del Gráfico NMDS	60
5.6.5	Distribución de las Elipses por Tratamiento.....	62
5.6.6	Interpretación de los vectores	63
6.	DISCUSIÓN	65
6.1	EFICIENCIA DEL MÉTODO RÁPIDO DE ANÁLISIS DE NITRATO EN SAVIA.....	65
6.2	RENDIMIENTO Y EFECTOS DEL AÑO AGRÍCOLA.....	66
6.3	MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO Y FERTILIZACIÓN NITROGENADA	67
6.4	DURACIÓN DEL ÁREA FOLIAR Y SU IMPACTO EN EL RENDIMIENTO	68
6.5	RELACIÓN ENTRE NIVELES DE NITRÓGENO Y LAS VARIABLES FISIOLÓGICAS DEL CULTIVO.....	69

6.6	DIFERENCIAS ENTRE CULTIVARES Y MANEJO DEL NITRÓGENO	70
6.7	IMPLICANCIAS PRÁCTICAS Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	71
7.	CONCLUSIONES	72
8.	BIBLIOGRAFÍA	74
9.	ANEXOS	79

LISTA DE CUADROS Y FIGURAS

Cuadro 1. Análisis de suelos en donde se instaló el ensayo	35
Cuadro 2. Fungicidas, herbicidas e insecticidas aplicados	37
Cuadro 3. Esquema de la distribución de las unidades en el área del experimento ...	39
Cuadro 4. Programación de la toma de muestras	40
Cuadro 5. Supuestos de normalidad para los muestreos de NO_3^- en savia y NO_3^- en laboratorio.....	44
Cuadro 6. Test de Tukey para índice de bulbificación según variedad a los 95 días post trasplante.....	49
Cuadro 7. Test de Tukey para índice de bulbificación según nivel de nitrógeno a los 95 días post trasplante.....	49
Cuadro 8. Test de Tukey para índice de bulbificación según interacción variedad y nivel de nitrógeno a los 95 días post trasplante.....	49
Cuadro 9. Rendimientos comerciales, descartes, peso promedio de bulbos totales (PPBT) y de bulbos comerciales (PPBC).....	51
Cuadro 10. Test de Tukey según variedad para rendimiento total	52
Cuadro 11. Test de Tukey según tratamiento para rendimiento total	52
Cuadro 12. Test de Tukey de la interacción variedad y nivel de nitrógeno para rendimientos totales.....	52
Cuadro 13. Test de tukey según variedad para rendimiento comerciales	53
Cuadro 14. Test de tukey según tratamiento para rendimientos comerciales	53
Cuadro 15. Test de tukey de la interacción variedad y nivel de nitrógeno para rendimientos comerciales	53
Cuadro 16. Coeficiente de correlación de Spearman NO_3^- medido con LaquaTwin y NO_3^- por día y variedad.....	55
Cuadro 17. Coeficiente de correlación de Spearman entre % de N y nitrato en Pantanoso para raíz, bulbo y tallo.....	56
Cuadro 18. Coeficiente de correlación de Spearman entre % de N y nitrato en Armonía para raíz, bulbo y tallo.....	56
Cuadro 19. Resumen del cálculo de la eficiencia en el uso del nitrógeno	57
Cuadro 20. Resultados de la prueba envfit para las principales variables ambientales que influyen en la estructura	59
Cuadro 21. Resultados del análisis PERMANOVA (adonis) para la variable N.....	60
Cuadro 22. Efecto de variables estudiadas en la ordenación de los datos	61
Figura 1. Formación del rendimiento en el cultivo de cebolla	16
Figura 2. Rendimiento en función de la concentración de nutrientes en planta	31
Figura 3. Evolución del índice de bulbificación según variedad y niveles de nitrógeno.....	48
Figura 4. Evolución del índice del área foliar (IAF) según variedad y niveles de nitrógeno.....	50
Figura 5. Representación bidimensional de la estructura poblacional mediante el análisis NMDS	58

RESUMEN

La cebolla (*Allium cepa* L.) es una de las principales hortalizas del Uruguay y su rendimiento depende en gran medida del manejo adecuado del nitrógeno (N). Sin embargo, los métodos tradicionales de diagnóstico nutricional, como los análisis de laboratorio, presentan limitaciones por su costo y tiempo de respuesta. En este contexto, el presente trabajo final de grado tuvo como objetivo generar conocimiento que permita mejorar el manejo nutricional en el cultivo de cebolla, mejorando su producción y disminuyendo el riesgo de impacto ambiental. Se evaluó la utilización de un método rápido para la determinación del contenido de nitrato en savia mediante el sensor LAQUAtwin, correlacionando sus resultados con los obtenidos por análisis de laboratorio, y estudiar el efecto de distintas dosis de nitrógeno sobre variables fisiológicas y de rendimiento en dos variedades de cebolla (Armonía CRS y Pantanoso del Sauce CRS).

El experimento se realizó en el Centro Regional Sur, Facultad de Agronomía UDELAR (Progreso, Canelones) durante la zafra 2022, bajo un diseño factorial con dos cultivares y tres niveles de fertilización nitrogenada. Se determinaron indicadores fisiológicos como el índice de área foliar (IAF), el índice de bulbificación, el rendimiento total y comercial, y el contenido de nitratos en diferentes tejidos (hoja, tallo, bulbo y raíz). Además, se estimó la eficiencia en el uso del nitrógeno y se evaluó la relación entre las mediciones del sensor y las del laboratorio.

Los resultados mostraron correlaciones positivas y significativas entre el análisis rápido de savia y los valores de nitrógeno determinados en laboratorio, evidenciando que el sensor LAQUAtwin es una herramienta útil para el diagnóstico nutricional en cebolla. Las dosis de nitrógeno afectaron las variables fisiológicas y el rendimiento, observándose mejores respuestas en dosis intermedias. Armonía presentó mayor eficiencia en el uso del nitrógeno y un mejor comportamiento fisiológico que Pantanoso. Este enfoque podría ser extendido a otros cultivos hortícolas en sistemas de producción intensiva, contribuyendo a una agricultura más eficiente y sustentable.

Palabras clave: cebolla, nitrógeno, nitratos en savia, diagnóstico nutricional, sensor LAQUAtwin

SUMMARY

Onion (*Allium cepa* L.) is one of the main vegetable crops in Uruguay, and its yield depends largely on proper nitrogen (N) management. However, traditional nutritional diagnostic methods, such as laboratory analysis, are limited by their cost and response time. In this context, this final degree project aimed to generate knowledge to improve nutritional management in onion crops, enhancing production and reducing the risk of environmental impact. The use of a rapid method for determining nitrate content in sap using the LAQUAtwin sensor was evaluated, correlating its results with those obtained through laboratory analysis, while also studying the effect of different nitrogen doses on physiological and yield variables in two onion varieties (Armonía CRS and Pantanoso del Sauce CRS).

The experiment was conducted at the Centro Regional Sur (Progreso, Canelones) during the 2022 growing season, under a factorial design with two cultivars and three nitrogen fertilization levels. Physiological indicators such as leaf area index (LAI), bulbification index, total and marketable yield, and nitrate concentration in different plant tissues (leaf, stem, bulb, and root) were evaluated. In addition, nitrogen use efficiency and the relationship between sensor and laboratory measurements were analyzed.

Results showed positive and significant correlations between the rapid sap test and laboratory nitrogen determinations, demonstrating that the LAQUAtwin sensor is a useful tool for nitrogen diagnosis in onion crops. Nitrogen doses affected physiological variables and yield, with the best responses observed at intermediate doses. The cultivar Armonía showed higher nitrogen use efficiency and better physiological performance than Pantanoso. This approach could be extended to other horticultural crops in intensive production systems, contributing to more efficient and sustainable agriculture.

Keywords: onion, nitrogen, sap nitrates, nutritional diagnosis, LAQUAtwin sensor

1. INTRODUCCIÓN

La cebolla (*Allium cepa* L.) es la tercera hortaliza en Uruguay en cuanto al número de productores y a la superficie sembrada después del boniato y del zapallo kabutiá (Ackermann & Díaz, 2022). La cebolla ocupa el cuarto lugar en cuanto al volumen comercializado en la Unidad Agroalimentaria Metropolitana (UAM), luego de la papa, tomate y zanahoria (Observatorio Granjero, 2022).

En Uruguay existen dos zonas principales de producción de cebolla. La zona sur (principalmente Canelones y Montevideo), en donde se utilizan cultivares de día intermedio (DI) y día largo (DL) o tardíos. El objetivo de la zona sur es la conservación postcosecha para el abastecimiento del mercado por un período prolongado. La zona norte (principalmente Salto) utiliza cultivares precoces, de día corto (DC) y de corto a medio (DC-DI). La estrategia de producción de esta zona se basa en producir cebollas tempranas de rápida comercialización (Ackermann & Díaz, 2022).

Según la Oficina de Estadísticas Agropecuarias (DIEA, 2022), en la zafra 2014-2015 se plantaron 1187 ha en la zona sur y 405 ha en la zona norte. Los rendimientos del cultivo en ese año fueron de 20,8 t/ha y 17 t/ha para la zona sur y zona norte respectivamente.

Todos los años la producción de cebolla es afectada por factores bióticos y abióticos (Shukla et al., 2016). La brecha de rendimiento y las diferencias observadas en el rendimiento entre productores con similares manejos y recursos productivos es explicada por diversos factores, entre ellos el índice de área foliar (IAF) alcanzado al inicio de la bulbificación. A su vez, el IAF al inicio de la bulbificación es determinado por la densidad de plantas (número de plantas/ha) y por el área foliar por planta (m² hoja). El IAF por planta es afectado principalmente por el período de trasplante a inicio de bulbificación (número de días), período que depende principalmente de una correcta época de siembra y trasplante, ya que el inicio de la bulbificación está determinado por el fotoperíodo crítico para cada cultivar (Dogliotti et al., 2021).

El período desde trasplante a inicio de bulbificación, además, se encuentra correlacionado positivamente a la cantidad de nitrógeno (N) aplicado en esta etapa (en ciertos rangos). El ajuste del suministro de N con las necesidades de la planta en el período entre el trasplante y el inicio de la bulbificación permitiría obtener mayores rendimientos y menores pérdidas postcosecha (Arboleya et al., 2017). Aplicaciones de nitrógeno más altas que las recomendadas puede provocar un excesivo crecimiento vegetativo y en consecuencia un alargamiento del ciclo del cultivo, disminuyendo la

calidad del bulbo (por ejemplo, por la ocurrencia de cuellos gruesos) y el tiempo de almacenamiento (Genta et al., 1991). Según Grahmann et al. (2018), la aplicación de la cantidad necesaria de N permite disminuir costos económicos en fertilizante y reducir la contaminación ambiental por lixiviación.

Conocer la disponibilidad de N y los requerimientos del cultivo es de suma importancia para planificar un esquema de fertilización. Los análisis en laboratorio, tanto del suelo como del tejido vegetal, ofrecen resultados precisos. Sin embargo, presentan ciertas limitaciones para su uso diario. Los análisis de laboratorio tienen tiempos para obtener resultados que no se acompañan a los ciclos productivos, sobre todo en análisis foliares, como para que sus resultados permitan tomar decisiones hacia el ajuste de la fertilización de un cultivo durante el ciclo. Además, estos análisis de laboratorio tienen costos elevados.

Bentancur Guimarey y Rivero Román (2020) indican que la vitrificación ha sido empleada en diversos estudios para preservar materiales biológicos. Actualmente, existen herramientas complementarias a los análisis de laboratorio de bajo costo y rapidez en obtener los resultados. Los test rápidos cuantifican el contenido de N en las plantas, medido como nitratos en savia o clorofila en hoja. Estos test permiten realizar un seguimiento continuo del estatus nutricional de los cultivos. Además, permiten obtener información para ajustar las dosis de fertilizantes con mayor exactitud.

2. OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo fue generar conocimiento que permita mejorar el manejo nutricional en el cultivo de cebolla, mejorando su producción y disminuyendo el riesgo de impacto ambiental. Para ello, este trabajo tuvo por objetivos específicos:

- (a) ajustar la herramienta de medición de nitrato en savia con el análisis de laboratorio para el cultivo de cebolla mediante el análisis rápido con los medidores LAQUATwin con el fin de realizar un diagnóstico rápido y preciso de los niveles de nitrógeno en el cultivo.
- (b) observar los efectos de diferentes dosis de nitrógeno en dos variedades de cebolla en variables fisiológicas tales como el índice de bulbificación, el índice de área foliar y a su vez se estudiará el efecto sobre el rendimiento.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 EL CULTIVO DE CEBOLLA

La cebolla (*Allium cepa* L.) es un cultivo ampliamente extendido en todo el mundo debido a su valor económico, nutricional y medicinal. Es una de las principales hortalizas en los volúmenes de consumo, presente en la cultura alimentaria de países en todos los continentes (Brewster, 2008). Según Dogliotti et al. (2011), la cebolla es originaria de Asia Central y se cree que se ha cultivado durante miles de años en esa región. Desde su centro de origen se ha extendido por todo el mundo y se ha convertido en un cultivo importante en muchas regiones debido a su facilidad de cultivo y adaptabilidad a diferentes condiciones ambientales.

Según la DIEA (2022), la cebolla es la tercera hortaliza en cuanto al número de productores y a la superficie sembrada después del boniato y del zapallo kabutiá. En este mismo material se indica que en la zafra 2014 - 2015, 914 productores se dedicaron a cultivar cebolla, 817 en el sur y 97 en el norte. Se sembraron 1187 ha en la zona sur y 405 ha en la zona norte. Los rendimientos del cultivo en el mismo período fueron de 20,8 t/ha en el sur y 17 t/ha en la zona norte.

La cebolla ocupa el cuarto lugar en cuanto al volumen comercializado en la UAM, luego de la papa, tomate y zanahoria (Observatorio Granjero, 2022). Corresponde al 1.8% de lo comercializado, lo que equivale a USD 5.514.574 (Observatorio Granjero, 2022).

En Uruguay existen dos zonas de producción principales (DIEA, 2022). La zona sur (principalmente Canelones y Montevideo), en donde se utilizan cultivares de día intermedio (DI) y día largo (DL) (Berrueta et al., 2017). La estrategia de producción de esta zona tiene como objetivo la conservación postcosecha, teniendo como objetivo abastecer el mercado a lo largo de todo el año (Berrueta et al., 2017). En la zona litoral norte (principalmente Salto) se utilizan principalmente cultivares de día corto (DC) y corto a medio (DC-DI) (Genta et al., 1991). La estrategia de comercialización de esta zona se basa en producir cebollas tempranas de rápida salida al mercado, previo a que se comiencen a cosechar y vender las cebollas del sur (Ackermann & Díaz, 2022).

3.2 FISIOLÓGÍA DE LA CEBOLLA

La cebolla en nuestras condiciones es una planta herbácea bienal que se cultiva principalmente como anual. En el primer año ocurre la fase vegetativa y en el segundo la fase reproductiva, en la cual se desarrollan las inflorescencias y las semillas

(Brewster, como se cita en Arias Pandolfo, 2014). En la fase vegetativa, el crecimiento foliar y de las raíces es muy intenso hasta el inicio de la bulbificación, donde se enlentece y luego prácticamente se detiene, ya que todos los asimilados disponibles son destinados al crecimiento del bulbo. La cebolla responde al fotoperiodo de día largo de forma cualitativa para bulbificar. Si bien varios factores ambientales inciden sobre el proceso de bulbificación, el fotoperiodo es el factor desencadenante de la bulbificación determinando el inicio de esta nueva etapa de desarrollo. La bulbificación se desencadena una vez que en el proceso de alargamiento de los días se superan determinadas horas de luz (fotoperiodo crítico) (Dogliotti et al., como se cita en Arias Pandolfo, 2014). Si no se supera el fotoperíodo crítico, no hay bulbificación (Dogliotti et al., como se cita en Arias Pandolfo, 2014). El fotoperíodo crítico varía según el cultivar y es el criterio principal de clasificación de los cultivares.

Además, existen otros factores externos y de la propia planta que pueden hacer variar los requerimientos de fotoperíodo crítico (FPc) para bulbificar. Entre ellos se encuentran la temperatura media, déficit hídrico y déficit de nitrógeno (Dogliotti et al., 2011). Cuando la temperatura media aumenta, se requiere un FPc menor para inducir la bulbificación, ya que la planta alcanza más rápidamente las condiciones necesarias para este proceso (Brewster, 2008). Por el contrario, condiciones de déficit hídrico o déficit de nitrógeno pueden disminuir el requerimiento de FPc, debido a que estas deficiencias limitan el desarrollo del follaje y la capacidad de la planta para responder adecuadamente al fotoperiodo (Dogliotti et al., 2011).

3.3 FORMACIÓN DEL RENDIMIENTO DE CEBOLLA

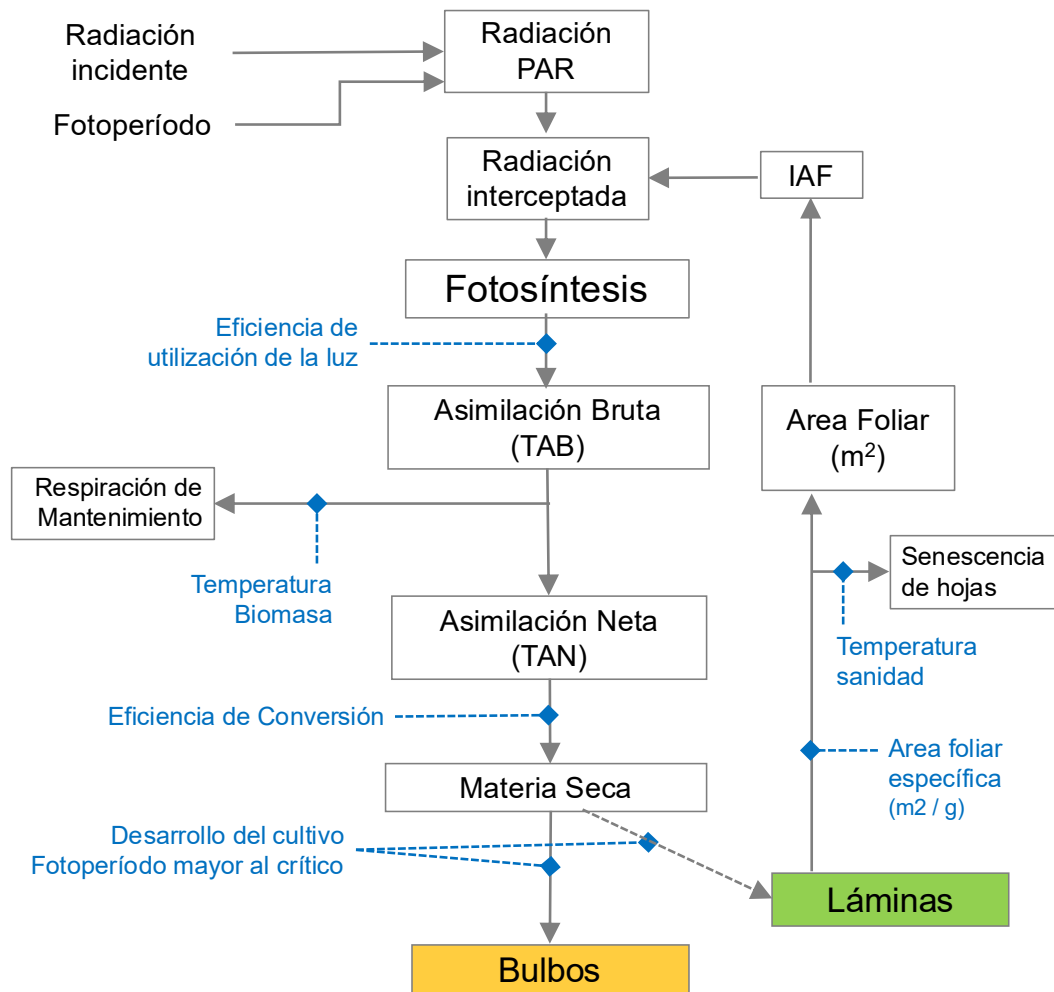
El rendimiento en cebolla se forma a partir del número de bulbos.ha⁻¹ y el peso promedio de los bulbos. El rendimiento del cultivo depende de la tasa de crecimiento del bulbo durante el periodo de bulbificación y del tiempo que dura el período. Cuando se inicia el periodo de bulbificación todos los asimilados que se encuentran disponibles se destinan al crecimiento del bulbo, por ende, la tasa de crecimiento de los bulbos durante la bulbificación está estrechamente relacionada con la Tasa de Asimilación Neta (TAN, Kg CH₂O ha⁻¹ d⁻¹) del cultivo durante la bulbificación. La TAN y consecuentemente el rendimiento en cebolla está fuertemente relacionado al porcentaje de luz interceptada por el canopeo foliar durante la bulbificación (Brewster, 1994). Por lo tanto, el IAF logrado al inicio de la bulbificación determina la potencialidad de intercepción de luz por el canopeo foliar (Brewster, 1994).

Otro aspecto importante es el factor de conversión (FC) de azúcares simples en materia seca de bulbo. La TAN depende de la cantidad de radiación interceptada por las

hojas y de la eficiencia con que esa luz se utiliza para producir asimilados, estos asimilados se destinan finalmente al crecimiento del bulbo (Dogliotti et al., 2011). Estos procesos se esquematizan en la Figura 1 y en las ecuaciones que se presentan seguidamente.

Figura 1

Formación del rendimiento en el cultivo de cebolla



La figura 1 muestra el proceso de formación del rendimiento en cebolla. La radiación y el fotoperíodo determinan la fotosíntesis y, junto con el índice de área foliar (IAF), regulan la producción de materia seca. Esta materia seca, resultado de la asimilación neta (TAN), se distribuye entre las hojas y los bulbos según el estado de desarrollo del cultivo. Factores como la temperatura, la sanidad y la eficiencia en el uso de la luz influyen en este proceso y, en consecuencia, en el rendimiento final.

$$\text{Eq. 1} \quad \text{Rendimiento}_{\text{Bulbos}} [kg \cdot ha^{-1}] = \frac{\text{Rendimiento MS}_{\text{Bulbos}} [kg MS \cdot ha^{-1}]}{MS \%}$$

$$\text{Eq. 2} \quad \text{Rendimiento MS}_{\text{Bulbos}} [kg MS \cdot ha^{-1}] = TC [kg MS \cdot ha^{-1} \cdot d^{-1}] \times \text{Dur Bulb} [d]$$

$$\text{Eq. 3} \quad TC [kg MS \cdot ha^{-1} \cdot d^{-1}] = TAN [kg CH_2O \cdot ha^{-1} \cdot d^{-1}] \times FC [kg MS \cdot kg CH_2O^{-1}]$$

$$\text{Eq. 4} \quad TAN [kg CH_2O \cdot ha^{-1} \cdot d^{-1}] = Rad Int [MJ \cdot ha^{-1} \cdot d^{-1}] \times EUL [kg CH_2O \cdot MJ^{-1}]$$

Donde:

TC es la tasa de crecimiento de los bulbos

TAN es tasa de asimilación neta durante la bulbificación

FC es el factor de conversión de azúcares simples en materia seca del bulbo

EUL es la eficiencia de uso de la luz en azúcares simples producidos por MJ (megajoules) de radiación (Dogliotti et al., 2011)

De estas cuatro ecuaciones se pueden destacar tres variables importantes para determinar el rendimiento del cultivo: la cantidad de radiación interceptada, la eficiencia en el uso de la luz y la duración de la bulbificación. Según Dogliotti et al. (2011) la cantidad de radiación interceptada por el cultivo se ve directamente influenciada por dos factores: la radiación fotosintéticamente activa (PAR) y el área foliar del cultivo durante la bulbificación (Figura 1). El nivel de PAR incidente, que es esencial para el proceso fotosintético, se convierte en una variable climática clave, variando significativamente según la ubicación del cultivo y la época del año en la que se inicie la bulbificación. Además, el momento de la bulbificación está intrínsecamente vinculado a la variedad.

El crecimiento del área foliar del cultivo se detiene al inicio de la bulbificación, por lo tanto, el cultivo alcanza su IAF máximo en ese momento, disminuyendo a partir de ahí gradualmente hasta la maduración del cultivo. El valor del IAF al inicio de bulbificación es una de las variables con mayor incidencia en el rendimiento final del cultivo (Dogliotti et al., 2021).

La eficiencia de uso de la luz depende principalmente de la temperatura media. Al ser la cebolla una planta C3, tiene un rango óptimo que oscila entre los 19 y 22 °C. Si la temperatura es diferente a la temperatura óptima la EUL disminuye. Además, la EUL disminuye a medida que la radiación aumenta, si hay déficit hídrico o si existen deficiencias de nutrientes (Dogliotti et al., 2011).

La duración del periodo de bulbificación está fundamentalmente influenciada por la temperatura media, ya que temperaturas altas aceleran la senescencia del follaje y acortan el período de bulbificación. Secundariamente, se ha encontrado que el porcentaje de la radiación incidente interceptada por el cultivo, que depende del IAF al inicio de la bulbificación. Cuanto mayor es el IAF, menor es el periodo de bulbificación observado (Brewster et al., 1986).

3.4 IMPORTANCIA DE LA NUTRICIÓN MINERAL

El crecimiento de las plantas depende de varios factores, que van desde la regulación genética hasta los factores edafoclimáticos (Bonilla, 2008). Las plantas necesitan luz, agua, minerales, oxígeno, dióxido de carbono y una temperatura adecuada para crecer. Estos requisitos absolutos de crecimiento deben estar disponibles dentro de rangos apropiados y en equilibrio con otros para lograr un crecimiento óptimo (Hochmuth & Hanlon, 2022). Para una especie vegetal y en un ambiente dado, los factores de crecimiento más importantes son la luz, el agua, el CO₂ y los nutrientes minerales (Bonilla, 2008).

Los nutrientes de las plantas se clasifican en dos grandes grupos: orgánicos e inorgánicos. Los primeros representan entre el 90 y el 95% del peso seco de las plantas y están constituidos por los elementos carbono, oxígeno e hidrógeno. Estos elementos orgánicos son obtenidos a partir del CO₂ de la atmósfera y del agua del suelo. El 5-10% restante constituye la denominada fracción mineral (Hochmuth & Hanlon, 2022).

Un total de 17 elementos son necesarios para que las plantas crezcan y se reproduzcan normalmente. Los elementos son: carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), hierro (Fe), boro (B), manganeso (Mn), cobre (Cu), zinc (Zn), molibdeno (Mo), cloro (Cl) y níquel (Ni) (Hochmuth & Hanlon, 2022).

Cada uno de los elementos esenciales tiene al menos una función específicamente definida en el crecimiento de las plantas, de modo que las plantas no pueden crecer ni reproducirse normalmente en ausencia de ese elemento. Sin embargo, la mayoría de los elementos esenciales tienen varias funciones en la planta (Hochmuth & Hanlon, 2022). El contenido de cada nutriente en los tejidos vegetales está determinado por varios factores, entre los que podemos destacar la genética, la disponibilidad de nutrientes en el suelo o el medio de cultivo, el momento fenológico o edad de la planta y el órgano o tejido vegetal que se considere (Bonilla, 2008).

La atmósfera proporciona C y O, y el H lo proporciona el agua. Juntos, estos tres elementos se combinan en compuestos orgánicos simples durante el proceso de fotosíntesis. Los otros 14 elementos provienen principalmente del suelo, ya sea de los nutrientes originalmente disponibles en el suelo, cal y fertilizantes residuales, o de las aplicaciones actuales de cal y fertilizantes. Otras fuentes menos importantes de nutrientes para las plantas son el agua de pozo (Ca, Mg, S, Fe) y la deposición atmosférica (S y N). Los macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S) son los que se encuentran en concentraciones comparativamente más altas en las plantas y sus contenidos se miden en porcentaje (%). Los micronutrientes (Fe, B, Mn, Cu, Zn, Mo, Cl) están presentes en las plantas en concentraciones comparativamente más pequeñas y sus concentraciones se miden en partes por millón (ppm) (Hochmuth & Hanlon, 2022).

Anualmente la producción de cebolla es afectada por varios factores: bióticos y abióticos (Shukla et al., 2016). Para obtener altos rendimientos en los cultivos es necesario brindarles un adecuado suministro en cantidad y calidad de nutrientes (Berrueta et al., 2022). Las cebollas requieren una alta disponibilidad de N y frecuentemente se utilizan altas tasas de aplicación de fertilizantes (Greenwood et al., 1980, como se cita en Geisseler et al., 2022), ya que es un nutriente que afecta significativamente el crecimiento, el rendimiento y la calidad de la cebolla (Amare, 2020). El rendimiento y la calidad de la cebolla se ven afectados por la fertilización de macro y micronutrientes. Las cebollas son más sensibles a la escasez de nutrientes que la mayoría de las hortalizas, debido a las características de las raíces poco profundas y no ramificadas de la cebolla (Amare, 2020).

3.5 NITRÓGENO EN EL CULTIVO DE CEBOLLA

3.5.1 Importancia y funciones del nitrógeno en la planta

El nitrógeno es el cuarto nutriente más abundante en las plantas (Huber, 1980, como se cita en Arias Pandolfo, Galván Vivero, et al., 2024). Es el nutriente más utilizado como fertilizante a nivel mundial, dado que es el principal responsable del rendimiento de los cultivos y se asocia a un desarrollo vegetativo vigoroso (Huber, 1980, como se cita en Arias Pandolfo, Galván Vivero, et al., 2024). El nitrógeno es el componente principal de las células, ya que representa el 7% de la materia seca total de la mayoría de las plantas (Amare, 2020). Se encuentra en muchos compuestos, incluida la clorofila, aminoácidos, proteínas y ácidos nucleicos (Hochmuth & Hanlon, 2022), que son necesarios para la fotosíntesis y el crecimiento de la planta (Brewster & Rabinowitch, 1990).

Según el estudio "Nitrogen nutrition and fertilization of onions (*Allium cepa* L.)—A literature review" de Geisseler et al. (2022), el nitrógeno es uno de los nutrientes más importantes para la cebolla, ya que es un componente esencial de las proteínas y de otros compuestos importantes para el crecimiento vegetativo y la formación del bulbo. En cebolla, el nitrógeno es un nutriente esencial y suele limitar el rendimiento ya que tiene gran efecto en el tamaño del bulbo (Geisseler et al., 2022). En promedio, el 65% del N total de la biomasa aérea se encuentra en los bulbos en el momento de la cosecha, mientras que el 35% se encuentra en las hojas (Geisseler et al., 2022). Diversos estudios han demostrado que la fertilización nitrogenada en dosis adecuadas y en el momento adecuado puede mejorar significativamente la producción y calidad de la cebolla, así como su contenido nutricional (Brewster & Rabinowitch, 1990).

3.5.2 Requerimientos de nitrógeno

La cebolla (*Allium cepa* L.) es una planta con un sistema radicular poco profundo, lo que la hace especialmente dependiente de un manejo adecuado del nitrógeno (N) para satisfacer sus requerimientos nutricionales (Amare, 2020). El patrón estacional de absorción de este nutriente sigue una curva sigmoidea, que se corresponde con la curva de acumulación de materia seca del cultivo, caracterizada por una acumulación inicial lenta de N en la biomasa aérea, seguida de una absorción más acelerada durante la segunda mitad del ciclo. Este proceso culmina con una disminución en la acumulación de nitrógeno hacia las últimas semanas previas a la cosecha (Geisseler et al., 2022).

La etapa de desarrollo del bulbo es especialmente crítica, ya que en este momento la demanda de N alcanza su punto máximo (Geisseler et al., 2022). Por ello, una fertilización adecuada debe estar sincronizada con esta etapa fenológica para maximizar la eficiencia del uso del nitrógeno y minimizar pérdidas por lixiviación.

La concentración de nitrógeno en las hojas también varía según la etapa de crecimiento y la tasa de fertilización aplicada. En plantas jóvenes y bien fertilizadas, la concentración de N es alta; sin embargo, al final del ciclo, disminuye debido a la translocación de N desde las hojas hacia los bulbos (Geisseler et al., 2022). Este fenómeno destaca la importancia de ajustar las aplicaciones de nitrógeno a las necesidades dinámicas del cultivo para evitar deficiencias en momentos clave. Moltini, Genta y Zamalvide (1995, como se cita en Arboleya et al., 2017) los requerimientos promedio de absorción del cultivo de cebolla son del orden de 130 kg/ha de nitrógeno, 24 kg/ha de fósforo y 130 kg/ha de potasio. Sin embargo, estos valores pueden variar dependiendo de los niveles de rendimiento esperados (Arboleya et al., 2017). Se estima que la cebolla absorbe 3.9 kg de N por tonelada de bulbo fresco producido, con un índice

de cosecha de 0.6 (Ciampitti & García, 2007). Es importante diferenciar entre la absorción total de nutrientes por parte del cultivo a lo largo del ciclo y la extracción, que corresponde a la cantidad de nutrientes presentes en los bulbos cosechados. Los valores estimados de extracción en los bulbos cosechados son de 2.5 kg de nitrógeno/tonelada de bulbo cosechado, 0.4 kg de fósforo de fósforo/tonelada de bulbo cosechado y 2.4 kg de potasio/tonelada de bulbo cosechado (Brewster, 2008; Ciampitti & García, 2007; Dogliotti et al., 2011).

La eficiencia en el uso de fertilizantes nitrogenados en la producción de cebolla es baja, lo que aumenta el riesgo de pérdidas por lixiviación, especialmente en suelos arenosos o con manejos deficientes (Geisseler et al., 2022). Esto convierte al nitrógeno en uno de los nutrientes más sensibles a ser perdido por lixiviado, con implicancias económicas y ambientales significativas (Arboleya et al., 2017).

Un manejo eficiente del nitrógeno requiere no solo comprender las demandas del cultivo, sino también evaluar el estado nutricional de las plantas y calcular con precisión las tasas de aplicación. Herramientas como el análisis rápido de savia para determinar el estado de la concentración de nitrato en plantas han demostrado ser útiles para este propósito, permitiendo ajustes en la fertilización para optimizar el rendimiento y reducir costos (Buajaila & Miles, 2019; Havlin et al., 2014). Es importante aplicar la cantidad adecuada de nitrógeno y en el momento oportuno durante el ciclo de cultivo (Brewster & Rabinowitch, 1990).

3.5.3 Deficiencias, excesos y toxicidad por nitrógeno

Según Römheld (2012), la detección temprana de las deficiencias de nutrientes es fundamental, dado que cuando los síntomas se manifiestan, el cultivo ya ha experimentado una disminución significativa en su capacidad productiva. Por lo tanto, la gestión adecuada de los fertilizantes resulta crucial para asegurar una nutrición balanceada y mantener el potencial productivo de los sistemas agrícolas.

La observación de síntomas de deficiencia de nutrientes en un cultivo constituye una herramienta para evaluar el estado nutricional de un cultivo. Presenta la ventaja de ser una técnica aplicable en el campo. La marcada carencia de un determinado nutriente puede provocar la aparición de síntomas visuales característicos en la planta. Sin embargo, la carencia de un nutriente no produce síntomas directamente, sino que en la planta se generan procesos que conducen a desbalances nutricionales, con acumulación de un determinado compuesto orgánico intermediario, o la falta de formación de un compuesto (Barbazán, 1998). No es aconsejable usar la sintomatología

de deficiencia como única herramienta de diagnóstico, sino que deben emplearse como suplemento de otras técnicas de diagnóstico: análisis de suelo y/o de planta, observación del estado general de las plantas (vigor, color) (Barbazán, 1998).

Las deficiencias pueden causar reducción del rendimiento, debilidad severa de las plantas, síntomas específicos en hojas, anormalidades internas como obstrucción de conductos, retardo de la madurez o baja calidad del producto cosechado (Barbazán, 1998). En cultivos de cebolla con baja disponibilidad de N se observa retraso en el crecimiento, menor calidad y rendimiento del bulbo (Amare, 2020).

Los nutrientes móviles en el floema son N, P y K. Cuando el suministro de los mismos es limitante, los tejidos jóvenes los obtienen a expensas de las hojas viejas, en las que su contenido consecuentemente disminuye (Barbazán, 1998). Los síntomas de deficiencia de N son los característicos de un elemento muy móvil: se produce clorosis en las hojas más adultas que, con frecuencia, caen de la planta anticipadamente antes de volverse necróticas (Bonilla, 2008). El Mg, en general, se comporta en forma similar a los nutrientes móviles. Sin embargo, el Ca, B, Mn y Fe son relativamente inmóviles en el floema. Estos nutrientes no son movilizados desde los tejidos viejos hacia los tejidos jóvenes cuando disminuye su suministro. Los síntomas de deficiencia de los nutrientes considerados inmóviles aparecen en hojas nuevas, su concentración es alta en hojas viejas, declinando rápidamente en hojas jóvenes (Barbazán, 1998).

Durante la producción de plantines de cebolla en el almácigo, cantidades excesivas de nitrógeno pueden afectar la germinación de la semilla. Se debe ser cuidadoso con el agregado de nitrógeno ya que puede acelerar el desarrollo de los plantines lo que puede traer dos consecuencias negativas. Por un lado, los tejidos de las hojas serán más tiernos y por consiguiente más sensibles al ataque de enfermedades. Por otro lado, si se acelera el crecimiento de los plantines y no se tiene el terreno preparado para el trasplante, u ocurren precipitaciones que no permiten preparar el suelo, se corre el riesgo que los plantines se envejeczan (Arboleya et al., 2017).

Factores de manejo del cultivo que afectan el desarrollo foliar como la fertilización nitrogenada, el riego y la ocurrencia de enfermedades foliares pueden dificultar el correcto cerrado del cuello del bulbo, ocasionando cuellos anchos, generando pérdidas de agua y mayor susceptibilidad a enfermedades por patógenos derivando en una menor conservación poscosecha (Carballo, 2005, García et al., 1985, 1998, como se citan en Vieta Delgado, 2020). El área foliar alcanzada al inicio de la bulbificación

determina el rendimiento del cultivo. Un área foliar excesiva puede determinar mayores tamaños de bulbos, pero con cerrado del cuello de los bulbos deficiente (Vieta Delgado, 2020).

3.5.4 Fuentes de nitrógeno

El nitrógeno es un nutriente mineral complejo, presente en diferentes formas en el suelo, el aire y el agua. Debido a esta diversidad, resulta difícil establecer recomendaciones precisas sobre su dosis y requerimientos. Las plantas pueden obtener el nitrógeno necesario a partir de una combinación de fuentes: suelo y fertilizantes, lo que asegura la cantidad requerida (Amare, 2020).

En la naturaleza, hay dos principales reservas de nitrógeno. La mayor es la atmósfera, donde el 78% del aire corresponde a nitrógeno (Barbazán, 1998). La otra reserva importante de N es la materia orgánica del suelo (MOS). Del total del N que hay en el suelo, aproximadamente el 98% se encuentra formando compuestos orgánicos (Barbazán, 1998).

Otras fuentes no fertilizantes incluyen el nitrato residual del suelo, el nitrato presente en el agua de riego y el nitrógeno mineralizado de la materia orgánica durante el crecimiento, los cuales varían considerablemente según el sitio y el año (Geisseler et al., 2022).

Las cebollas, al igual que muchas plantas, no pueden utilizar directamente el nitrógeno de la atmósfera. Este debe ser fijado al suelo por microorganismos que transforman el N_2 en formas disponibles, como amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-) (Galloway et al., 2008; Schimel & Bennett, 2004).

La cantidad de materia orgánica en el suelo determina en gran medida la disponibilidad de nitrógeno. La MOS mejora la estructura del suelo, la retención de agua y el intercambio catiónico. Durante su descomposición, bacterias y hongos liberan compuestos orgánicos complejos, como proteínas y aminoácidos, que son mineralizados por enzimas microbianas para formar amonio (NH_4^+). A través del proceso de nitrificación, llevado a cabo por bacterias específicas del suelo, el amonio se transforma en nitrato que es una forma de nitrógeno fácilmente absorbible por las plantas (Hawkesford et al., 2012; Paul & Clark, 1996).

La mayor parte del nitrógeno del suelo se encuentra en su fracción orgánica, que no es asimilable por las plantas. Por ello, los procesos de mineralización, controlados por microorganismos, son fundamentales para liberar formas disponibles como el

amonio y el nitrato. Sin embargo, determinar el nitrógeno disponible en el suelo en relación al nitrógeno es complejo debido a procesos como la desnitrificación, la lixiviación y la volatilización del amonio en forma de amoníaco. Además, factores como la inmovilización microbiana y la absorción del amonio por el coloide arcilloso-húmico del suelo dificultan la predicción del potencial nutritivo del nitrógeno del suelo (Bonilla, 2008).

3.5.4.1 Materia orgánica

Como la mayor proporción del nitrógeno en el suelo es orgánico (98%), hay una estrecha asociación entre el contenido de materia orgánica y el contenido total de nitrógeno del suelo (Bonilla, 2008; Ciampitti & García, 2007). La dinámica del N en el suelo no está regulada por un equilibrio químico, sino principalmente por procesos biológicos, derivados de la actividad microbiana del suelo (Barbazán, 1998). El contenido de MOS de un sistema natural determinado tiende a permanecer relativamente constante, y el nivel de equilibrio al que se llega depende del clima, del tipo de suelo y del tipo de cobertura vegetal (Barbazán, 1998).

El N presente en el suelo bajo formas orgánicas tampoco está disponible para las plantas, sino que para ser absorbido tiene que pasar a formas inorgánicas (Barbazán, 1998). Al proceso por el cual el N queda disponible se lo denomina mineralización (Jansson & Persson, 1982). El N inorgánico representa un 2% del N total del suelo, encontrándose en formas de nitrato (NO_3^-), amonio (NH_4^+) y nitrito (NO_2^-). Debido a que ésta es la forma en que el N es absorbido por las plantas, el N inorgánico es muy importante para la nutrición vegetal (Barbazán, 1998).

3.5.4.2 Ganancias y pérdidas de nitrógeno

Los principales mecanismos de ganancia de N son: a) N aportado con las lluvias; b) N proveniente de la fijación no simbiótica; c) N proveniente de la fijación simbiótica; d) N aportado por los fertilizantes y abonos orgánicos. Los principales mecanismos de pérdida de N son: a) N extraído por los cultivos y los animales (aunque este es el objetivo de la actividad agrícola, es también la principal forma de salida de N del sistema); b) desnitrificación; c) volatilización; d) lixiviación; e) erosión.

El término mineralización se usa normalmente para describir la transformación de N orgánico en N inorgánico, ya sea en forma de NH_4^+ o NO_3^- (Barbazán, 1998; Page et al., 1982). Algunos de los factores que más inciden en la tasa de mineralización son la humedad y la temperatura del suelo, aunque existen otras condiciones que también

influyen, como pueden ser las propiedades físicas y químicas del suelo, las prácticas de manejo o la presencia de otros nutrientes (Barbazán, 1998; Campbell, 1978).

El pasaje de N orgánico a NH_4^+ involucra dos reacciones, aminización y amonificación, llevadas a cabo por una gran variedad de microorganismos no especializados, incluyendo bacterias aeróbicas y anaeróbicas, hongos y actinomicetes. Es además un proceso lento comparado con el resto de las transformaciones que sufre el N hasta llegar a NO_3^- . El NH_4^+ producido en la mineralización tiene varios caminos a seguir: a) puede ser utilizado por microorganismos heterotróficos para descomponer más residuos orgánicos carbonados –proceso denominado “inmovilización”; b) puede ser absorbido directamente por las plantas superiores; c) puede ser convertido a NO_2^- y NO_3^- por nitrificación; d) puede ser fijado por minerales arcillosos; e) puede ser liberado lentamente hacia la atmósfera como N_2 (Barbazán, 1998).

Los procesos de nitrificación consisten en la oxidación secuencial del amonio a nitrito (Cerón Rincón & Aristizábal Gutiérrez, 2012). Las bacterias encargadas de realizar este proceso utilizan el carbono inorgánico (CO_2 o HCO_3^-) como fuente de carbono, y obtienen la energía necesaria para su crecimiento a partir de la oxidación del nitrógeno amoniacal. La nitrificación del nitrógeno amoniacal se realiza en dos etapas llevadas a cabo por dos grupos diferentes de microorganismos (bacterias amonioxidantes y nitritoxidantes). En las reacciones bioquímicas de ambas etapas se produce energía que es utilizada por los microorganismos para el crecimiento y mantenimiento celular. En la etapa de nitrificación se consigue oxidar el nitrógeno amoniacal a nitrato. Para transformar ese nitrato a nitrógeno gaseoso, y por ejemplo poder reducir el contenido de nitrógeno del agua residual, se requiere de una segunda etapa, denominada desnitrificación (Cerón Rincón & Aristizábal Gutiérrez, 2012).

3.5.4.3 Fuentes inorgánicas

Para lograr altos rendimientos y hacer rentable la actividad agropecuaria los cultivos requieren de un adecuado suministro de N. Si el suelo no es capaz de aportar todo el N que demanda el cultivo, es posible suministrar N como fertilizante. Estos fertilizantes pueden originarse en procesos de síntesis química (sintetizados por el hombre) o provenir de fuentes orgánicas (por ejemplo, estiércol). Actualmente, los fertilizantes de origen químico sintético constituyen una fuente importante de N en muchos sistemas agrícolas (Barbazán, 1998).

Dentro de las fuentes nitrogenadas inorgánicas existen dos grandes tipos: las amoniacales y las nítricas. La mayoría de los fertilizantes nitrogenados inorgánicos

derivan del amoníaco (NH_3), obtenido por síntesis de N e H gaseosos, o de la industria del carbón. A partir del NH_3 se elaboran muchos fertilizantes nitrogenados (Barbazán, 1998).

Otras fuentes de N de importancia creciente en la producción agrícola son las fuentes de liberación lenta de N, tales como la urea-formaldehído, o la urea recubierta con azufre. En el caso de la urea recubierta, el N se va liberando paulatinamente luego que los microorganismos atacan la cubierta de S (Barbazán, 1998).

En Uruguay las fuentes de N más usadas son las amoniacales, representadas en un 95% por urea y fosfato de amonio, con un amplio predominio de la urea (Barbazán, 1998). La urea [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$], es el fertilizante nitrogenado más barato de producir y relativamente fácil de transportar y manipular. La urea representa alrededor del 75% del total de N fertilizante producido. El nitrato de amonio representa aproximadamente el 16% del mercado, el sulfato de amonio aproximadamente el 5% y el nitrato de calcio y el nitrato de amonio aproximadamente el 4% (McNeill & Unkovich, 2007).

Lo que influye en la elección de una u otra fuente de N es el precio comparativo y la disponibilidad en el mercado (Barbazán, 1998). Las fuentes nítricas se usan para situaciones específicas, donde la intensidad de la producción y la rentabilidad del producto es muy alta y en horticultura también se utilizan en invierno, cuando la actividad microbiológica es escasa por las bajas temperaturas y baja nitrificación. Una ventaja de las fuentes nítricas es que no son fuentes de acidez. Por el contrario, debido a que el NO_3^- generalmente se absorbe más rápido que el catión acompañante (Na^+ , K^+ , Ca^{2+}), estas fuentes tienen cierto efecto alcalinizante (McNeill & Unkovich, 2007).

3.5.5 Absorción de nitrógeno

La cebolla tiene un sistema radical con una extensión lateral limitada, concentrándose en un radio de 15-20 cm alrededor de la planta (Geisseler et al., 2022). Esta característica implica que los nutrientes poco móviles, como el fósforo, deben estar cerca de la zona radicular para ser absorbidos eficazmente. En el suelo, los nutrientes minerales que las raíces absorben están en disolución y en equilibrio con la fase coloidal, compuesta principalmente por arcillas y sustancias húmicas (Bonilla, 2008).

El nitrógeno, esencial para el crecimiento vegetal, es absorbido por las plantas en dos formas iónicas: amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-). Estas dos formas presentan comportamientos distintos en el suelo. El amonio, de carga positiva, se adhiere a las partículas del suelo, dificultando su lixiviación y permaneciendo disponible por más

tiempo. En contraste, el nitrato, de carga negativa, es más propenso a ser lixiviado (Buajaila & Miles, 2019).

En términos de requerimientos nutricionales, un cultivo de cebolla con un rendimiento de 30.000 kg/ha absorbe aproximadamente 117 kg de nitrógeno (N)/ha, 18 kg de fósforo (P)/ha, 120 kg de potasio (K)/ha, 132 kg de calcio (Ca)/ha y 21 kg de magnesio (Mg)/ha. La extracción de nutrientes sigue un patrón similar, destacando el 64% del nitrógeno y el 67% del fósforo absorbidos, junto con proporciones significativas de otros elementos esenciales (Ciampitti & García, 2007).

Finalmente, la absorción de nutrientes acompaña la curva de crecimiento de la planta. Es lenta durante las primeras etapas (almácigo y post-trasplante) y se incrementa significativamente tras 30-40 días del trasplante, cuando se intensifica la acumulación de materia seca (Arboleya et al., 2017).

3.6 FERTILIZACIÓN CON NITRÓGENO EN CEBOLLA

La eficiencia en el uso de N se puede mejorar con fertilizantes de liberación lenta o controlada. Las aplicaciones divididas se pueden programar para que el N disponible coincida con la demanda de N del cultivo. Esto reduce el tiempo de residencia del N del fertilizante en el suelo y, por tanto, el riesgo de pérdida. La aplicación de N en bandas es otra práctica que puede aumentar significativamente el rendimiento y la absorción de N en comparación con la difusión (Geisseler et al., 2022).

La aplicación de fertilizantes nitrogenados puede aumentar la cantidad de nitrógeno disponible en el suelo. Sin embargo, el momento y la dosis de aplicación son factores importantes que considerar. Según Geisseler et al. (2022), la aplicación de nitrógeno en cobertura puede ser más eficiente que la aplicación de nitrógeno en la siembra, ya que evita pérdidas por lixiviación y volatilización. Además, la dosis de nitrógeno aplicada debe ser adecuada para evitar excesos que pueden ser perjudiciales para el crecimiento y desarrollo de la cebolla.

No debería aplicarse más del 50% del nitrógeno de base. Luego de que las plantas hayan arraigado es conveniente aportar el resto de nitrógeno en una o más veces dependiendo de la textura del suelo. No deberán realizarse aplicaciones de nitrógeno después de iniciada la bulbificación del cultivo (Arboleya et al., 2017).

Con relación a las fuentes de nitrógeno a utilizar, en las investigaciones realizadas en Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) Las Brujas con cebolla Granex 33 entre 1997 y 1998, tanto en suelos pesados de la zona de INIA Las

Brujas como en los suelos arenosos de Colonia C. Galland, no se encontraron diferencias ni en rendimiento total ni comercial entre las fuentes de nitrógeno utilizadas, urea, nitrato de amonio, nitrato de potasio, nitrato de calcio y urea con nitrato de amonio (Arboleña et al., 2017).

3.7 DIAGNÓSTICO DE LA DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES EN EL SUELO

El diagnóstico del estado nutritivo de las plantas tiene como objetivo optimizar los manejos agrícolas y estudiar la nutrición mineral. Este diagnóstico puede dividirse en dos etapas: la primera es la obtención de datos, fundamentalmente a través del análisis químico del material vegetal (análisis foliar), que puede complementarse con el análisis del suelo. La segunda etapa consiste en interpretar los resultados, comparando los datos obtenidos con valores de referencia según diferentes criterios (Bonilla, 2008).

Existen diversas metodologías para evaluar el estado nutricional del sistema suelo-planta. Entre las herramientas disponibles se encuentran el análisis de suelo y de planta, los síntomas visuales de deficiencia, las condiciones climáticas, el historial de manejo, el vigor de las plantas, y la experiencia del técnico asesor. En producciones intensivas, donde se realiza fertirriego, también es necesario considerar el análisis de la solución del suelo y la composición del agua de riego debido a su interacción con los fertilizantes (Barbazán, 1998).

Comprender los requisitos nutricionales de los cultivos y utilizar pruebas de suelo para predecir las necesidades de fertilizantes es esencial para una gestión eficiente de los nutrientes. Las pruebas de tejido vegetal permiten diagnosticar problemas nutricionales y mejorar el manejo de fertilizantes. Realizar pruebas oportunas ayuda a identificar carencias y optimizar el uso de los fertilizantes (Bonilla, 2008).

El nitrógeno en el suelo y la planta se mide principalmente en forma de nitrato, ya que es la forma más comúnmente presente y en mayor cantidad. A partir de esta concentración de nitrato, se calcula la cantidad de nitrógeno disponible en el suelo. Según Barbazán (1998), este cálculo se realiza mediante un análisis químico, en el que se mide la concentración de nitratos (NO_3^-) en mg/kg de suelo. A partir de ahí, se extrapola a kg de N/ha usando la siguiente fórmula:

$$\text{N(kg/ha)} = \text{Concentración de } \text{NO}_3^- \text{ (mg/kg)} \times \text{Profundidad (cm)} \times \text{Densidad aparente (g/cm}^3\text{)}$$

El análisis del suelo permite evaluar su potencial nutricional, es decir la capacidad del suelo para suministrar nutrientes a la planta durante un ciclo de cultivo (Bonilla, 2008). El propósito del análisis de suelos es determinar el estado de su fertilidad

e identificar los nutrientes que podrían limitar el rendimiento de las plantas, ya sea por encontrarse en exceso o en deficiencia (Pérez-López, 2013). Por este motivo el método debe extraer nutrientes del suelo en forma semejante a la extracción de la planta (McKean, 1993).

El análisis de suelo debe proporcionar información acerca de los nutrientes disponibles o asimilables por la planta, no sólo de los que puede haber en un momento dado, sino también del ritmo de incorporación de los nutrientes a la disolución del suelo. La determinación de la composición y las propiedades del suelo, como pH, textura, conductividad eléctrica (EC) y materia orgánica proporciona una información básica para conocer el potencial agrícola de un suelo. Estas propiedades marcan las condiciones en que tendrán lugar los procesos fisicoquímicos relacionados con la disponibilidad de nutrientes (Bonilla, 2008).

Los nutrientes minerales que toman las raíces de las plantas se encuentran en disolución y en equilibrio con los nutrientes de la fase coloidal del suelo, compuesta, sobre todo, por las arcillas y las sustancias húmicas. Los métodos de extracción de nutrientes asimilables normalmente consisten en la agitación del suelo con sustancias químicas extractoras, como ácidos o agentes quelantes. En la disolución que se obtiene después de la extracción se determina la concentración de los distintos nutrientes (Bonilla, 2008).

El análisis del suelo contribuye al manejo de la fertilidad de los suelos, a la determinación de disponibilidad de nutrientes, a la estimación de la probabilidad de respuesta a la fertilización, al cálculo de la dosis adecuada de fertilizantes y a la de enmiendas para corrección de suelos, como también al monitoreo de variables de fertilización en superficie. También permite la caracterización y delimitación de ambientes, haciendo un manejo diferenciado de insumos, entre otros aspectos (Duggan, 2017).

3.8 MÉTODOS PARA EL DIAGNÓSTICO DE NUTRIENTES EN LA PLANTA

Para satisfacer la necesidad de productividad óptima del cultivo y minimizar el costo y las pérdidas asociadas al uso de fertilizantes, es necesario evaluar el estado nutricional de las plantas, en particular del nitrógeno y calcular con precisión la tasa de aplicación de fertilizantes (Havlin et al., 2014). Una prueba de suelo no siempre revela con precisión el nivel de nitrógeno de un cultivo. El nitrógeno es un elemento móvil y se desplaza fácilmente por el suelo mediante riego o las precipitaciones (Bevacqua & Cardenas, 2002; Buajaila & Miles, 2019). El nitrógeno también puede quedar atrapado

por los microorganismos del suelo y no estar disponible para ser absorbido por los cultivos. Medir el nivel de nitrógeno en la planta en lugar de en el suelo es un indicador más confiable del estado de nitrógeno del cultivo (Buajaila & Miles, 2019).

El nivel de nitrógeno de las plantas se puede medir en muestras de tejido seco. Si bien es muy preciso, este método de medición de nitrógeno tiene varias limitaciones. El análisis de tejido seco requiere tiempo para secar las muestras, entregarlas a un laboratorio comercial e interpretar los resultados. Todos estos pasos consumen tiempo y dinero. Además, el estado del nitrógeno del cultivo puede haber cambiado cuando el productor recibe los resultados (Buajaila & Miles, 2019).

El órgano o tejido de la planta a muestrear debe ser aquel que manifieste mejor la relación entre su contenido de un nutriente y el rendimiento del cultivo. Esto implica que tiene que dar un amplio rango de concentración del nutriente y ser sensible a los cambios en la disponibilidad de este. Sin embargo, no siempre el tejido que mejor muestra deficiencias es el mismo que mejor muestra toxicidad para un mismo nutriente. Una vez definido qué tejido u órgano que se va a muestrear, es necesario saber también qué posición ocupa éste en la planta (Barbazán, 1998).

En general, el estado nutricional de una planta se refleja mejor por el contenido de los elementos de las hojas que por el contenido de otros órganos. No obstante, distintos factores, como el tipo de elemento, la edad y la especie vegetal, pueden hacer ocasionalmente recomendable el muestreo de otro órgano o parte de la planta (Bonilla, 2008). También existen efectos del cultivar, interacciones entre nutrientes, condiciones ambientales, que deben considerarse (Bonilla, 2008).

3.8.1 Análisis de planta o de tejido vegetal

El análisis de plantas es una herramienta fundamental para diagnosticar problemas nutricionales actuales en un cultivo y para planificar estrategias de manejo en temporadas futuras (Hochmuth & Hanlon, 2022). Este procedimiento, combinado con análisis de suelos, permite ajustar dosis de fertilizantes y optimizar el momento de su aplicación. Aunque su utilidad en cultivos anuales puede ser limitada por la rapidez con que se deben tomar decisiones, sigue siendo esencial para verificar el estado nutricional de las plantas y diagnosticar posibles deficiencias (Barbazán, 1998).

Para el análisis de plantas existen métodos destructivos y no destructivos. Los métodos destructivos son los más comunes e implican la destrucción de tejidos para convertir los nutrientes en formas minerales solubles. Esto se realiza mediante:

- Digestión por vía húmeda, utilizando ácidos como sulfúrico, nítrico o perclórico. Este método permite determinar nutrientes como N, P, K, S y micronutrientes.
- Descomposición por vía seca (cenizas), que se lleva a cabo en una mufla a altas temperaturas para analizar bases (K, Mg, Ca, Na) y P, aunque no es adecuado para elementos volátiles como N y S (Barbazán, 1998).

Existen alternativas (métodos no destructivos) que no implican la destrucción de tejidos, como:

- Análisis por reflectancia de infrarrojo, que correlaciona la intensidad de la luz con la composición química de la muestra molida (Barbazán, 1998).
- Test de clorofila, donde se relaciona el color de la hoja con el nivel de nitrógeno. Aunque es un método práctico y económico, requiere calibración para cada cultivo y región (Barbazán, 1998).

3.8.2 Interpretación de resultados de los análisis foliares

La interpretación más común se basa en el concepto de nivel crítico, que compara la concentración de nutrientes con un valor de referencia (Figura 2). Sin embargo, este método tiene limitaciones debido a la variabilidad geográfica y temporal. Una alternativa es el rango de suficiencia, que establece un intervalo de concentraciones dentro del cual el rendimiento del cultivo no se ve afectado (Bonilla, 2008; Hochmuth & Hanlon, 2022).

Figura 2

Rendimiento en función de la concentración de nutrientes en planta



Nota. Tomado de Barbazán (1998).

Existen otros métodos, diferentes al método tradicional de niveles críticos que nos permiten interpretar los resultados de los análisis de plantas. El sistema DRIS (Diagnosis and Recommendation Integrated System) evalúa las relaciones entre nutrientes en lugar de concentraciones absolutas, lo que reduce las variaciones por edad o etapa del cultivo (Barbazán, 1998). Este enfoque permite extrapolar datos de una región a otra y priorizar el balance de nutrientes (Barbazán, 1998).

3.8.3 Análisis de Savia

El análisis de savia consiste en evaluar la concentración de nutrientes presentes en el jugo extraído de los tejidos conductores, proporcionando una visión inmediata del estado nutricional del cultivo (Cadahía, 2008). Métodos como la savia a presión o el exudado de xilema permiten obtener esta información. Este análisis es particularmente útil en cultivos de rápido crecimiento o en etapas tempranas, ya que complementa al análisis foliar al reflejar condiciones actuales (Bonilla, 2008).

3.9 MÉTODOS RÁPIDOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL NITRÓGENO EN PLANTAS

En los sistemas intensivos de producción, como los sistemas hortícolas, el manejo de la nutrición de los cultivos se basa fundamentalmente en la experiencia de los técnicos y productores (Grasso et al., 2021). La dinámica acelerada de los cultivos hortícolas requiere de la toma de decisiones semanales (Grasso et al., 2021). Comprender los requerimientos de nutrientes de cada cultivo y el uso de análisis de suelo de cada chacra para predecir las necesidades de los cultivos son claves para manejar eficientemente la nutrición (Hochmuth & Hanlon, 2022).

Los resultados de los análisis de tejido junto con los análisis de suelo proveen herramientas útiles para el manejo de la nutrición (Hochmuth & Hanlon, 2022). Los análisis de laboratorio para medir nutrientes en el suelo, en el agua o en los tejidos de las plantas brindan datos altamente confiables (Grasso et al., 2021). Sin embargo, este tipo de análisis tiene altos costos y la obtención de resultados requiere tiempos más extensos que los deseables para la toma de decisiones a corto plazo (Grasso et al., 2021). Recientemente, la disponibilidad de tests rápidos que cuantifican el contenido de nutrientes en las plantas surge como herramientas complementarias a los análisis de laboratorio (Berrueta et al., 2022). Estas pruebas tienen bajo costo y la rapidez de los resultados permiten realizar monitoreos rutinarios y ajustar la dosis en tiempo real (Berrueta et al., 2022). El test puede ser realizado tanto en el predio como en el laboratorio, usando un tejido, savia o extracto, aplicándose normalmente

determinaciones semicuantitativas de las fracciones solubles de nutrientes (nitratos, fosfatos, etc.). Este tipo de método permite obtener resultados de poca precisión en forma inmediata y a bajos costos (Barbazán, 1998).

En Uruguay se ha ajustado el método de medición de nutrientes en savia para el cultivo de tomate (Berrueta et al., 2022). El método para el tomate consiste en coleccionar una muestra de hojas sanas (hoja nueva completamente desarrollada) en las primeras horas de la mañana. Conservar las muestras refrigeradas, y próximas a realizar la determinación llevarlas a temperatura ambiente. Previo a la medición se calibra el sensor LAQUAtwin. Los pecíolos se cortan y se exprimen con una prensa manual. En el receptáculo del medidor se deben colocar unas gotas de jugo fresco y luego de algunos segundos se registra la medida. El receptáculo se debe lavar entre muestra y muestra con agua destilada (Berrueta et al., 2022).

Los kits de prueba de savia de las plantas parecen tener mayor utilidad para los nutrientes móviles como N, P y K. Estos elementos, particularmente N y K, constituyen la mayor parte de los nutrientes aplicados como fertilizantes a los cultivos de hortalizas y también son los más utilizados (Hochmuth & Hanlon, 2022).

Un buen ejemplo es el manejo del N durante la temporada con fertirriego. El uso rutinario de una prueba rápida de savia vegetal calibrada podría ayudar a un administrador de fertirriego a tomar decisiones con respecto a la programación de N para el cultivo. El manejo adecuado del N podría reducir las aplicaciones generales de fertilizantes a ese cultivo (Hochmuth & Hanlon, 2022).

Para los medidores Cardy (LAQUA TWIN), se presiona la savia de la planta de los pecíolos y se coloca una gota en el medidor Cardy, cubriendo ambos puntos de los electrodos en el medidor. El medidor debe calibrarse con soluciones de iones estándar antes de medir la concentración de iones en la savia y nuevamente entre cada 6 u 8 mediciones. Existen medidores específicos para nitrato-N (Hochmuth & Hanlon, 2022).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 UBICACIÓN DEL EXPERIMENTO

El trabajo experimental se realizó en el Centro Regional Sur (CRS), Progreso, Canelones, Uruguay (Camino Folle km 35, 15900 Progreso, Departamento de Canelones).

El CRS es una estación experimental de la Facultad de Agronomía, Universidad de la República. El experimento fue realizado desde 4 de agosto de 2022 (fecha de trasplante) al 9 de diciembre de 2022 (fecha de cosecha).

4.2 DESCRIPCIÓN DEL SUELO

De acuerdo al mapa geológico del departamento de Canelones escala 1:1000000 (Spoturno et al., 2004) el suelo en el que se realizó el experimento se encuentra sobre la formación Libertad. Predominan suelos Vertisoles Rúpticos Típico Limo Arcilloso los cuales pertenecen al grupo 10.8 a con un índice de CONEAT de productividad de 138. Esta información se obtuvo ingresando al visor web de la Dirección General de Recursos Naturales (<https://dgrn.mgap.gub.uy/js/visores/dgrn/>) y utilizando la herramienta de búsqueda por padrón, donde se ingresó el N° 26644 correspondiente al cuadro donde se instaló el cultivo en la ciudad de Canelones. Se consultaron las capas de suelos y el índice de productividad CONEAT (Dirección General de Recursos Naturales [DGRN], s.f.).

En el laboratorio del Departamento de Suelos y Aguas de la Facultad de Agronomía, al momento de la instalación del cultivo (4 de agosto de 2022) se analizó una muestra de suelo compuesta de 0-20 cm de profundidad, del cuadro ya encanterado en donde se instaló el ensayo. En el cuadro 1 se observan los resultados obtenidos del análisis de suelo. El suelo presentó 4,08% de materia orgánica, 2,37% de carbono orgánico, un pH de 6,35, un contenido de bases totales (Ca, Mg, K y Na) de 23,72 meq/100g de suelo y 105 ppm de P. A partir de dichos resultados se ajustó la fertilización del cultivo.

Cuadro 1

Análisis de suelos en donde se instaló el ensayo

pH en agua	P	Ca	Mg	K	Na	M.O	C.O
	ppm	meq/100g	meq/100g	meq/100g	meq/100g	%	%
6,35	105	16,53	5,51	1,34	0,34	4,08	2,37

Nota. pH (H₂O), P = fósforo (ppm), Ca = calcio (meq/100g), Mg = magnesio (meq/100g), K = potasio (meq/100g), Na = Sodio (meq/100g), M.O = materia orgánica (%), C.O = carbono orgánico (%).

4.3 INSTALACIÓN DEL CULTIVO

El presente trabajo final de grado se encuentra enmarcado dentro de un proyecto de doctorado en el que además de la calibración de los Laqua Twin se evalúa la incidencia del N en la severidad del mildiu causado por *Peronospora destructor*. Por dicho motivo se utilizaron dos cultivares (VPA) provenientes del programa de mejoramiento de cebolla de la Facultad de Agronomía: Pantanoso del Sauce CRS y Armonía CRS. Ambos materiales son de día intermedio (DI). Presentan diferente comportamiento frente al mildiú: Armonía presenta resistencia parcial mientras que Pantanoso es susceptible. Durante las evaluaciones que se han realizado desde 2013, Armonía ha tenido un nivel de resistencia intermedio entre los padres del cruzamiento que le dio origen ('Pantanoso': 30 – 50%, 'Armonía': 5 – 15%, 'Regia': 0 – 5%) (Arias Pandolfo, 2019).

El 20 de abril de 2022, se instaló en canteros solarizados el almácigo de las dos variedades. El objetivo fue obtener plantines con tres a cuatro hojas y un largo de 25 centímetros aproximadamente. Los canteros fueron sembrados en filas con una distancia de 10 cm entre ellas. La densidad de siembra fue de 4 g de semilla/m².

Previo al trasplante se preparó el suelo con disquera y se realizaron los canteros con encanterador con orientación y pendiente suroeste a noreste. Se colocaron dos cintas de riego goteo por cantero separadas a 20 cm. El ensayo se instaló sobre un cuadro que el año anterior había tenido un cultivo de cebolla. El cultivo se estableció mediante la técnica de trasplante el 4 de agosto de 2022. Cada tratamiento se implementó en dos parcelas por bloque, con una longitud de 10 metros. Las parcelas se ubicaron sobre canteros con cuatro filas de plantas, manteniendo una distancia de 10

cm entre cada planta, lo que resultó en un total de 400 plantas por parcela, determinando 267.000 plantas/ha.

4.4 MANEJO DEL CULTIVO

Las malezas fueron controladas de forma química y manual. En cuanto al control con herbicidas se realizaron aplicaciones con diferentes principios activos: Oxifluorfen, Linuron y Oxadiazon. La elección de dichos productos fue en base a las malezas encontradas en el cuadro y de acuerdo con su estado fenológico. El primero (Oxifluorfen, nombre comercial del producto usado: Goal) tiene acción pre emergente sobre gramíneas, ciperáceas y hoja ancha. Linuron (nombre comercial usado: Linurex) es sistémico en donde afecta tanto a malezas de hoja ancha como angosta y Oxadiazon (nombre comercial usado: Doxon) tiene efecto sobre gramíneas anuales y plurianuales.

La principal plaga al momento del trasplante fue la aparición de trips, para la cual se aplicó Movento (principio activo: Spirotetramat) y Zenith (principio activo: Lambdacialotrina). El criterio de decisión de las aplicaciones en base al monitoreo diario del cultivo.

En lo que respecta a enfermedades, el principal problema sanitario fue el mildiú, provocado por *Peronospora destructor*. Para su manejo, se realizaron aplicaciones de fungicidas en función del monitoreo diario del cultivo y de las condiciones ambientales predisponentes. En el cuadro 2 se detallan los productos utilizados y sus respectivas dosis.

Las demandas hídricas fueron cubiertas en forma uniforme en todos los tratamientos y bloques durante todo el ciclo según el monitoreo diario del estado hídrico del suelo durante el cultivo.

Cuadro 2*Fungicidas, herbicidas e insecticidas aplicados*

Grupo	Nombre comercial	Principio Activo	Dosis
Fungicidas	Ridomil	4 g Metalaxil - M + 64 g Mancozeb	
	Proplant	Propamocarb 722 g/L CS	190 mL/100L
	Mancozeb	Mancozeb	2 kg/ha
	Cobre		
Herbicidas	Goal	Oxifluorfen Linuron 500	0.5-0.75 L/ha
	Linurex	g/L SC	0.5-0.75 L/ha
	Doxon	Oxadiazon	0.75 L/ha
Insecticidas	Movento	Spirotetramat	600 mL/ha
	Zenith	Lambdacialotrina	15-20 mL /100 L de agua

4.5 NIVELES DE NITRÓGENO

Los tratamientos de nitrógeno se definieron a partir del dato de materia orgánica del análisis de suelo. Se estimó el aporte de nitrógeno del suelo a lo largo del ciclo del cultivo a partir del cálculo de mineralización. Para la estimación de la mineralización de la materia orgánica, teniendo en cuenta una densidad aparente de 1250 kg.m^{-3} , una profundidad de arraigamiento de 0,20 m se estimó el volumen de 2.500.000 de kg de suelo ha^{-1} . El análisis de suelo determinó un contenido de materia orgánica del 4,08 %, lo que llevó a una estimación de 102000 kg de materia orgánica. ha^{-1} . Suponiendo que el 58% de la materia orgánica es C y que existe una relación C/N de 10/1, la cantidad de N en el suelo que se calculó fue de 5916 kg de N ha^{-1} . Asumiendo que se mineraliza el 2,5% anualmente ($177,48 \text{ kg de N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), se calculó el aporte de nitrógeno mineralizado para 5 meses desde el trasplante a cosecha, el cual fue de 61,625 kg de N ha^{-1} .

Los requerimientos se calcularon para un rendimiento de 30000 kg/ha. Con los datos de aporte del suelo y de requerimientos de nitrógeno se definieron tres niveles de nitrógeno. Los tratamientos de nitrógeno siguieron los siguientes criterios:

1. Cubrir el 100% del requerimiento estimado del cultivo, fraccionado en cuatro momentos desde trasplante a inicio de bulbificación (a partir de ahora este tratamiento se le denominará N1).
2. Restrictiva. Sólo disponible el nitrógeno que aporte el suelo, más el 50% de lo que se aplique en el tratamiento 1 (a partir de ahora este tratamiento se le denominará N0)
3. Excesiva. Aplicar el doble que lo que se calcule en el tratamiento N1 (a partir de ahora este tratamiento se le denominará N2).

Las fertilizaciones se fraccionaron en cuatro momentos de aplicación: 27, 40, 54 y 68 días post trasplante. El requerimiento de un cultivo de 30000 kg/ha es de 117 kg de N/ha (Ciampitti & García, 2007), por lo que se debe aportar 56 kg de N/ha para todo el ciclo para un suelo de 4,08% de materia orgánica. Los demás nutrientes se buscaron que no fueran limitantes por lo que se cubrió la totalidad de sus requerimientos.

4.6 DISEÑO EXPERIMENTAL Y MEDICIONES

El diseño experimental utilizado fue un diseño en bloques completos al azar con tres repeticiones, arreglo factorial. Seis tratamientos fueron evaluados, producto de la combinación de tres niveles de nitrógeno y dos cultivares. Cada unidad experimental estuvo formada por dos canteros, en uno se realizaron muestreos destructivos para evaluar el contenido de N y el crecimiento durante el ciclo, y en el otro se realizaron las mediciones de rendimiento a la cosecha. Cada cantero estuvo compuesto por 4 filas de 100 plantas dispuestas en un largo de 10 m y 1,60 m de ancho.

En el cuadro 3 se puede observar la distribución espacial de las unidades experimentales en el área dónde se trabajó. Se observan los 3 bloques, cada uno de ellos está dividido en 6 unidades experimentales correspondientes a las combinaciones de los tratamientos evaluados.

Cuadro 3*Esquema de la distribución de las unidades en el área del experimento*

Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3
BORDE		
Pantanosos N0 a Pantanosos N0 b	Armonía N0 a Armonía N0 b	Pantanosos N2 a Pantanosos N2 b
Armonía N1 a Armonía N1 b	Armonía N2 a Armonía N2 b	Armonía N0 a Armonía N0 b
Armonía N2 a Armonía N2 b	Pantanosos N1 a Pantanosos N1 b	Pantanosos N1 a Pantanosos N1 b
Pantanosos N2 a Pantanosos N2 b	Pantanosos N2 a Pantanosos N2 b	Armonía N1 a Armonía N1 b
Pantanosos N1 a Pantanosos N1 b	Armonía N1 a Armonía N1 b	Pantanosos N0 a Pantanosos N0 b
Armonía N0 a Armonía N0 b	Pantanosos N0 a Pantanosos N0 b	Armonía N2 a Armonía N2 b
BORDE		

4.7 RECOLECCIÓN DE LAS MUESTRAS

Los muestreos para análisis de savia (contenido de N) y muestreo destructivo para evaluación periódica del crecimiento se realizaron de forma quincenal, recolectando 10 plantas por unidad experimental: 5 para el análisis de savia y 5 para el muestreo destructivo. Las plantas seleccionadas se encontraban en condiciones de competencia perfecta, siendo el punto de muestreo una planta posterior a la última retirada previamente.

Las recolecciones de muestras para el análisis de savia iniciaron 13 días post trasplante (17 de agosto), mientras que para el muestreo destructivo comenzaron 6 días post trasplante. Ambos muestreos finalizaron en cosecha (123 días post trasplante) (Cuadro 4).

La primera recolección de muestras de análisis de savia y muestreo destructivo fueron para realizar una caracterización de los plantines de ambas variedades utilizados para el trasplante.

Cuadro 4

Programación de la toma de muestras

Fecha de análisis de savia	Días desde el trasplante	Fecha de muestreo destructivo	Días de trasplante
—	0	4/8/2022	0
17/8/2022	13	10/8/2022	6
31/8/2022	27	—	
14/9/2022	40	14/9/2022	40
28/9/2022	54	28/9/2022	54
12/10/2022	68	12/10/2022	68
26/10/2022	82	24/10/2022	80
9/11/2022	95	9/11/2022	95
23/11/2022	109	23/11/2022	109
7/12/2022	123	7/12/2022	123

4.8 ANÁLISIS EN LABORATORIO

Después de cada recolección, las muestras fueron llevadas al laboratorio en dónde se realizaron los análisis. Previo al análisis de nitrato en savia y muestreo destructivo se lavaron las plantas y se dividieron en dos grupos de 5 plantas. Un grupo fue utilizado para el muestreo destructivo y el otro para el análisis de savia.

4.8.1 Muestreo destructivo

Para cada una de las 5 plantas se les determinó:

- Peso fresco: total, del bulbo, del cuello, de las raíces y hojas.
- Índice de bulbificación: diámetro del bulbo/diámetro del cuello.
- Materia seca: del tallo, del bulbo, raíz y hojas.
- Índice de área foliar.

El área foliar por planta se estimó a partir de la relación entre el peso de una superficie de hoja y el peso total de hojas:

$$\text{Índice de área foliar (cm}^2\text{)} = (\text{AHC (cm}^2\text{)} * \text{PHT (g)}) / \text{PAHC (g)}$$

AHC: área de hoja conocida (cm²)

PHT: peso de hojas totales (g)

PAHC: peso de área de hoja conocida (g)

Finalmente, para ajustar la fórmula del índice de área foliar en función de la densidad de plantas por metro cuadrado de suelo, es necesario convertir los cm² a m². Para obtener el índice de área foliar por unidad de superficie de suelo, se debe considerar la densidad de plantas por metro cuadrado:

$$\text{Área foliar (m}^2\text{ hoja / m}^2\text{ suelo)} = \text{Área foliar (cm}^2\text{)} * (1/10000) * D$$

D: densidad de plantas/m² de suelo

4.8.2 Análisis de savia

Se conformaron muestras de las 5 plantas para determinar la cantidad de nitrato de los diferentes órganos: raíz, tallo/bulbo y hojas. Las hojas muestreadas fueron las dos más jóvenes completamente desarrolladas.

Para cada uno de los órganos muestreados se fue ajustando la metodología de extracción de savia. En el caso de las raíces, primero se lavaban con abundante agua para eliminar los restos de suelo. Una vez limpias, se machacaban en un mortero y luego se exprimía la pasta resultante en una prensa de ajo con papel de filtro en la base. El papel de filtro ayudó a eliminar residuos vegetales en el extracto que se utilizó para medir. A medida que avanzó el desarrollo del cultivo y se obtuvo mayor volumen de raíces por planta la extracción de jugo se realizó prensando las raíces limpias directamente en la prensa de ajo con papel de filtro. En el caso de las hojas, tallo y bulbo, la extracción de savia se realizó directamente con la prensa de ajo.

La savia resultante de los diferentes órganos se analizó con electrodo selectivo de ion nitrato LAQUAtwin NO₃⁻, marca HORIBA. El sensor LAQUAtwin se calibró al inicio del muestreo y cada 10 mediciones con dos soluciones ajustadas provistas por el fabricante (150 y 2000 mg/kg). En el sensor se colocaron las extracciones de savia de cada planta hasta cubrirlo completamente, todos los datos se registraron en una planilla electrónica.

4.8.3 Análisis de planta o tejido vegetal

Se tomó una muestra de cada órgano de las 5 plantas del muestreo destructivo. Se midió materia seca y se llevaron al laboratorio de suelos de la Facultad de Agronomía para analizar el contenido de nitratos y % de N en cada órgano muestreado.

La técnica utilizada para el análisis de nitratos en plantas fue mediante electrodo. Los reactivos empleados en este análisis incluyeron agua desionizada y una solución buffer, cuya finalidad era regular la fuerza iónica y eliminar interferencias.

La técnica consistió en pesar 0,100 g de tejido vegetal seco y molido bien fino (con el fin de disminuir los errores) para colocarlos en tubos Falcon de 50 ml. Se le agregó 20 ml de agua desionizada y se agitó durante 30 minutos a 200-220 golpes por minuto para luego filtrar su contenido con filtro N°2. Se pipetearon 10 ml del filtrado con pipeta aforada y se colocó en otro vaso de plástico. Se le agregó 10 ml de solución buffer al vaso mediante dispensador, agitando lentamente por rotación para homogeneizar el contenido. Cada día de muestreo se realizó una escala con concentraciones conocidas de N-NO_3^- 1, 4, 10 y 20 ppm de N-NO_3^- . De cada una de esas soluciones de concentración conocida se pipeteó 10 ml, colocándolos en diferentes vasos para luego agregar a cada uno de ellos 10 ml de buffer al igual que las muestras.

Para las lecturas de la escala y las muestras se agitó el vaso por rotación, con previo enjuague del electrodo antes de sumergir en la solución siguiente. Como está diluido 200 veces, el punto de escala de 1 ppm corresponde a 200 ppm en planta, el de 2 a 400 y así sucesivamente, por lo cual está cubierto un muy amplio rango de concentraciones.

El análisis de % de N para cada órgano muestreado se realizó en el laboratorio de suelos de la Facultad de Agronomía. Se midieron 0,01 gramos de tejido vegetal seco y molido bien fino de cada muestra, las mismas se colocaron en celdas de estaño para luego introducirlas a un analizador elemental de nitrógeno y carbono, el cual funciona a partir de una combustión en seco. Una vez introducidas se incinera a 900 °C. Se agrega oxígeno de alta pureza para realizar una buena combustión y helio para trasladar los desechos de la combustión. En dicha combustión ocurren diversas reacciones de óxido-reducción donde finalmente se computan las cantidades de nitrógeno y carbono como concentración que luego es corregido por el peso de cada muestra dando como resultado %N.

4.9 DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO

La cosecha del cultivo se realizó el 9 de diciembre en las parcelas donde no se retiraron plantas para los muestreos (densidad de plantas imperturbada). La decisión de cosecha se tomó cuándo el cultivo había alcanzado un 50% de vuelco.

Las cebollas permanecieron en el campo en gavillas curándose, asegurando un buen cerrado de cuello y evitando el quemado de sol para una buena conservación postcosecha. El 21 de diciembre se colocaron las cebollas en cajones y se almacenaron en el galpón techado, ventilado, logrando una baja humedad con temperaturas medias para que siga el proceso de secado.

El rendimiento se determinó 46 días después del ingreso de las cebollas a galpón (el 7 de febrero). Los bulbos de cada tratamiento y bloque fueron descolados y clasificados según tamaño de bulbo. Todas las cebollas separadas por categoría de calibre fueron contadas y se pesaron utilizando balanza digital. La clasificación utilizada fue por el diámetro de los bulbos, en las siguientes categorías: < 4cm, 4-5 cm, 5-7 cm, 7-9 cm y > 9 cm. Al mismo tiempo se cuantificaron los descartes. Los descartes fueron clasificados según motivo: bulbos con pudrición bacteriana, con brotación, bulbos dobles, quemados por el sol, presencia de fusarium, calibre < 4 cm. Los rendimientos calculados fueron rendimiento total, rendimiento comercial, descartes, peso promedio de bulbos totales y peso promedio de bulbos comerciales (Cuadro 9).

4.10 DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL USO DEL NITRÓGENO

Para determinar la eficiencia del uso del nitrógeno, se calculó el incremento del rendimiento comercial por kilogramo de nitrógeno aplicado. Se comparó al testigo (tratamiento N0) con cada tratamiento fertilizado (tratamientos N1 y N2).

La eficiencia se estimó mediante la fórmula:

$$EUN \% = \frac{Rend\ Com_{Trat\ evaluado} [kg \cdot ha^{-1}] - Rend\ Com_{Trat\ Control} [kg \cdot ha^{-1}]}{N\ aplicado [kg \cdot ha^{-1}]}$$

Esta metodología permite cuantificar cuántos kilogramos de rendimiento adicional se obtienen por cada kilogramo de nitrógeno aportado al sistema, brindando una medida práctica para comparar la respuesta de los cultivares y tratamientos evaluados.

4.11 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico fue realizado con el software InfoStat, Rstudio y el programa estadístico SPSS (Statistical Package for the Social Sciences).

4.11.1 Verificación de supuestos de normalidad y homogeneidad de las varianzas

Con la prueba de Shapiro-Wilk se verificó si las variables estudiadas pertenecían a una población con distribución normal. Las hipótesis estadísticas que se probaron fueron las siguientes:

Ho = las variables estudiadas provienen de una población con distribución normal

Ha = las variables estudiadas no provienen de una población con distribución normal

El criterio de decisión fue si p-valor de la prueba de Shapiro-Wilk es menor a 0.05, se rechaza Ho con 95 % de probabilidad de cometer error de tipo 1.

En el cuadro 5 se puede observar que algunas de las variables cumplieron con el supuesto de normalidad de los residuos, mientras que otras no cumplen con dicho supuesto.

Cuadro 5

Supuestos de normalidad para los muestreos de NO₃⁻ en savia y NO₃⁻ en laboratorio

Variables	Muestreos				
	1	2	3	4	5
NO ₃ ⁻ savia	<u>0.22</u>	0.03	0.03	<u>0.05</u>	<u>0.75</u>
NO ₃ ⁻ laboratorio	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01

La variable NO₃⁻ savia para los muestreos 1, 4 y 5 cumplen con el supuesto de normalidad ya que presentaron p-valor > 0.05, por lo tanto, provienen de una población con características de distribución normal. Por el contrario, la variable NO₃⁻ laboratorio para todos los muestreos y la variable NO₃⁻ savia para los muestreos 2 y 3 no cumplen con el supuesto de normalidad (p-valor < 0.05).

4.11.2 Modelos estadísticos

Para el análisis de nitrato foliar (concentración) y nitrato en savia se usó el análisis de medidas repetidas en el tiempo, ya que se realizaron 5 mediciones en el tiempo de las mismas variables (concentración de nitrato foliar y concentración de nitrato

en savia). También se consideró un error de muestreo, ya que se puede estimar el error experimental en base a las repeticiones de cada variable en cada momento de evaluación. El modelo estadístico utilizado corresponde a:

$$Y(ijk) = \mu + N_i + M_j + (NT)_{ij} + \beta_k + \epsilon(ijk) + \delta l(ijk)$$

$Y(ijk)$ = Variable observable N = Nitrógeno (NT) = Interacción $N \times T$

β = bloque M = Muestreo δ = Error de muestreo

μ = media general ϵ = Error experimental

$i = 1-3$ $j = 1-5$ $k = 1-2$

En cuanto al análisis del índice área foliar y rendimiento el modelo estadístico que se usó fue el de diseño en bloques completos al azar, pero con la sumatoria de un error de muestreo, ya que tanto para variables no se midió en toda la unidad experimental. El modelo estadístico para el índice del área foliar fue el siguiente:

$$Y(ijk) = \mu + N_i + \beta_j + \epsilon(ij) + \delta k(ij)$$

$Y(ijk)$ = Variable observable N = Nitrógeno

β = bloque δ = Error de muestreo

μ = media general ϵ = Error experimental

$i = 1-3$ $j = 1-3$ $k = 1-10$

El modelo estadístico para rendimiento fue el siguiente:

$$Y(ijk) = \mu + N_i + \beta_j + \epsilon(ij) + \delta k(ij)$$

$Y(ijk)$ = Variable observable μ = media general

N = Nitrógeno β = bloque

ϵ = Error experimental δk = Error de muestreo

$i = 1-3$ $j = 1-3$ $k = 1-10$

El modelo estadístico utilizado para describir la estructura de la población fue un modelo no paramétrico o exploratorio llamado Non-metric Multidimensional Scaling

(NMDS). El stress value del modelo es menor a 0,2 por lo que el modelo puede usarse ya que se ajusta bien a los datos.

Las hipótesis estadísticas que se probaron fueron las siguientes:

Ho = todos los grupos de la población son iguales

Ha = existe al menos un grupo diferente

El criterio de decisión fue si el p-valor es menor a 0.05, se rechaza Ho asumiendo un nivel de significancia de 5 %.

El nivel de nitrógeno usado en los diferentes tratamientos tuvo un $r^2 = 0,2969$ y un p-valor de 0,001. Por lo que se rechaza Ho ya que existe una evidencia significativa de que los diferentes niveles de nitrógeno se relacionan con la estructura de la población representada con el NMDS, es decir, existe al menos un grupo diferente.

Las comparaciones de medias entre tratamientos fueron realizadas con la prueba de Tukey con nivel de significancia del 0.1%.

4.11.3 Correlaciones y regresiones

Se estudió la correlación lineal de Spearman para todas las variables, tanto las que cumplieron con el supuesto de normalidad, pero no de homogeneidad y las que sí cumplieron con la homogeneidad de las varianzas. La interpretación de la magnitud de las correlaciones se realizó siguiendo criterios habitualmente utilizados en estadística aplicada, considerando correlaciones superiores a 0,70 como altas, valores entre 0,30 y 0,70 como moderadas, y valores inferiores a 0,30 como bajas (Laguna, 2014).

4.11.4 Estructura de la comunidad

Para evaluar las relaciones entre las muestras y explorar la estructura de la población, se realizó un análisis de escalamiento multidimensional no métrico (NMDS) utilizando la distancia de Bray-Curtis como medidas de similitud. El análisis se ejecutó con múltiples interacciones para optimizar el valor de stress.

El valor de stress fue utilizado como indicador de la calidad del ajuste del modelo, considerándose aceptable cuando fue inferior a 0,2.

Las coordenadas generadas por el NMDS muestran cómo las muestras se agrupan o se dispersan en el espacio multivariado, evidenciando patrones en la comunidad en respuesta a las variables de interés. Las muestras que aparecen más

cercanas en el gráfico presentan una mayor similitud en la composición de sus especies, mientras que aquellas más alejadas muestran diferencias significativas en su estructura.

4.11.5 Análisis en la composición de las comunidades entre los diferentes grupos

Con el fin de determinar si existían diferencias significativas en la composición de las comunidades entre los diferentes grupos definidos por el tratamiento de nitrógeno (N), se realizó un análisis de varianza permutacional (PERMANOVA) utilizando la función adonis.

5. RESULTADOS

5.1 EFECTO DE LOS NIVELES DE NITRÓGENO Y LAS VARIEDADES EN EL ÍNDICE DE BULBIFICACIÓN A LOS 95 DÍAS

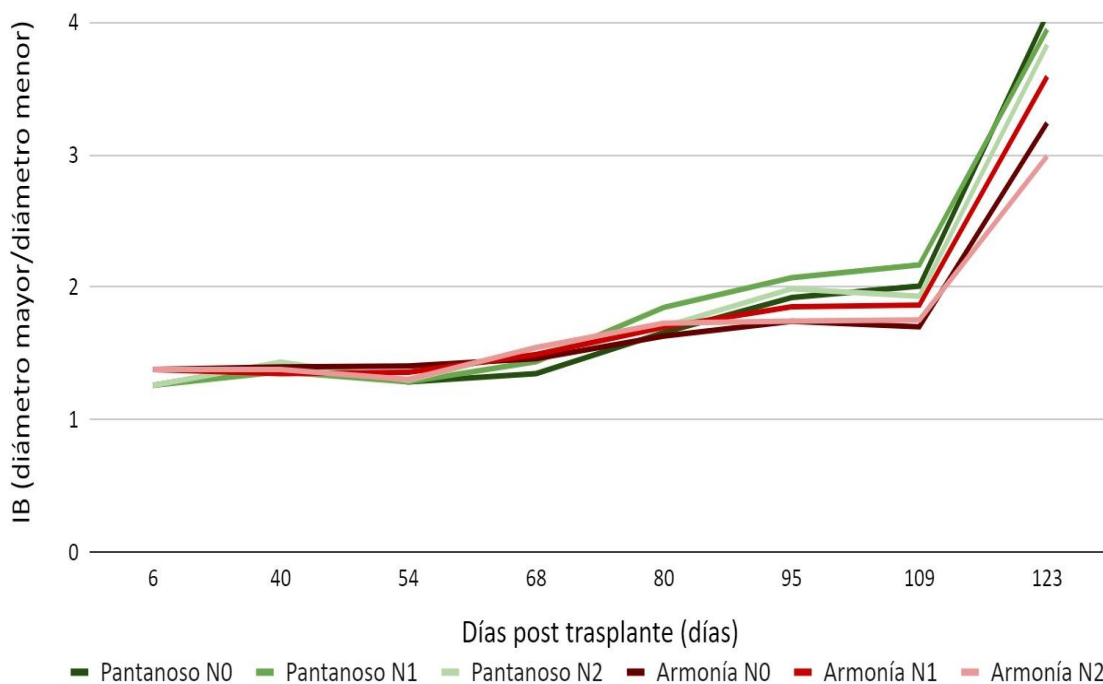
En la figura 3 se observa la evolución del índice de bulbificación según variedad y niveles de nitrógeno. La evolución del índice de bulbificación hasta los 95 es similar para ambas variedades y los diferentes niveles de nitrógeno.

El índice de bulbificación (IB) a los 95 días mostró diferencias significativas según variedad (ver cuadro 6). La variedad Pantanoso presentó el mayor valor promedio de IB (2,00), superando significativamente a Armonía (1,78). Con relación a los niveles de fertilización nitrogenada, no se observaron diferencias significativas. (ver cuadro 7).

Cuando se analizó la interacción entre variedad y nivel de nitrógeno, se destacó que el mayor valor de IB correspondió a la combinación Pantanoso N2 (2,07), mientras que el menor valor fue observado en Armonía N0 (1,74). Las diferencias entre tratamientos no fueron significativas para medias que compartían una misma letra, de acuerdo al test de Tukey con un nivel de significancia del 10% ($p > 0.05$) (ver cuadro 8).

Figura 3

Evolución del índice de bulbificación según variedad y niveles de nitrógeno



Cuadro 6

Test de Tukey para índice de bulbificación según variedad a los 95 días post trasplante

Test de tukey según variedad (Alfa=0.05; DMS=0.10508)				
Variedad	Medias	n	E.E.	
Armonía	1,78	9	0,04	a
Pantanoso	2,00	9	0,04	b

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Cuadro 7

Test de Tukey para índice de bulbificación según nivel de nitrógeno a los 95 días post trasplante

Test de tukey según tratamiento (Alfa=0.05; DMS=0.22228)				
Tratamientos N	Medias	n	E.E.	
N0	1,83	6	0,06	a
N1	1,96	6	0,06	a
N2	1,87	6	0,06	a

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Cuadro 8

Test de Tukey para índice de bulbificación según interacción variedad y nivel de nitrógeno a los 95 días post trasplante

Test de tukey de interacción variedad y nivel de nitrógeno (Alfa=0.05; DMS=0.27372)					
Nitrógeno	Variedad	Medias	n	E.E.	
N0	Armonía	1,74	3	0,06	a
N1	Armonía	1,85	3	0,06	a
N2	Armonía	1,75	3	0,06	ab
N0	Pantanoso	1,92	3	0,06	ab
N1	Pantanoso	2,07	3	0,06	b
N2	Pantanoso	1,99	3	0,06	ab

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

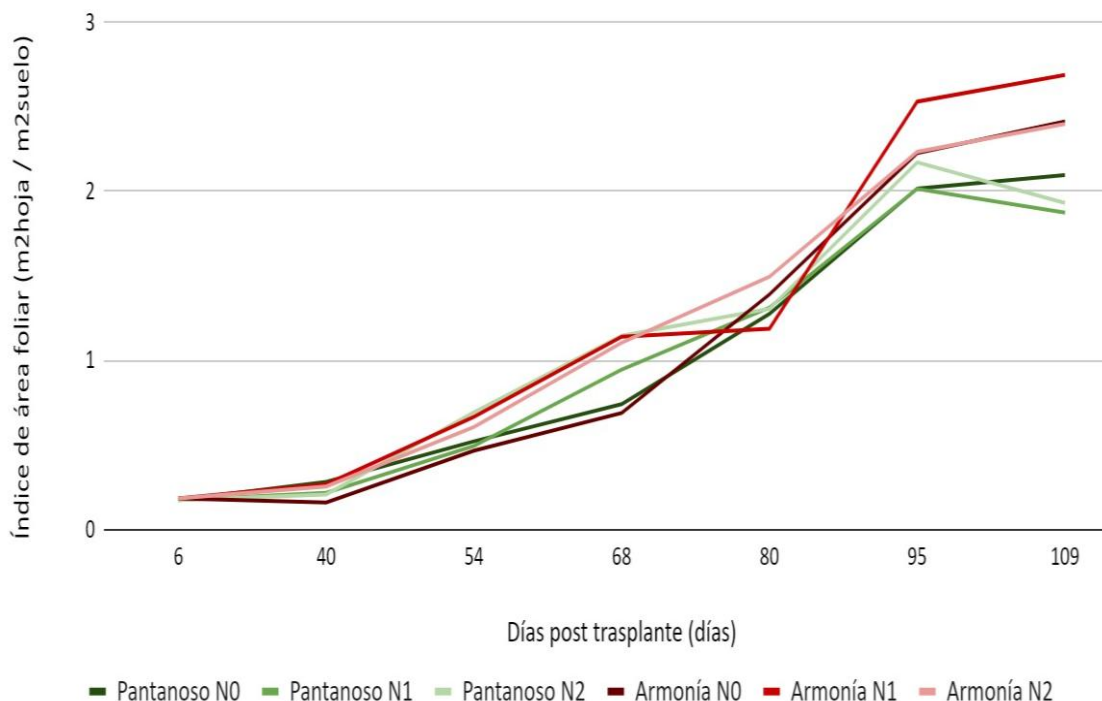
5.2 EFECTO DE LOS NIVELES DE NITRÓGENO Y LAS VARIEDADES EN LA EVOLUCIÓN DEL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR

El índice de área foliar (IAF) fue evaluado para todas las fechas en la que se realizaron muestreos destructivos (6, 40, 54, 68, 80, 95, 109, 123 días post trasplante). Para el análisis de resultados tomamos los días 68 y 95 postrasplante. El estudio de los resultados en estos dos momentos fue considerando las variedades y los niveles de nitrógeno aplicados. En la figura 4 se observa la evolución del IAF según variedad y niveles de nitrógeno.

A los 68 días, la variedad Pantanoso presentó un IAF promedio de 0,94, mientras que Armonía obtuvo un valor de 0,98, similar a Pantanoso, sin diferencias significativas entre ambas variedades ($p > 0.1$). En cuanto a los niveles de nitrógeno, se observaron diferencias significativas ($p \leq 0.1$): el tratamiento con N2 alcanzó el valor más alto (1,12), seguido por N1 con 1,04, ambos significativamente mayores que el tratamiento N0, que registró un IAF de 0,71.

Figura 4

Evolución del índice del área foliar (IAF) según variedad y niveles de nitrógeno



A los 95 días, no se encontraron diferencias significativas entre las variedades. Armonía alcanzó un IAF promedio de 2,33, mientras que Pantanoso registró un valor de 2,07 ($p > 0.1$). En cuanto a los niveles de nitrógeno, los valores promedio oscilaron entre

2,12 (N0) y 2,27 (N2), sin diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p > 0,1$).

5.3 EFECTO DE LOS NIVELES DE NITRÓGENO Y LAS VARIEDADES EN EL RENDIMIENTO

En el cuadro 9 se presenta el rendimiento total (kg/ha), rendimiento comercial, descartes totales (kg/ha), peso promedio de bulbos totales y peso promedio de bulbos comerciales para ambas variedades y los diferentes niveles de nitrógeno.

En el análisis del rendimiento total de las variedades de cebolla evaluadas, Pantanoso y Armonía, mostraron valores de rendimiento total similares, sin diferencias significativas (19080 kg/ha y 19075 kg/ha, respectivamente). En cuanto al rendimiento comercial, Armonía registró un promedio más alto (15068 kg/ha) en comparación con Pantanoso (14910 kg/ha) aunque sin diferencias significativas según el test de Tukey (p -valor > 0.1).

Cuadro 9

Rendimientos comerciales, descartes, peso promedio de bulbos totales (PPBT) y de bulbos comerciales (PPBC)

TRATAMIENTO	Rendimiento total (kg/ha)	Rendimiento comercial (kg/ha)	Descartes (kg/ha)	PPBT (gramos)	PPBC (gramos)
Armonía N0	18597	14699	3898	107	115
Armonía N1	18508	14856	3652	101	113
Armonía N2	20121	15650	4471	105	113
Pantanoso N0	18746	15021	3725	119	140
Pantanoso N1	18242	14496	3746	121	132
Pantanoso N2	20254	15214	5040	123	143

Cuadro 10*Test de Tukey según variedad para rendimiento total*

Test de Tukey según variedad (Alfa=0.05; DMS=2221.44282)				
Variedad	Medias	n	E.E.	
Armonía	19075	9	741	a
Pantanoso	19081	9	741	a

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Cuadro 11*Test de Tukey según tratamiento para rendimiento total*

Test de Tukey según tratamiento (Alfa=0.05; DMS=3186.38218)				
Nivel de N	Medias	n	E.E.	
N0	18671	6	867	a
N1	18375	6	867	a
N2	20187	6	867	a

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Con respecto a los niveles de nitrógeno, el tratamiento N2 tuvo el mayor rendimiento total (20187 kg/ha), seguido por N0 y N1, aunque sin diferencias estadísticas significativas. En el rendimiento comercial, N2 presentó el valor más alto (15432 kg/ha), mientras que N1 tuvo el menor rendimiento (14675 kg/ha).

Cuadro 12*Test de Tukey de la interacción variedad y nivel de nitrógeno para rendimientos totales*

Test de tukey de interacción variedad y nivel de nitrógeno (Alfa=0.05; DMS=6507.03740)					
Nivel de N	Variedad	Medias	n	E.E.	
N0	Armonía	18597	3	1370	a
N1	Armonía	18508	3	1370	a
N2	Armonía	20121	3	1370	a
N0	Pantanoso	18746	3	1370	a
N1	Pantanoso	18242	3	1370	a
N2	Pantanoso	20254	3	1370	a

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Cuadro 13*Test de tukey según variedad para rendimiento comerciales*

Test de tukey según variedad (Alfa=0.05; DMS=3987.29159)				
Variedad	Medias	n	E.E.	
Armonía	15068	9	1330	a
Pantanoso	14910	9	1330	a

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Cuadro 14*Test de tukey según tratamiento para rendimientos comerciales*

Test de tukey según tratamiento (Alfa=0.05; DMS=6136.71271)				
Nivel de N	Medias	n	E.E.	
N0	14860	6	1671	a
N1	14676	6	1671	a
N2	15432	6	1671	a

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Cuadro 15*Test de tukey de la interacción variedad y nivel de nitrógeno para rendimientos comerciales*

Test de tukey de interacción variedad y nivel de nitrógeno (Alfa=0.05; DMS=11706.69557)					
Nivel de N	Variedad	Medias	n	E.E.	
N0	Armonía	14699	3	2464	a
N1	Armonía	14856	3	2464	a
N2	Armonía	15650	3	2464	a
N0	Pantanoso	15021	3	2464	a
N1	Pantanoso	14496	3	2464	a
N2	Pantanoso	15214	3	2464	a

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

5.4 RELACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS DE ANÁLISIS DE NO_3^- EN RAÍZ, BULBO, TALLO Y HOJA

5.4.1 Relación entre el NO_3^- foliar y la concentración de NO_3^- en la savia de las hojas

No se observó una correlación significativa entre las mediciones de NO_3^- obtenidas con el dispositivo Laquatwin y los valores de porcentaje de nitrógeno total determinados en laboratorio. Los coeficientes de correlación fueron bajos y los p-valores fueron mayores a 0,10, lo que indica que la correlación no es estadísticamente significativa. Este comportamiento observado con bajos coeficientes de correlación se mantuvo constante al analizar los datos por variedad, tratamiento N y en fechas específicas. No obstante, se detectaron algunas correlaciones de interés entre las mediciones de NO_3^- en Laquatwin y las de NO_3^- en laboratorio.

Las variables estudiadas no cumplieron con el supuesto de normalidad por lo que utilizamos el coeficiente de correlación de Spearman. Para el promedio de todos los tratamientos y las dos variedades de cebolla, la concentración de nitrato en savia estuvo correlacionada positivamente con la concentración de nitrato foliar (coeficiente de Spearman=0,394, p-valor<0,01).

En el cuadro 16 se presenta la correlación entre las concentraciones de nitrato medidas con el dispositivo LaquaTwin y los análisis realizados en laboratorio, desglosadas por momento de muestreo, variedad y niveles de nitrógeno. Se incluyen las correlaciones de Spearman.

En el día 54, se observó una correlación alta, positiva y significativa (Spearman = 0,715, $p = 0,001$) entre las mediciones de nitrato en el dispositivo LaquaTwin y en laboratorio para las variedades Armonía y Pantanoso en conjunto. Resultados similares se encontraron para la variedad Pantanoso (Spearman = 0,55, $p = 0,0001$).

Además, en el intervalo de 40 a 54 días, se identificaron correlaciones significativas para ambas variedades: Pantanoso (Spearman = 0,604, $p = 0,0001$) y Armonía (Spearman = 0,666, $p = 0,0001$), así como para el análisis conjunto de las dos variedades (Spearman = 0,681, $p = 0,0001$).

En el rango de 27 a 95 días, que coincide con el período de desarrollo del IAF, también se observaron correlaciones significativas para las dos variedades juntas (Spearman = 0,394, $p = 0,0001$) y de forma individual para Pantanoso (Spearman = 0,55, $p = 0,0001$).

Al analizar los niveles de nitrógeno, sólo se encontró correlación significativa en Pantanoso con el nivel N1 (Spearman = 0,593, $p = 0,02$), mientras que en los demás niveles y para la variedad Armonía no se detectaron correlaciones significativas. Para el conjunto de ambas variedades con el nivel N1 se observó una correlación significativa (Spearman = 0,559, $p = 0,002$).

Cuadro 16

Coefficiente de correlación de Spearman en NO_3^- medido con LaquaTwin y NO_3^- Laboratorio por día y variedad

Momento de muestreo (ddt)	Tratamiento de nitrógeno	Pantanoso	n	Armonía	n	Ambas	n
27	Todos	0.400	9	0.259	9	0.157	18
54	Todos	0.550 *	44	0.274	43	0.715 *	18
40-54	Todos	0.604 *	18	0.666 *	18	0.681 *	36
27-95	Todos	0.550 *	44	0,274	43	0.394 *	87
Todos	N0	0.425	14	0.157	15	0.303	29
Todos	N1	0.593 *	15	0.267	13	0.559 *	28
Todos	N2	0.150	15	0.454	15	0.294	30

Nota. ddt: días desde el trasplante. N0 = nitrógeno agregado al 50% de los requerimientos del cultivo, N1 = nitrógeno agregado al 100% de los requerimientos del cultivo, N2 = nitrógeno agregado al 200 % de los requerimientos del cultivo. n: número de observaciones. *: correlación significativa, p -valor < 0.05.

5.4.2 Relación entre el NO_3^- , la concentración de NO_3^- en la savia y el % de N medido en laboratorio para raíz, bulbo y tallo

No se observó una correlación aceptable entre los métodos de análisis de nitratos para los muestreos de raíz, bulbo y tallo, mostrando una alta dispersión y baja relación con los contenidos reales de nitrógeno. Este comportamiento se mantuvo constante al analizar los datos por variedad, tratamiento, en fechas específicas tanto para raíz, bulbo y tallo. Es importante destacar que los valores se obtuvieron con los muestreos del día 27 al 95 ya que fue el momento en el que nos parecía relevante a nivel agronómico.

Cuadro 17

Coefficiente de correlación de Spearman entre % de N y nitrato en Pantanoso para raíz, bulbo y tallo

Nitrato LAQUAtwin	% de N en raíz	Nitrato en raíz	% de N en tallo	Nitrato en tallo	% de N en bulbo	Nitrato en bulbo
Coefficiente de correlación	-0,105	0,201	-0,086	0,418	-0,119	-0,143
Significación	0,609	0,335	0,675	0,034	0,779	0,736
N	26	25	26	26	8	8

Cuadro 18

Coefficiente de correlación de Spearman entre % de N y nitrato en Armonía para raíz, bulbo y tallo

Nitrato LAQUAtwin	% de N en raíz	Nitrato en raíz	% de N en tallo	Nitrato en tallo	% de N en bulbo	Nitrato en bulbo
Coefficiente de correlación	0,145	0,101	-0,056	-0,278	0,048	0,5
Significación	0,508	0,664	0,813	0,189	0,911	0,253
N	23	21	22	24	8	7

Si bien las correlaciones entre las mediciones de nitratos realizadas con el sensor LaquaTwin y los resultados de laboratorio permiten evaluar el grado de concordancia entre ambos métodos, se consideró pertinente presentar además los valores promedio absolutos obtenidos para cada tratamiento y variedad (ver Anexo C). La inclusión de estos resultados complementa el análisis de correlación, aportando una referencia cuantitativa sobre los niveles de nitratos en los distintos órganos de la planta a lo largo del período de muestreo, y constituyendo información relevante como antecedente para futuras investigaciones orientadas a evaluar el comportamiento de ambas variedades frente a los tratamientos de fertilización nitrogenada.

5.5 EFICIENCIA EN EL USO DEL NITRÓGENO

Al considerar que el tratamiento N0 se aplicó el 50% de lo requerido por el cultivo, se calcularon las EUN (kg de cebolla producidos/kg de N aplicado) como incremento de rendimiento comercial entre los tratamientos N0, N1 y N2.

Para el cultivar Armonía, el aumento de la dosis de 28 a 56 kg de N/ha (N0 a N1) resultó en una EUN de 5.6 kg de cebolla comercial/kg de N. El incremento de 28 a 112

kg de N/ha (N0 a N2) produjo una EUN de 11.3 kg de cebolla comercial/kg de N, mientras que el pasar de N1 a N2 implicó una EUN de 14.2 kg de cebolla comercial/kg de N.

En Pantanoso, estos valores de EUN fueron de -18.75 kg de cebolla comercial/kg de N (N0-N1), 2.3 kg de cebolla comercial/kg de N (N0-N2) y 12.8 kg de cebolla comercial/kg de N (N1-N2).

Cuadro 19

Resumen del cálculo de la eficiencia en el uso del nitrógeno

Tratamiento	Rendimiento comercial (kg/ha)	Dosis de N (kg/ha)	Comparación	EUN (kg cebolla/kg N)
Armonía N0	14699	28	N1-N0	5.6
Armonía N1	14856	56	N2-N0	11.3
Armonía N2	15650	112	N2-N1	14.2
Pantanoso N0	15021	28	N1-N0	-18.75
Pantanoso N1	14496	56	N2-N0	2.3
Pantanoso N2	15214	112	N2-N1	12.8

Nota. N0 = nitrógeno agregado al 50% de los requerimientos del cultivo, N1 = nitrógeno agregado al 100% de los requerimientos del cultivo, N2 = nitrógeno agregado al 200 % de los requerimientos del cultivo.

5.6 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LA POBLACIÓN

5.6.1 Análisis de Ordenación con NMDS

Se realizó un análisis de escalamiento multidimensional no métrico (NMDS) para evaluar la estructura de la población de datos. El valor de stress obtenido fue de 0.198 (Figura 5). Este valor, siendo menor a 0.2, indica que el ajuste es adecuado, lo que sugiere que la representación bidimensional del NMDS captura bien las relaciones de similitud entre las muestras, con una mínima distorsión de las distancias originales.

5.6.2 Evaluación de Ajuste mediante envfit

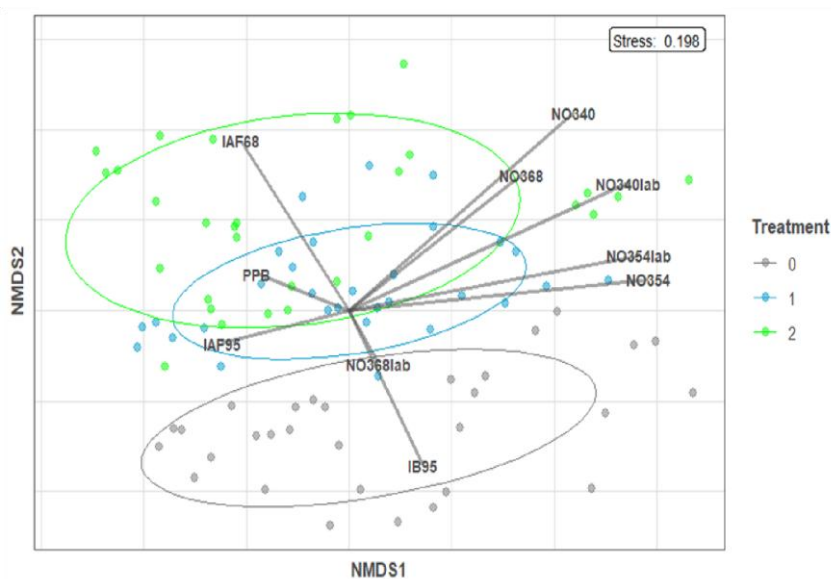
Para identificar los “factores ambientales” que explican la variación observada en la ordenación NMDS, se realizó un ajuste de “vectores ambientales” mediante la función envfit. Esta evaluación permitió visualizar la influencia de diversas variables sobre la estructura de la comunidad, tal como se observa en el cuadro 20.

Entre las variables evaluadas, la concentración de NO_3^- a los 40 días post trasplante (NO_3^-40) mostró una fuerte correlación con la ordenación NMDS ($r^2 = 0.7259$, $p = 0.001$), lo que sugiere que este factor ambiental tiene una alta capacidad explicativa sobre la variación de las comunidades en el espacio multivariado. De manera similar, NO_3^- a los 40 días post trasplante medido en el laboratorio ($\text{NO}_3^-40\text{lab}$) y NO_3^- a los 54 días post trasplante (NO_3^-54) también presentaron correlaciones significativas con los ejes NMDS, con r^2 de 0.7066 y 0.6540 respectivamente (ambos $p = 0.001$). Estos resultados indican que estos factores están estrechamente asociados con las diferencias observadas entre las muestras, sugiriendo la existencia de gradientes ambientales que influyen en la estructura de la comunidad.

En contraste, variables como la concentración de NO_3^- a los 68 días post trasplante medido en el laboratorio ($\text{NO}_3^-68\text{lab}$) presentaron una correlación baja y no significativa ($r^2 = 0.0319$, $p = 0.271$), lo que indica que su influencia sobre la estructura de la comunidad es mínima.

Figura 5

Representación bidimensional de la estructura poblacional mediante el análisis NMDS



Nota. 0= N0, nitrógeno agregado al 50% de los requerimientos del cultivo; 1= N1, nitrógeno agregado al 100% de los requerimientos del cultivo, 2= N2, nitrógeno agregado al 200 % de los requerimientos del cultivo. IAF 68= índice de área foliar a los 68 días; IAF 95: índice de área foliar a los 95 días; IB95= Índice de bulbificación a los 95 días; PPB= Peso promedio de bulbo; NO_3^- 40, NO_3^- 54, NO_3^- 68 = concentración de NO_3^- a los 40, 54, y 68 días midiendo con Laqua Twin respectivamente; NO_3^- 40 lab, NO_3^- 54 lab, NO_3^- 68 lab= concentración de NO_3^- a los 40, 54, y 68 días medidos en laboratorio respectivamente.

Cuadro 20

Resultados de la prueba envfit para las principales variables ambientales que influyen en la estructura de la población

Variable	NMDS 1	NMDS 2	r ²	P-valor
NO ₃ ⁻ 40 Laqua-Twin	0.7078	0.7064	0.7259	0.001
NO ₃ ⁻ 40 laboratorio	0.8876	0.4605	0.7066	0.001
NO ₃ ⁻ 54 Laqua-Twin	0.9930	0.1183	0.6540	0.001
NO ₃ ⁻ 68 laboratorio	0.4384	-0.8988	0.0319	0.271

La variable "cod" fue incluida en el análisis como un identificador de las muestras. Como se esperaba, esta variable no mostró una correlación significativa con la estructura multivariada de la comunidad. El valor de $r^2 = 0.2805$ indica que "cod" explica aproximadamente el 28% de la variación en la ordenación. Sin embargo, el valor de $\text{Pr}(> r) = 0.814$, que es considerablemente alto, indica que esta relación no es estadísticamente significativa. Esto sugiere que la variación explicada por "cod" podría haberse generado de manera aleatoria, lo que refuerza la expectativa de que el identificador de la muestra no tiene un efecto intrínseco sobre la estructura de la comunidad. La ausencia de significancia estadística es clave, ya que confirma que las diferencias observadas entre las muestras no están determinadas por el nombre o la identificación de las mismas, sino por otros "factores ambientales".

En contraste, la variable N, que representa el nivel de tratamiento aplicado (Nitrógeno), presentó una fuerte correlación con la ordenación NMDS. El valor de $r^2 = 0.2969$ indica que el 29.69% de la variación total en la comunidad está relacionada con los niveles de nitrógeno. A diferencia de la variable "cod", el valor de $\text{Pr}(> r) = 0.001$ fue muy bajo, lo que indica que la relación entre N y la estructura de la comunidad es significativa desde el punto de vista estadístico. Este resultado proporciona evidencia sólida de que el tratamiento con nitrógeno es un factor importante en la diferenciación de las comunidades.

El fuerte ajuste de la variable N sugiere la presencia de un gradiente ambiental que afecta la composición de las especies en las muestras. Es decir, las diferencias observadas en la estructura de la comunidad pueden estar atribuidas en gran medida al efecto de los distintos niveles de nitrógeno. El alto valor de significancia de N respalda la hipótesis de que las comunidades varían en función de los niveles de nitrógeno aplicados.

5.6.3 Análisis de Varianza Multivariante (adonis)

El análisis de varianza multivariante (adonis) mostró que el tratamiento N tiene un efecto significativo sobre la estructura de la comunidad ($F = 3.5638$, $p = 0.005$), explicando aproximadamente el 7.57% de la variación total (cuadro 21). Este resultado indica que las comunidades presentes en los diferentes niveles de tratamiento de N difieren significativamente en su composición.

Cuando se excluyeron los datos de rendimiento, el análisis mostró un incremento en la varianza explicada, confirmando que el tratamiento de nitrógeno tiene un impacto claro en la estructura de la comunidad. De esta forma, se concluye que los diferentes niveles de nitrógeno inducen cambios significativos en las comunidades, lo cual es coherente con las hipótesis planteadas.

Cuadro 21

Resultados del análisis PERMANOVA (adonis) para la variable N

Factor	Df	Suma de Cuadrados	r^2	F	P-valor
N	2	0.2431	0.0757	3.5638	0.005
Residual	87	2.9676	0.9243		

5.6.4 Análisis Completo del Gráfico NMDS

Las variables seleccionadas para la ordenación de los datos en el espacio se eligieron por su relevancia tanto en términos de la fisiología del cultivo como en relación a los tratamientos de nitrógeno evaluados. Por un lado, se incluyeron variables fisiológicas fundamentales, como el Índice de Área Foliar (IAF) y el Índice de Bulbificación (IB), debido a su relación directa con los procesos de crecimiento y desarrollo del cultivo de cebolla. Por otro lado, se consideraron variables relacionadas con la concentración de nitrato en planta (medida tanto con el dispositivo LaquaTwin como en laboratorio), ya que estas variables permiten evaluar el efecto de los tratamientos de nitrógeno aplicados.

En cuanto a las variables fisiológicas, IAF 68 (Índice de Área Foliar a los 68 días) fue seleccionada por representar el último momento en que el dispositivo LaquaTwin permite corregir el nitrato en planta. Por su parte, IB95 (Índice de Bulbificación a los 95 días) marca el inicio de la bulbificación. Estas variables destacan la importancia de momentos clave en el desarrollo del cultivo.

Las concentraciones de nitrato medidas a los 40, 54 y 68 días tanto con LaquaTwin como en laboratorio (NO_3^-40 , $\text{NO}_3^-40\text{lab}$, NO_3^-54 , $\text{NO}_3^-54\text{lab}$, NO_3^-68) son variables que tienen una relación directa entre los tratamientos aplicados y la acumulación de nitrato en las plantas. De esta manera, la combinación de variables fisiológicas y relacionadas con los tratamientos de nitrógeno permite interpretar la distribución de las muestras en el espacio y evaluar la respuesta del cultivo a las diferentes estrategias de manejo evaluadas.

En el cuadro 22 se puede observar que todas las variables estudiadas menos NO_3^- medido en laboratorio a los 68 días, tuvieron efecto significativo para la ordenación de los datos.

Cuadro 21

Efecto de variables estudiadas en la ordenación de los datos

Variables	r_2	P-valor
IAF 68 días	0,3512	0,001
IAF 95 días	0,1246	0,003
IB 95 días	0,2595	0,001
NO_3^- 40 días Laqua-Twin	0,7259	0,001
NO_3^- 40 días laboratorio	0,7066	0,001
NO_3^- 54 días Laqua-Twin	0,6540	0,001
NO_3^- 54 días laboratorio	0,6294	0,001
NO_3^- 68 días Laqua-Twin	0,3857	0,001
NO_3^- 68 días laboratorio	0,0319	0,271
Peso promedio bulbo	0,0739	0,036

En el gráfico NMDS se observa una representación bidimensional de las muestras organizadas en función de la similitud de las variables de respuesta medidas en los tratamientos aplicados (Figura 5). Los tratamientos, codificados en colores, se agrupan en tres elipses distintas: gris (N0), azul (N1) y verde (N2), lo cual indica una diferenciación en la respuesta de las plantas de cebolla a los diferentes niveles de nitrógeno suministrados en cada tratamiento. La distancia entre las elipses y la posición de los vectores de las variables permite analizar el peso e influencia de cada variable en la separación de las muestras.

5.6.5 Distribución de las Elipses por Tratamiento

Los puntos agrupados en la elipse gris representan N0 (Figura 5). Este grupo presenta una mayor dispersión a lo largo de la dimensión NMDS1, lo que sugiere que las muestras dentro de este tratamiento exhiben una variabilidad relativamente alta en las variables de respuesta. La orientación de la elipse, con una tendencia hacia la zona asociada a IB 95 (Índice de Bulbificación al día 95), indica que esta variable tiene una asociación más fuerte con las muestras de este tratamiento. Esto sugiere que en el tratamiento N0 las plantas alcanzan un nivel de bulbificación elevado en esta fecha específica. La dispersión a lo largo de NMDS1 sugiere variabilidad en las respuestas individuales, posiblemente debido a variaciones en el crecimiento vegetativo y el desarrollo de bulbos en condiciones de menor disponibilidad de nitrógeno.

El tratamiento N1, representado en azul, muestra una distribución de puntos más concentrada, indicando menor variabilidad interna en comparación con N0. Esta elipse está ubicada en la región central del gráfico y orientada en dirección de las variables IAF 68, IAF 95 y PPB, lo cual sugiere una asociación significativa de estas variables con las muestras de este tratamiento. La concentración de los puntos y la posición de esta elipse en relación con los vectores asociados al índice de área foliar y al peso promedio del bulbo indican que el tratamiento N1 favorece un crecimiento vegetativo consistente y una adecuada acumulación de biomasa en los bulbos. La cercanía entre puntos también sugiere que el impacto de este tratamiento en las variables de respuesta es más homogéneo que en N0.

En el caso del tratamiento N2, las muestras (representadas en verde) se encuentran asociadas principalmente a variables relacionadas con los niveles de nitrato, como NO_3^- 40, NO_3^- 68, NO_3^- 40 lab, NO_3^- 54 y NO_3^- 68 lab. La orientación de los vectores de estas variables hacia el área ocupada por la elipse verde indica una relación estrecha entre este tratamiento y los niveles de nitrato en las fechas de muestreo correspondientes. Este tratamiento exhibe también una mayor dispersión a lo largo de la dimensión NMDS2, lo cual sugiere una variabilidad moderada en la respuesta de las plantas en relación con la acumulación de nitrato. Esta distribución de puntos y la orientación de los vectores sugieren que las plantas en el tratamiento N2 acumulan cantidades más elevadas de nitrato en comparación con los otros tratamientos.

5.6.6 Interpretación de los vectores

Los vectores en el gráfico representan las distintas variables de respuesta, y su longitud y dirección brindan información sobre la influencia y asociación de cada variable con los tratamientos.

Los vectores asociados al índice de área foliar en los días 68 y 95 están orientados en dirección del tratamiento N1. La longitud de estos vectores sugiere que estas variables tienen un impacto considerable en la separación de este grupo respecto a los otros tratamientos. La orientación de IAF 68 e IAF 95 hacia el tratamiento N1 indica que las plantas bajo este tratamiento han alcanzado una expansión foliar más significativa, lo cual se traduce en una mayor área de hojas. Este crecimiento vegetativo en las fechas indicadas señala una respuesta favorable del tratamiento N1 en términos de desarrollo foliar, lo que contribuye a una mayor capacidad fotosintética en las plantas de este grupo.

El vector de PPB, orientado también hacia el tratamiento N1, sugiere que esta variable está positivamente asociada con las muestras de este tratamiento. La longitud de este vector indica una influencia moderada de esta variable en la diferenciación del grupo azul. La dirección del vector en relación con el tratamiento N1 sugiere que el peso promedio del bulbo es más alto en las plantas de este tratamiento en comparación con los otros. Esta tendencia refleja que N1 favorece una mayor acumulación de biomasa en los bulbos, probablemente debido a una combinación de un crecimiento vegetativo adecuado y un desarrollo eficiente del bulbo en este grupo.

Los vectores NO_3^- 40, NO_3^- 54, NO_3^- 68 y NO_3^- 40 lab se dirigen hacia el Tratamiento N2, lo cual indica una asociación marcada entre este grupo y los niveles de nitrato en las fechas de muestreo. La longitud de los vectores de NO_3^- 40, NO_3^- 54, NO_3^- 68 y NO_3^- 40 lab sugiere que los niveles de nitrato son variables con un alto grado de influencia en la separación del tratamiento N2 respecto a los demás tratamientos. La orientación de estos vectores hacia el N2 sugiere que las plantas en este grupo presentan niveles de nitrato más elevados en el tejido en comparación con las plantas de N0 y N1. Esta asociación es particularmente notoria en las fechas cercanas al día 40 y al día 68, en las cuales los niveles de nitrato son notablemente altos en las muestras de este tratamiento.

Los vectores correspondientes al índice de bulbificación al día 95 y NO_3^- 68 lab se orientan en dirección de la elipse correspondiente al tratamiento N0, lo cual sugiere una mayor asociación de estas variables con las muestras de este grupo. Aunque IB95

no evidenció diferencias significativas entre los niveles de nitrógeno de manera aislada, la asociación espacial observada en el NMDS indica que el IB95 contribuye en parte a la diferenciación estructural de las muestras, lo que destaca el valor complementario del enfoque multivariado para captar patrones que podrían no resultar estadísticamente significativos de forma aislada.

6. DISCUSIÓN

6.1 EFICIENCIA DEL MÉTODO RÁPIDO DE ANÁLISIS DE NITRATO EN SAVIA

El uso del medidor LAQUAtwin demostró ser una herramienta eficiente para el monitoreo del estado nutricional del cultivo. Su rapidez y bajo costo lo convierten en una alternativa viable frente a los análisis de laboratorio, especialmente en sistemas de producción intensiva donde se requieren decisiones agronómicas en tiempo real (Berrueta et al., 2022).

Los valores de nitrato obtenidos en savia mediante el dispositivo LAQUA Twin mostraron una correlación variable con los resultados de laboratorio, lo que concuerda con estudios previos sobre la aplicabilidad de estos sensores en cultivos hortícolas. Investigaciones realizadas por Hochmuth y Hanlon (2022) sugieren que los medidores portátiles pueden ofrecer una estimación confiable del estado nutricional de los cultivos, aunque su precisión puede verse afectada por la humedad del tejido y la temperatura ambiental. En el cultivo de cebolla, estudios como el de Geisseler et al. (2022) han demostrado que la absorción de nitrato en la planta puede variar significativamente en función del desarrollo fenológico y la temperatura, lo que podría explicar algunas discrepancias entre las mediciones.

Según los resultados obtenidos, el órgano que mejor se correlaciona es la hoja, lo que representa una ventaja práctica a la hora de muestrear, ya que es un órgano de fácil acceso, permite realizar muestreos sin eliminar plantas del cultivo. Estos resultados refuerzan la utilidad del medidor LAQUAtwin como indicador confiable del estado nutricional del cultivo de cebolla. En el caso específico de raíces, se presentaron dificultades adicionales. No fue posible extraer una cantidad suficiente de savia para realizar una medición confiable, a su vez, al tratarse de un órgano en contacto directo con el suelo, a pesar de realizar un lavado, es posible que las lecturas obtenidas se vieran influenciadas por el contenido de nitratos presentes en la solución del suelo adherida al tejido, generando valores equívocos.

Los resultados obtenidos muestran que el dispositivo portátil LaquaTwin puede ser una herramienta confiable para estimar el contenido de nitrato en savia durante cierta etapa del desarrollo del cultivo de cebolla, particularmente cuando se analizan ambas variedades en conjunto y previo al inicio de la bulbificación. La correlación alta y significativa encontrada en el día 54 entre las mediciones del LaquaTwin y los análisis de laboratorio respalda su utilidad como método alternativo, especialmente en condiciones donde se requiere un monitoreo rápido en campo. Según la ecuación de

regresión ($y = 2,3492x - 381,71$; $R^2 = 0,9984$. Ver Anexo A), es posible estimar de forma preliminar el contenido foliar de NO_3^- a partir de valores medidos con el equipo LaquaTwin. Así, concentraciones en savia de 300, 350 y 400 mgL^{-1} se corresponden aproximadamente con valores foliares de 315, 433 y 550 mg kg^{-1} , respectivamente. Cabe destacar que estas relaciones deben considerarse preliminares, válidas para las condiciones y momento de muestro analizados (54ddt).

En el intervalo entre los 40 y 54 días, si bien se observó una alta concordancia entre ambos métodos para la variedad Pantanoso y la variedad Armonía por separado, los coeficientes de determinación (R^2) obtenidos fueron relativamente bajos, lo que indica una mayor dispersión de los datos dentro de cada grupo varietal. En cambio, cuando se analizó ambas variedades en conjunto, se encontró una alta correlación y significativa entre ambos métodos de análisis. Teniendo en cuenta la ecuación de regresión ($y = 0,8357x + 144,26$; $R^2 = 0,8077$. Ver Anexo B), se pueden obtener valores preliminares para el momento de muestreo analizado. Concentraciones en savia de 250, 300 y 350 mgL^{-1} se corresponden aproximadamente con valores foliares de 350, 392 y 434 mg kg^{-1} , respectivamente. Este período podría ser clave para la toma de decisiones relacionadas con el manejo del nitrógeno, como la fertilización suplementaria o el ajuste de dosis. Este enfoque permite tomar decisiones de fertilización más oportunas y reducir tanto los costos asociados al uso de fertilizantes como el impacto ambiental por lixiviación de nitratos, en línea con lo reportado por Buajaila y Miles (2019) y Berrueta et al. (2022).

No obstante, se requiere la acumulación de una mayor cantidad de datos en cuanto a años y a días dentro de los intervalos, que incluyan tanto las concentraciones de nitrato en savia como los niveles de rendimiento, con el fin de establecer relaciones más confiables entre ambos factores. De esta forma, sería posible definir niveles críticos de nitrógeno que sirvan como referencia para el manejo nutricional del cultivo y para la toma de decisiones en campo.

6.2 RENDIMIENTO Y EFECTOS DEL AÑO AGRÍCOLA

La temperatura media y las precipitaciones del ciclo agrícola indicaron condiciones desafiantes para el cultivo de cebolla en 2022. Las temperaturas más altas de lo normal hacia el final del ciclo aceleraron la maduración (la temperatura media en octubre-noviembre-diciembre para el año 2022 fue de 19.5 °C, en cambio para el histórico desde 1972-2024 para los mismos meses es de 18.69 °C), mientras que las lluvias limitadas acentuaron el estrés hídrico. Según los registros agroclimáticos disponibles (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria [INIA], s.f.), para la sede

INIA Las Brujas las precipitaciones y temperatura media anual del año 2022 fueron de 713,3 mm y 16.4 °C, mientras que el histórico (desde 1972-2024) es de 1118,16 mm y 16.61°C. Este contexto climático refuerza la relevancia de adaptar las prácticas agronómicas al entorno para mitigar el impacto de las condiciones adversas.

El rendimiento de los cultivos es una variable compleja, influenciada por diversos factores como el clima, el suelo y las prácticas de manejo agrícola. La interacción de estos elementos determina significativamente la productividad final del cultivo (Sarmiento-Herrera et al., 2024). En el presente estudio, se evaluaron los cultivares de cebolla Pantanoso del Sauce CRS y Armonía CRS, ambos desarrollados en Uruguay para adaptarse a las condiciones agroecológicas locales. El cultivar Pantanoso del Sauce CRS ha sido objeto de diversas investigaciones que destacan su rendimiento y adaptación. Por ejemplo, estudios realizados en el INIA Las Brujas han establecido fechas óptimas para su siembra directa en el sur del país, considerando factores como la temperatura y la disponibilidad hídrica (Berrueta et al., 2017).

Durante el ciclo agrícola evaluado, la cosecha se realizó el 7 de diciembre, lo que implicó una reducción de 20 días en comparación con los ciclos normales del cultivo de cebolla para estos cultivares (Dogliotti et al., 2021). Esta reducción en los días de bulbificación limitó la formación completa de los bulbos, ya que el rendimiento de la cebolla es función de la tasa de asimilación neta (TAN) diaria y del período en días de bulbificación (Dogliotti et al., 2011).

La combinación de altas temperaturas y baja disponibilidad hídrica hacia el final del ciclo forzó una maduración acelerada. Esta situación implicó una reducción de la TAN y, en consecuencia, del rendimiento final, lo que destaca la importancia de una gestión eficiente del riego en años climáticamente adversos (Altieri Bequio et al., 2003). En ensayos realizados por el INIA, se ha observado que el cultivar Pantanoso del Sauce CRS presenta un buen rendimiento y adaptación a las condiciones locales, aunque su desempeño puede verse afectado por factores climáticos adversos, de temperaturas, agua, entre otros, dado por las diferentes fechas de siembra (Berrueta et al., 2017). Por otro lado, el cultivar Armonía presentó un rendimiento y comportamiento similar a Pantanoso del Sauce CRS (De los Santos, 2024).

6.3 MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO Y FERTILIZACIÓN NITROGENADA

El suelo del experimento, con un alto contenido de materia orgánica (4,08%), proporcionó un aporte significativo de nitrógeno a través de la mineralización, lo que permitió una respuesta adecuada del cultivo incluso en tratamientos restrictivos (N0). La

alta disponibilidad de materia orgánica en el suelo pudo haber reducido la respuesta a la fertilización nitrogenada en los tratamientos con dosis más altas, como lo han reportado Dogliotti et al. (2011). En suelos con altos contenidos de materia orgánica, la mineralización puede aportar cantidades significativas de nitrógeno, disminuyendo la necesidad de fertilización adicional y reduciendo el riesgo de lixiviación (Berrueta et al., 2022). Este hecho evidencia que en suelos ricos en materia orgánica, un manejo más conservador del nitrógeno puede ser suficiente para mantener rendimientos competitivos, reduciendo costos de fertilización y el riesgo de contaminación por lixiviación. Además, los tratamientos con mayores niveles de nitrógeno (N2) no resultaron en aumentos significativos de rendimiento, pero sí en una mayor incidencia de *Peronospora destructor* (Arias Pandolfo, Betancor, et al., 2024). Esto sugiere que el exceso de nitrógeno favorece condiciones para el desarrollo del patógeno sin traducirse en beneficios productivos, lo que refuerza la necesidad de ajustar las dosis de fertilización a las condiciones del suelo y del clima.

6.4 DURACIÓN DEL ÁREA FOLIAR Y SU IMPACTO EN EL RENDIMIENTO

El área foliar máxima se alcanzó al inicio de la bulbificación (a los 95 días) y comenzó a declinar prematuramente debido a las condiciones ambientales adversas. En el trabajo de De los Santos (2024), el área foliar máxima se obtuvo a los 110 días para Pantanoso y 108 días para Armonía. La duración efectiva del área foliar (DAF) es un factor clave para la intercepción de radiación fotosintéticamente activa y el crecimiento del bulbo. En este trabajo, el ciclo se redujo impactando directamente el rendimiento final del cultivo. Esto resalta la importancia de estrategias de manejo que prolonguen la duración funcional del área foliar, como el manejo eficiente del riego y una fertilización equilibrada, especialmente en etapas críticas del desarrollo (Brewster, 2008; Brewster & Rabinowitch, 1990). En cebolla, la senescencia prematura limita la acumulación de fotoasimilados, afectando el tamaño y calidad del bulbo.

La duración efectiva del área foliar repercutió en los rendimientos obtenidos. Los rendimientos comerciales del presente trabajo para todos los tratamientos y para ambas variedades fueron menores a los rendimientos promedios del país (14699 kg/ha, 14856 kg/ha y 15650 kg/ha para el cultivar Armonía para los tratamientos N0, N1 y N2 respectivamente, mientras que para Pantanoso fueron de 15021 kg/ha para el tratamiento N0, 14496 kg/ha para N1 y 15214 kg/ha para N2). Los rendimientos promedio para la Región Sur para la zafra 2014/2015 fueron de 23344 kg/ha y para la zafra 2015/2016 de 26075 kg/ha (Dogliotti et al., 2021). En el trabajo de De los Santos

(2024), en la zafra 2021/2022, el rendimiento comercial para el cultivar Pantanoso fue de 24319 kg/ha y para Armonía de 24613 kg/ha.

En el presente estudio, no se observaron diferencias significativas entre los cultivares Pantanoso del Sauce CRS y Armonía en el índice de área foliar (IAF). Sin embargo, se registraron diferencias significativas en el IAF en función de las dosis de nitrógeno aplicadas, observándose que dosis más altas promovieron incrementos. Por otro lado, aunque no se encontraron diferencias significativas en el rendimiento entre los cultivares, se evidenció una diferencia significativa en el índice de bulbificación a los 95 días, con valores de 2 para Pantanoso y 1,78 para Armonía, indicando variaciones fenológicas en la transición a la bulbificación. Estas diferencias reflejan la influencia combinada del manejo nutricional y las condiciones ambientales sobre la duración efectiva del área foliar (DAF), la cual es clave para mantener la capacidad fotosintética y la acumulación de reservas en el bulbo (Brewster, 2008; Brewster & Rabinowitch, 1990). Por lo tanto, aunque el rendimiento final fue similar entre cultivares, el manejo adecuado del nitrógeno resulta fundamental para maximizar el desarrollo foliar y la bulbificación, aspectos esenciales para optimizar la productividad en condiciones ambientales variables.

En cuanto a la calidad del bulbo, fue influenciada por la fertilización nitrogenada, observándose una mayor proporción de bulbos descartados en el tratamiento con la dosis más alta de N. Esto coincide con estudios que indican que el exceso de nitrógeno puede aumentar la susceptibilidad a enfermedades fúngicas y generar bulbos con cuellos más gruesos y menor resistencia a la conservación (Maeso Tozzi, 2005). Además, un área foliar excesiva puede favorecer la persistencia de humedad en el canopeo, promoviendo enfermedades como el mildiú causado por *Peronospora destructor*, lo que ha sido reportado en trabajos previos (Arias Pandolfo, 2019). Por lo tanto, la fertilización debe ajustarse no sólo para maximizar el rendimiento, sino también para garantizar la calidad comercial del producto.

6.5 RELACIÓN ENTRE NIVELES DE NITRÓGENO Y LAS VARIABLES FISIOLÓGICAS DEL CULTIVO

Los resultados obtenidos en el experimento mostraron que las diferentes dosis de nitrógeno (N) influyeron significativamente en el índice de área foliar (IAF). Esta observación concuerda con estudios previos que destacan la importancia de un suministro adecuado de N para maximizar el crecimiento vegetativo y la producción de bulbos (Dogliotti et al., 2011; Geisseler et al., 2022).

Los tratamientos con mayores niveles de N (N2) resultaron en un incremento en el área foliar al inicio de la bulbificación, lo que se tradujo en una mayor capacidad de interceptación de radiación y, por ende, una tasa de crecimiento del bulbo más alta. Sin embargo, también se observó que un exceso de N prolonga el ciclo de cultivo, lo que podría comprometer la calidad del bulbo y la conservación postcosecha, tal como lo reportaron Genta et al. (1991) y Arboleya et al. (2017).

En contraste, los tratamientos restrictivos (N0) mostraron una reducción en el IAF y en el rendimiento final, evidenciando la sensibilidad de la cebolla a deficiencias de N, dadas las características de su sistema radicular poco profundo. Esta sensibilidad fue especialmente marcada en el cultivar Pantanoso del Sauce CRS, el cual presentó menores eficiencias en el uso del nitrógeno (EUN%) para todas las comparaciones (N0-N1, N0-N2 y N1-N2), con valores de -18.75, 2.3 y 18.8 kg de cebolla comercial por kg de nitrógeno aplicado respectivamente. En contrapartida, Armonía mostró eficiencias considerablemente mayores, alcanzando valores de EUN de 5.6, 11.3 y 14.2 kg de cebolla comercial/kg N para las comparaciones N0-N1, N0-N2 y N1-N2, lo que sugiere una mejor adaptación a condiciones restrictivas. Estos resultados destacan las diferencias entre las variedades en su capacidad para utilizar el nitrógeno, lo que puede influir en las recomendaciones de fertilización para optimizar el rendimiento bajo condiciones de deficiencia de nitrógeno.

El rendimiento total y comercial para ambas variedades, los tres tratamientos y la interacción variedad y nivel de nitrógeno no presentaron diferencias significativas. Este resultado es consistente con estudios previos realizados en Uruguay, donde se observó que la fertilización nitrogenada no siempre influye directamente en el rendimiento del cultivo de cebolla (Docampo, 2005). Los principales descartes para la variedad Armonía, independientemente de los niveles de nitrógeno utilizados, fueron bulbos de tamaño menor a 4 cm y bulbos brotados. Para la variedad Pantanoso, los descartes se debieron a bulbos con tamaño menor a 4 cm y presencia de bacterias.

6.6 DIFERENCIAS ENTRE CULTIVARES Y MANEJO DEL NITRÓGENO

Los dos cultivares evaluados (Armonía CRS y Pantanoso del Sauce CRS) respondieron de manera distinta a los tratamientos de N, lo cual puede atribuirse a sus características genéticas y niveles de resistencia al mildiu. Armonía, con resistencia parcial, mostró un comportamiento más estable en todas las condiciones de fertilización. Esto sugiere una mayor eficiencia en el uso de nitrógeno por parte de este cultivar, corroborando la importancia del mejoramiento genético para optimizar el manejo nutricional (Arias Pandolfo, 2019).

Por otro lado, Pantanoso fue más susceptible a condiciones de estrés por deficiencia o exceso de N, lo que destaca la necesidad de un manejo más preciso para este cultivar. Estos resultados reafirman la relevancia de ajustar las dosis de fertilización no solo según los requerimientos del cultivo, sino también según la variedad utilizada.

6.7 IMPLICANCIAS PRÁCTICAS Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Este trabajo resalta la importancia de un manejo equilibrado del nitrógeno para optimizar el rendimiento y la calidad de la cebolla en Uruguay. Los niveles intermedios de N (N1) se presentan como una estrategia prometedora para maximizar la producción sin comprometer la calidad del bulbo ni aumentar el riesgo de pérdidas postcosecha. En términos de aplicaciones prácticas, los resultados pueden guiar recomendaciones técnicas para los productores, enfatizando la necesidad de adaptar las estrategias de fertilización según las características del suelo, las condiciones climáticas y el cultivar utilizado (Brewster, 2008; Geisseler et al., 2022). A partir de los hallazgos obtenidos, futuras investigaciones podrían enfocarse en evaluar el impacto de los niveles de nitrógeno en la calidad postcosecha de los bulbos, profundizar en la interacción entre fertilización y resistencia a enfermedades, y extender el uso de análisis rápidos de nitratos a otros cultivos hortícolas en sistemas de producción intensiva, como herramientas para mejorar la sostenibilidad y eficiencia del manejo nutricional (Diacono et al., 2013). Asimismo, sería de interés incluir tratamientos sin fertilización nitrogenada, considerando únicamente el aporte de nitrógeno proveniente del suelo, con el fin de evaluar su capacidad para sostener el crecimiento y rendimiento del cultivo y cuantificar con mayor precisión la respuesta a la fertilización.

7. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que mayores dosis de nitrógeno favorecieron el crecimiento vegetativo del cultivo de cebolla, expresado en un mayor índice de área foliar. No obstante, no se registraron diferencias en el índice de bulbificación, evidenciando que este parámetro no respondió a los niveles de nitrógeno aplicados en las condiciones evaluadas. En este sentido, el aporte de nitrógeno del suelo podría haber desempeñado un papel relevante, compensando parcialmente eventuales deficiencias y reduciendo el efecto diferencial de los tratamientos.

Para la evaluación a partir de muestras de hojas en un rango de momentos de evaluación, los medidores LAQUAtwin demostraron una correlación confiable con los análisis convencionales de laboratorio, validando su uso como herramienta rápida, económica y práctica para el diagnóstico del estado nutricional del cultivo. La incorporación de estos dispositivos en el monitoreo de nitratos podría contribuir significativamente a mejorar la eficiencia del uso de fertilizantes, reduciendo tanto los costos de producción como el impacto ambiental asociado a la lixiviación de nitrógeno (Diacono et al., 2013). Además, su portabilidad y facilidad de uso permiten realizar evaluaciones en tiempo real directamente en el campo, lo que facilita una toma de decisiones más ágil y precisa por parte de técnicos y productores. Esta capacidad de respuesta inmediata resulta clave en sistemas de manejo nutricional dinámicos, especialmente en cultivos sensibles al exceso o deficiencia de nitrógeno, como la cebolla.

Si bien el presente ensayo no evidenció correlaciones altamente significativas entre ambos métodos en todos los períodos de evaluación, se identificaron momentos puntuales como los días 40 y 54 en los que se registraron correlaciones positivas más elevadas. Estos resultados sugieren que podría existir una ventana temporal en la que la relación entre los datos obtenidos con LAQUAtwin y los análisis de laboratorio es más estrecha. En este sentido, futuras investigaciones podrían centrarse en esa franja temporal, realizando muestreos más frecuentes (por ejemplo, día a día) para determinar con mayor precisión el comportamiento de dicha correlación y optimizar el momento de diagnóstico en campo.

Los resultados de este trabajo aportan herramientas concretas para optimizar las estrategias de fertilización nitrogenada en el cultivo de cebolla en Uruguay, contribuyendo a reducir la brecha de rendimiento entre productores mediante un manejo

más ajustado a las necesidades del cultivo, las condiciones edáficas y el material genético utilizado.

Finalmente, este enfoque podría ser extendido a otros cultivos hortícolas en sistemas de producción intensiva, contribuyendo a una agricultura más eficiente y sustentable. Además, la integración con metodologías complementarias, como sensores ópticos de clorofila, podría mejorar aún más la precisión del diagnóstico nutricional, favoreciendo la toma de decisiones agronómicas (Buajaila & Miles, 2019).

8. BIBLIOGRAFÍA

- Ackermann, M. N., & Díaz, A. (2022). Horticultura: Situación y perspectivas. En *Anuario OPYPA 2022* (pp. 317-342). MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-opypa-2022/analisis-sectorial-cadenas-productivas/horticultura>
- Altieri Bequio, M., Leys Souza, P., & Mancuello Pippo, M. (2003). *Crecimiento y rendimiento de la cebolla (Allium cepa L.) "Pantanos del Sauce CRS" bajo diferentes regímenes de riego, densidad y fertilización con nitrógeno* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/25377>
- Amare, G. (2020). Review on mineral nutrition of onion (*Allium cepa L.*). *The Open Biotechnology Journal*, 14, 134-144. <https://doi.org/10.2174/1874070702014010134>
- Arbolea, J., Berrueta, C., & Falero, M. (2017). Distintas fuentes de nitrógeno para fertilización de cebolla en siembra directa. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Jornada de actualización técnica en cebolla: Tecnologías en el manejo del cultivo de cebolla* (pp. 79-83). <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/9754/1/SAD-775.-p.79-83.pdf>
- Arias, M., Betancor, T., Ríos, J., Berrueta, C., Ferrando, M., & Galván, G. (2024). El nitrógeno y el mildiú en el cultivo de cebolla: Resultados preliminares. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Manejo de cultivos hortícolas: Avances experimentales y líneas de investigación* (pp.14-15). <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/17877/1/sad-809-jornada-horticola-2024.pdf>
- Arias Pandolfo, M. (2014). *Evaluación de la resistencia y análisis histopatológico de accesiones de cebolla frente a Peronospora destructor Berk. Casp.* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Arias Pandolfo, M. (2019). *Relaciones histopatológicas y bases genéticas de la resistencia a Peronospora destructor en cebolla* [Tesis de maestría]. Universidad de la República.
- Arias Pandolfo, M., Galván Vivero, G. A., Berrueta Moreira, M. C., Betancor, T., Ferrando Urrutia, M. G., González Barrios, P., & Scarlato García, M. (2024). *Informe final del proyecto: Efecto de la disponibilidad de nitrógeno sobre la susceptibilidad al mildiú de la cebolla*. ANII. <https://redi.anii.org.uy/jspui/handle/20.500.12381/3944>
- Barbazán, M. (1998). *Análisis de plantas y síntomas visuales de deficiencia de nutrientes*. Universidad de la República. <https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/Analisisdeplantasysintomasde deficiencias.pdf>

- Bentancur Guimarey, J. I., & Rivero Román, D. F. (2020). *Evaluación de herramientas para el monitoreo a campo del nivel de nitrógeno en plantas de tomate* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Berrueta, C., Arboleya, J., Falero, M., Reggio, A., Maeso, D., & Pijuán, G. (2017). Fechas óptimas en siembra directa de cebolla Pantanoso del Sauce CRS y Santina en el sur del Uruguay. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Jornada de actualización técnica en cebolla: Tecnologías en el manejo del cultivo de cebolla* (pp. 30-41).
<https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/9748/1/SAD-775.-p.30-41.pdf>
- Berrueta, C., Grasso, R., Giménez, G., Bentancur, J., Rivero, D., & Falero, M. (2022). Análisis de savia para la determinación rápida del nivel de potasio, nitrato y calcio en el campo. *Revista INIA*, (67), 48-52.
<https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/16156/1/Revista-INIA-67-Dic-2021-13.pdf>
- Bevacqua, R. F., & Cardenas, T. R. (2002). *Nitrogen monitoring techniques for vegetable crops*. New Mexico State University.
https://pubs.nmsu.edu/_circulars/CR579.pdf
- Bonilla, I. (2008). Introducción a la nutrición mineral de las plantas: Los elementos minerales. En J. Azcón-Bieto & M. Talón (Coords.), *Fundamentos de fisiología vegetal* (2ª ed., pp. 103-119). McGraw-Hill.
- Brewster, J. L. (1994). *Onions and other vegetable Alliums*. CABI.
- Brewster, J. L. (2008). *Onions and other vegetable alliums* (2nd ed.). CABI.
- Brewster, J. L., Mondal, F. M., & Morris, G. E. L. (1986). Bulb development in onion (*Allium cepa* L.): IV. Influence on yield of radiation interception, its efficiency of conversion, the duration of growth and dry-matter partitioning. *Annals of Botany*, 58(2), 221-233. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a087200>
- Brewster, J. L., & Rabinowitch, H. D. (Eds.) (1990). *Onions and allied crops: Vol. 3. Biochemistry, food science, and minor crops*. CRC Press.
https://books.google.com.uy/books?id=HTj3DwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Buajaila, F., & Miles, C. (2019). *Petiole sap Nitrate-N quick test for determining nitrogen status of tomato*. Washington State University.
https://www.researchgate.net/publication/353972817_PETIOLE_SAP_NITRATE-N_QUICK_TEST_FOR_DETERMINING_NITROGEN_STATUS_OF_TOMATO
- Cadahía, C. (2008). *La savia como índice de fertilización: Cultivos agroenergéticos, hortícolas, frutales y ornamentales*. Mundi-Prensa.

- Campbell, C. A. (1978). Soil organic carbon, nitrogen and fertility. En M. Schnitzer & S. U. Khan (Eds.), *Soil organic matter* (pp. 173-271). Elsevier.
<https://www.sciencedirect.com/science/chapter/bookseries/abs/pii/S0166248108700205>
- Cerón Rincón, L. E., & Aristizábal Gutiérrez, F. A. (2012). Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14(1), 285-295. <https://www.redalyc.org/pdf/776/77624081026.pdf>
- Ciampitti, I. A., & García, F. O. (2007). Requerimientos nutricionales: Absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios. *Archivo Agronómico*, (11), 13-16.
- De los Santos, C. (2024). *Evaluación comparativa de cultivares de cebolla en tres fechas de siembra y trasplante* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Servicio de Corrección Bibliográfica.
<http://tesis.fagro.edu.uy/index.php/tg/catalog/view/255/197/6132>
- Diacono, M., Rubino, P., & Montemurro, F. (2013). Precision nitrogen management of wheat: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(1), 219-241.
<https://hal.science/hal-01201355>
- Dirección General de Recursos Naturales. (s.f.). *CONEAT, carta de suelos y cartografía de campo natural*. MGAP.
<http://dgrn.mgap.gub.uy/js/visores/cartasuelos/>
- Docampo, R. (2005). Manejo de suelos. En J. Arboleya (Ed.), *Tecnología para la producción de cebolla* (pp. 93-109). INIA.
- Dogliotti, S., Colnago, P., Galván, G., & Aldabe, L. (2011). *Bases fisiológicas del crecimiento y desarrollo de los principales cultivos hortícolas: Tomate (Lycopersicon esculentum), papa (solanum tuberosum) y cebolla (Allium cepa)*. Universidad de la República. https://olericultura.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/12/fisio-y-crec-papa_toma_ceb.pdf
- Dogliotti, S., Scarlato, M., Berrueta, C., Barros, C., Reherrmann, F., Rieppi, M., Inetti, C., Soust, G., & Borges, A. (2021). *Análisis y jerarquización de factores determinantes de las brechas de rendimiento y calidad en los principales cultivos hortícolas del Uruguay*. INIA.
<https://www.inia.uy/sites/default/files/publications/2024-10/Inia-Fpta-91-proyecto-288-Junio-2021.pdf>
- Duggan, M. T. (2017). Análisis de suelos: Una herramienta clave para el diagnóstico de fertilidad de suelos y la fertilización de cultivos. *Fertilizar*, (15), 8-12.
<https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2020/09/15.pdf>
- Galloway, J. N., Townsend, A. R., Erisman, J. W., Bekunda, M., Cai, Z., Freney, J. R., Martinelli, L. A., Seitzinger, S. P., & Sutton, M. A. (2008). Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 320(5878), 889-892. <https://doi.org/10.1126/science.1136674>

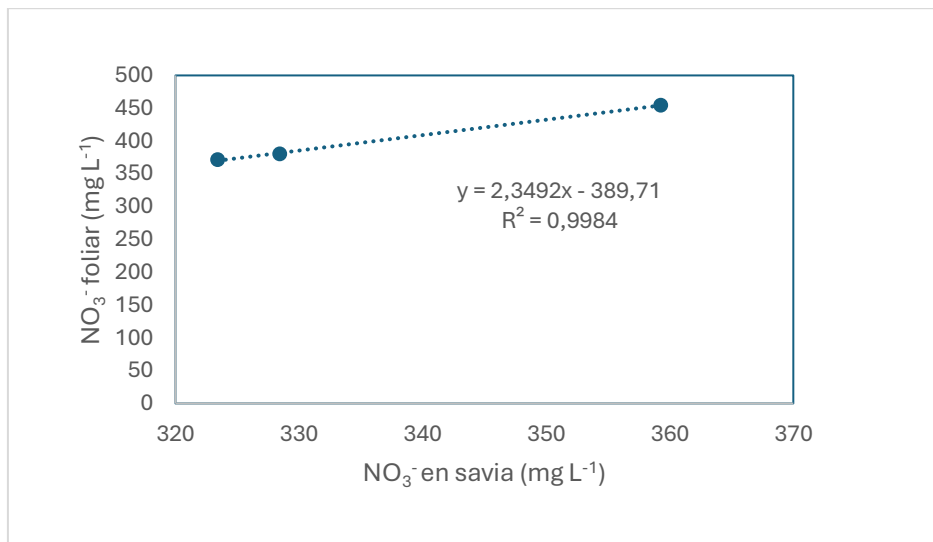
- Geisseler, D., Soto Ortiz, R., & Diaz, J. (2022). Nitrogen nutrition and fertilization of onions (*Allium cepa* L.): A literature review. *Scientia Horticulturae*, 291, Artículo e110591. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110591>
- Genta, G., Bernal, R., & Gutiérrez, A. (1991). *Producción de cebolla en el Litoral Norte del Uruguay*. INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2707/1/111219240807154334.pdf>
- Grahmann, K., Quincke, A., Soulier, G., Vergara, H., & Ciganda, V. (2018). Pérdida de nitrógeno como nitrato por lixiviación en sistemas de cultivo continuo y rotación cultivo-pastura. *Revista INIA*, (55), 35-39. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/12281/1/Revista-INIA-55-diciembre.p.35-39-Grahmann-et-al.pdf>
- Grasso, R., Berrueta, C., & Giménez, G. (2021). Monitoreo de nutrientes para la asistencia a la fertirrigación a nivel de predios. *Revista INIA*, (66), 108-112.
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2014). *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management* (8th ed.). Pearson.
- Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Møller, I. S., & White, P. (2012). Functions of Macronutrients. En P. Marschner (Ed.), *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed., pp. 135-189). Academic Press. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123849052000066?via%3DIihub>
- Hochmuth, G. J., & Hanlon, E. (2022). Plant tissue analysis and interpretation for vegetable crops in Florida. *EDIS*, 2022(4). <https://doi.org/10.32473/edis-ep081-2004>
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. (s.f.). *Banco de datos agroclimáticos*. <https://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>
- Jansson, S. L., & Persson, J. (1982). Mineralization and immobilization of soil nitrogen. En F. J. Stevenson (Ed.), *Nitrogen in agricultural soils* (pp. 229-252). ASA; CSSA; SSSA. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr22.c6>
- Laguna, C. (2014). *Correlación y regresión lineal*. IACS. <https://cacep.mx/wp-content/uploads/2023/02/r132139-1.pdf>
- Maeso Tozzi, D. C. (2005). Enfermedades del cultivo de cebolla en la zona sur de Uruguay. En J. Arbolea (Ed.), *Tecnología para la producción de cebolla* (pp. 151-179). INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2787/1/15630051107091851.pdf>
- McKean, S. (1993). *Manual de análisis de suelos y tejido vegetal: Una guía teórica y práctica de metodologías*. CIAT.
- McNeill, A., & Unkovich, M. (2007). The nitrogen cycle in terrestrial ecosystems. En P. Marschner & Z. Rengel (Eds.), *Nutrient cycling in terrestrial ecosystems* (pp. 37-64). Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-68027-7_2

- Observatorio Granjero. (2022). *Anuario estadístico UAM 2022*. MGAP; UAM. https://uam.com.uy/wp-content/uploads/2020/10/Anuario_UAM-2022.pdf
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2022). *Anuario estadístico agropecuario 2022*. MGAP. https://descargas.mgap.gub.uy/DIEA/Anuarios/Anuario2022/O_MGAP_Anuario_estad%C3%ADstico_%202022-DIGITAL.pdf
- Page, A. L., Miller, R. H., & Keeney, D. R. (Eds.). (1982). *Methods of soil analysis: Part 2: Chemical and microbiological properties*. ASA; SSSA.
- Paul, E. A., & Clark, F. E. (1996). *Soil microbiology and biochemistry* (2nd ed.). Academic Press.
- Pérez-López, E. (2013). Análisis de fertilidad de suelos en el laboratorio de Química del Recinto de Grecia, Sede de Occidente, Universidad de Costa Rica. *InterSedes*, 14(29), 6-18.
- Römheld, V. (2012). Diagnosis of deficiency and toxicity of nutrients. En P. Marschner (Ed.), *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed., pp. 299-312). Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/science/chapter/edited-volume/abs/pii/B978012384905200011X>
- Sarmiento-Herrera, N. G., Aguilar-Ariza, A., & Camacho-Tamayo, J. H. (2024). Identificación de los factores que limitan el rendimiento de la producción de maíz a partir de datos observacionales. *Acta Agronómica*, 72(3), 241-251. <https://doi.org/10.15446/acag.v72n3.106012>
- Schimel, J. P., & Bennett, J. (2004). Nitrogen mineralization: Challenges of a changing paradigm. *Ecology*, 85(3), 591-602.
- Shukla, S., Iqbal, M. A., Jaiswal, S., Angadi, U. B., Fatma, S., Kumar, N., Jasrotia, R. S., Fatima, Y., Rai, A., & Kumar, D. (2016). The onion genomic resource: A genomics and bioinformatics driven resource for onion breeding. *Plant Gene*, 8, 9-15. <https://doi.org/10.1016/J.PLGENE.2016.09.003>
- Spoturno, J., Oyhantçabal, P., Goso, C., Cazaux, S., Aubet, N., Huelmo, S., Morales, E., Piñeiro, A., & Martínez, G. (2004). *Carta geológica del departamento de Canelones* [Mapa]. MIEM; Universidad de la República. <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/sites/ministerio-industria-energia-mineria/files/documentos/publicaciones/Carta%20Geol%C3%B3gica%20de%20Canelones.pdf>
- Vieta Delgado, A. L. (2020). *Factores de manejo del cultivo que influyen sobre la conservación poscosecha de cebolla en sistemas prediales* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/32563>

9. ANEXOS

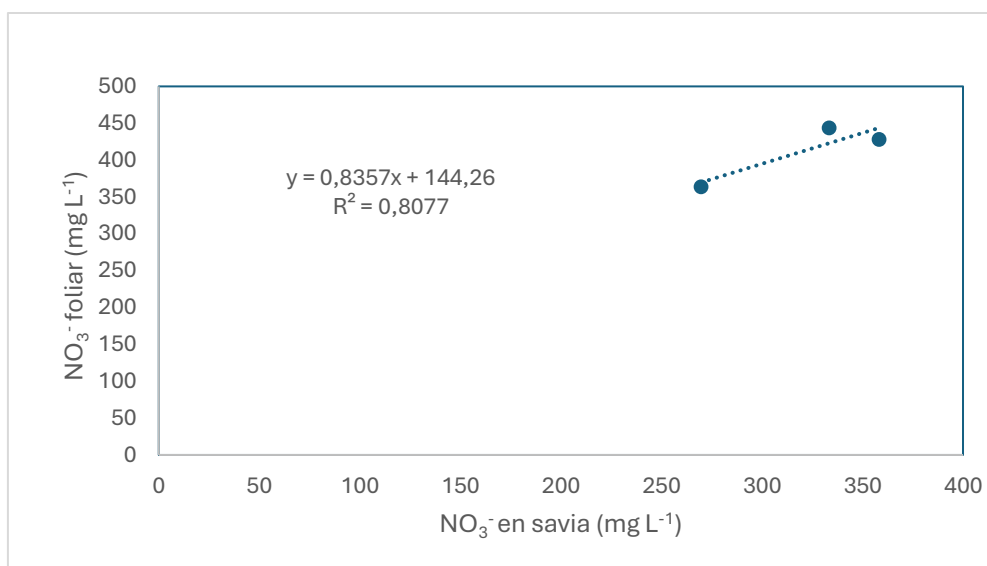
ANEXO A

Relación lineal entre el NO₃⁻ foliar y savia en ambas variedades (54ddt)



ANEXO B

Relación lineal entre el NO₃⁻ foliar y savia en ambas variedades (40-54 ddt)



ANEXO C

Valores absolutos de los diferentes métodos de medición de nitrato para diferentes momentos de muestreo

Variedad	Momento de muestreo (ddt)	Tratamiento N	NO ₃ ⁻ hoja	NO ₃ ⁻ raíz	NO ₃ ⁻ tallo	NO ₃ ⁻ bulbo	%N hoja	%N raíz	%N tallo	%N bulbo	NO ₃ ⁻ lab hoja	NO ₃ ⁻ lab raíz	NO ₃ ⁻ lab tallo	NO ₃ ⁻ lab bulbo
Pantano	27	N0	189	2767	365						227			
Pantano	27	N1	283	3111	613						274			
Pantano	27	N2	200	2472	530						220			
Pantano	40	N0	208	2439	603		3,16	2,55	2,00		346	1069	521	
Pantano	40	N1	422	2163	1047		3,49	2,63	2,36		504	5734	1033	
Pantano	40	N2	267	2617	495		3,27	2,33	1,99		341	1887	467	
Pantano	54	N0	284	1933	726						515			
Pantano	54	N1	471	2733	1298						574			
Pantano	54	N2	264	2461	1113						233			
Pantano	68	N0	218	1330	768		1,61	2,59	2,05		141	782	464	
Pantano	68	N1	219	2492	700		1,80	2,48	2,47		138	665	260	
Pantano	68	N2	192	1566	455		2,83	2,64	1,88		180	999	323	
Pantano	80	N0	296	729	417	468								
Pantano	80	N1	135	1977	536	583								
Pantano	80	N2	184	1852	566	483								
Pantano	95	N0	223	1579	703	1034	2,34	1,37	1,15	0,86	158	999	151	175
Pantano	95	N1	326	2798	809	1214	2,49	1,66	1,27	1,11	257	2985	191	232
Pantano	95	N2	276	2996	656	750	2,70	1,71	1,24	1,22	278	3179	185	222
Armonía	27	N0	392	2533	608						174			
Armonía	27	N1	350	2550	730						310			
Armonía	27	N2	238	3039	613						206			
Armonía	40	N0	213	1748	350		3,40	2,14	2,37		349	381	1039	
Armonía	40	N1	292	2156	537		3,72	3,01	2,80		301	4413	588	
Armonía	40	N2	420	2433	750		3,24	2,02	2,27		691	4646	773	
Armonía	54	N0	373	1806	1244						244			
Armonía	54	N1	248	1489	422						335			
Armonía	54	N2	383	1747	679						510			
Armonía	68	N0	294	1205	733		2,47	1,91	1,59		173	606	312	
Armonía	68	N1	277	1654	646		2,64	1,97	1,68		133	581	197	
Armonía	68	N2	406	2893	652		2,69	2,16	1,72		134	540	184	
Armonía	80	N0	209	1104	554	481								
Armonía	80	N1	212	1270	545	445								
Armonía	80	N2	291	1408	576	492								
Armonía	95	N0	289	1831	633	883	2,19	1,20	1,05	1,01	184	1039	171	213
Armonía	95	N1	362	1544	677	748	2,09	1,20	1,22	1,15	258	1180	195	196
Armonía	95	N2	311	2508	769	816	2,29	1,63	2,35	2,07	228	1448	234	219