

Universidad Nacional del Nordeste

Facultad de Ciencias Agrarias



*Universidad Nacional
del Nordeste*

**Eficiencia en el uso del nitrógeno y agua en
caña de azúcar en zonas de manejo
homogéneas**

Por

Ing. Agr. Hugo Javier Fernández

Tesis de Investigación

Para optar al Grado Académico de

Magister en Producción Vegetal

Corrientes, Argentina, 2021

Eficiencia en el uso del nitrógeno y agua en caña de azúcar en zonas de manejo homogéneas

Ing. Agr. Hugo Javier Fernández

Comisión Asesora de Tesis

Director: Dr. Ing. Agr. Martin Acreche

Codirector: Dr. Ing. Ftal. Flavio Speranza

Tribunal Examinador de Tesis

Presentación Formal Académica

Fecha:

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por ser un pilar fundamental, estar siempre y apoyarme en todos mis proyectos.

Al INTA, por la beca que hizo posible esta maestría.

A mi Director Martin Acreche, por siempre tener una muy buena predisposición para enseñar, por sus aportes, por sus exigencias y por su conocimiento aportado a la tesis y a mi formación.

A mi Co-director Flavio Speranza, por haberme brindado el apoyo, consejos y enseñanzas fundamentales para la realización de este trabajo.

A mi director de Beca Jorge Wallberg, por acompañarme desde el principio y gestionar los nexos que me condujeron a la elección de este tema de tesis.

A Carlos Aguirre, por el acompañamiento desde que llegue a Yuto y por las enseñanzas brindadas durante todo este tiempo.

Agradezco especialmente a Marcelo Torena, Fabián Ortega, Martin Ortega, Lucio Ortiz y Omar García, quienes me acompañaron a realizar todos los muestreos y sin los que este trabajo no hubiera podido ser concretado.

A Eve, por la comprensión, la compañía y el apoyo incondicional.

A mis amigos Carlitos, Marcos, Martin, Fernando y Seba y a todos mis compañeros de la EECT Yuto, por su ayuda y colaboración en diferentes tareas de campo y laboratorio y por hacer más ameno todo el camino recorrido.

A mis compañeros del Grupo de Ecofisiología de la EEA Salta Popi, Jime, Jorge, Juan, Fede, Mario y Davicho, por su ayuda y colaboración en diferentes tareas relacionadas a la tesis.

A la empresa “Seabord – energías renovables y alimentos” (ex Tabacal), donde se realizaron los experimentos, en especial a todos los técnicos que estuvieron involucrados durante el proceso: Gonzalo Ibarra, Marcelo Acosta, Rodrigo Lema, por la disponibilidad total de todos los recursos y por el apoyo constante.

A Matías Diez y todas las personas de la empresa Taranis, por haberme compartido y brindado información que facilitó la concreción de este trabajo.

A mis amigos de siempre, colegas, compañeros y a todos los antes mencionados por su confianza, que directa e indirectamente apoyaron este proyecto. Gracias.

INDICE GENERAL

INDICE GENERAL	4
INDICE DE TABLAS	6
INDICE DE FIGURAS	7
RESUMEN	10
CAPITULO 1	12
Introducción general	12
1.1 El cultivo de la caña de azúcar	12
1.1.1 La caña de azúcar en Argentina	12
1.1.2 Fenología	13
1.1.3 Requerimientos ambientales	14
1.1.4 Nitrógeno	15
1.1.5 Disponibilidad hídrica	18
1.2 Manejo de la variabilidad espacio-temporal	22
1.3 Planteo del problema	25
1.4 Objetivos e hipótesis de la investigación	27
1.4.1 Objetivo general	27
1.4.2 Objetivos específicos	27
1.4.3 Hipótesis planteada	27
CAPITULO 2	28
Materiales y métodos	28
2.1 Localización y descripción del área de estudio	28
2.2 Descripción general del ensayo	29
2.2.1. Delimitación de zonas de manejo homogéneas	29
2.2.2 Ciclo agrícola 2015/16	30
2.2.3 Ciclo agrícola 2017/18	31
2.3 Determinaciones de suelo y planta	32
2.3.1 Muestreo de suelo	33
2.3.2 Muestreo de biomasa fresca y seca total	35
2.3.3 Cálculo de eficiencias en el uso de recursos e insumos	36
2.4 Análisis estadístico	39

CAPITULO 3	40
Resultados	40
3.1 Caracterización climática	40
3.2 Delimitación de zonas de manejo homogéneas.....	41
3.3 Ciclo agrícola 2015/16	43
3.3.1 Rendimiento y componentes	43
3.3.2 Eficiencia de uso de nitrógeno.....	46
3.4 Ciclo agrícola 2017/18	53
3.4.2 Eficiencia de uso de nitrógeno	61
CAPITULO 4	72
Discusión y conclusiones	72
4.1 Discusión general	72
4.2 Principales resultados.....	79
4.3 Implicancias prácticas	79
Bibliografía	81

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Muestreos realizados durante los ciclos agrícolas 2015/16 y 2017/18.

Tabla 2. Análisis físico-químico del suelo para las zonas 1 y 2 en el ciclo agrícola 2015/16.

Tabla 3. Análisis de las variables contenido de nitrógeno en el suelo (0-100 cm) y contenido de nitrógeno en la biomasa medidas al inicio y en cuatro fases fenológicas de la caña de azúcar para las zonas 1 y 2 durante el ciclo agrícola 2015/2016.

Tabla 4. Análisis de las variables agua total disponible en el suelo (mm) y agua utilizada por el cultivo (mm) medidas al inicio y en cuatro fases fenológicas de la caña de azúcar para las zonas 1 y 2 durante el ciclo agrícola 2015/2016.

Tabla 5. Matriz de correlaciones entre las variables medidas durante el ciclo agrícola 2015/2016.

Tabla 6. Análisis físico-químico del suelo para las zonas 1 y 2 en el ciclo agrícola 2017/18.

Tabla 7. Análisis de las variables contenido de nitrógeno en el suelo (0-100 cm) y contenido de nitrógeno en la biomasa medidas al inicio y en cuatro fases fenológicas y para cuatro niveles de fertilización (N0, N1, N2 y N3) en las zonas 1 y 2 durante el ciclo agrícola 2017/2018.

Tabla 8. Análisis de las variables agua total disponible en el suelo (0-100cm) y agua utilizada por el cultivo (mm) medidas al inicio y en cuatro fases fenológicas de la caña de azúcar y para cuatro niveles de fertilización nitrogenada (N0, N1, N2 y N3), en las zonas 1 y 2, durante el ciclo 2017/2018.

Tabla 9. Matriz de correlaciones entre las variables medidas durante el ciclo agrícola 2017/2018.

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del sitio experimental, El Tabacal, departamento de Orán, Salta, Argentina.

Figura 2. Lote seleccionado (A54) para realizar el ensayo. Las zonas homogéneas 1 y 2 representan zonas con diferente NDVI y propiedades físico-químicas del suelo.

Figura 3. Ubicación de los tratamientos de fertilización con nitrógeno en cada una de las zonas de manejo.

Figura 4. a) Temperaturas máximas, mínimas y medias y b) precipitación acumulada mensual para el promedio de la serie histórica 1961-2016 (negro) y para los ciclos agrícolas 2015/16 (rojo) y 2017/18 (azul). Datos para la localidad de El Tabacal, Salta, Argentina.

Figura 5. Mapa de NDVI y primera zonificación del lote A54 obtenida a partir del programa QGIS. Los valores numéricos de NDVI aumentan de rojo a verde. Zona 1: arenosa; Zona 2: arcillosa.

Figura 6. Mapas de rendimiento (izquierda) y de NDVI (derecha) para el cultivo de soja en el lote A54 en el ciclo agrícola 2013. En el panel izquierdo, los rendimientos aumentan de rojo a verde. En el panel derecho, los valores numéricos de NDVI aumentan de rojo a verde. Zona 1: arenosa; Zona 2: arcillosa.

Figura 7. A) Dinámica del número de tallos por metro lineal, B) Biomasa fresca aérea total (Mg ha^{-1}) y C) Materia seca aérea total (Mg ha^{-1}), para las zonas 1 (barras azules) y 2 (barras verdes) durante las cuatro fases fenológicas del cultivo de caña de azúcar. Letras diferentes representan diferencias significativas entre zonas para cada momento de muestreo con una probabilidad de 0,05.

Figura 8. A) Rendimiento cultural (Mg ha^{-1}) y B) Peso seco de tallos a cosecha (Mg ha^{-1}), para las zonas 1 (barras azules) y 2 (barras verdes). Letras diferentes representan diferencias significativas entre zonas con una probabilidad de 0,05.

Figura 9. A) Eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN) ; B) Eficiencia de recuperación del nitrógeno (ERN y C) Eficiencia fisiológica o de utilización del nitrógeno (EFN), para las zonas 1 (barras azules) y 2 (; barras verdes). Letras diferentes representan diferencias significativas entre zonas con una probabilidad de 0,05.

Figura 10. A) Eficiencia en el uso del agua (EUA) y B) Eficiencia de captura del agua (ECA) para las zonas 1 (barras azules) y 2 (barras verdes). Letras diferentes representan diferencias significativas entre zonas con una probabilidad de 0,05.

Figura 11. Mapa de NDVI para el lote A54 en una fecha posterior a la aplicación de fertilizante nitrogenado (06/02/2018). Los valores numéricos de NDVI aumentan de rojo a verde. El cuadro inserto a la izquierda muestra la disposición de los cuatro tratamientos de fertilización nitrogenada (0, 58, 115 y 173 kg ha⁻¹) para las zonas 1 y 2.

Figura 12. A) Dinámica del número de tallos por metro lineal; B) Biomasa fresca aérea total (Mg ha⁻¹) y C) Materia seca total (Mg ha⁻¹) para cuatro fases fenológicas de la caña de azúcar en la zona 1 (barras azules, 1) y en la zona 2 (barras verdes, 2). Letras diferentes representan diferencias significativas entre zonas para cada momento de muestreo con una probabilidad de 0,05.

Figura 13. Dinámica del número de tallos por metro lineal para cuatro niveles de fertilización (N0, N1, N2 y N3) durante las cuatro fases fenológicas de la caña de azúcar. Letras diferentes representan diferencias significativas entre dosis de fertilización nitrogenada para cada estadio fenológico con una probabilidad de 0,05.

Figura 14. Biomasa fresca total para cuatro niveles de fertilización (N0, N1, N2 y N3) durante las cuatro fases fenológicas de la caña de azúcar. Letras diferentes representan diferencias significativas entre dosis de fertilización nitrogenada para cada estadio fenológico con una probabilidad de 0,05.

Figura 15. Materia seca total para cuatro niveles de fertilización (N0, N1, N2 y N3) durante las cuatro fases fenológicas de la caña de azúcar. Letras diferentes representan diferencias significativas entre dosis de fertilización nitrogenada para cada estadio fenológico con una probabilidad de 0,05.

Figura 16. Rendimiento cultural y peso seco de tallos a cosecha para las zonas 1 (barras azules) y 2 (barras verdes). Letras diferentes representan diferencias significativas entre zonas con una probabilidad de 0,05.

Figura 17. Rendimiento cultural y Peso seco de tallos a cosecha para cuatro niveles de fertilización (N0, N1, N2 y N3). Letras diferentes representan diferencias significativas entre dosis de fertilización nitrogenada con una probabilidad de 0,05.

Figura 18. A) Eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN); B) Eficiencia de recuperación del nitrógeno (ERN) y C) Eficiencia de fisiológica o de utilización del nitrógeno (EFN) en un suelo arenoso (barras azules, zona 1) y uno arcilloso (barras verdes, zona 2). Letras diferentes representan diferencias significativas entre zonas con una probabilidad de 0,05.

Figura 19. A) Eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN) ;B) Eficiencia de recuperación del nitrógeno y C) Eficiencia fisiológica del nitrógeno para cuatro niveles de fertilización (N0, N1, N2 y N3). Letras diferentes representan diferencias significativas entre dosis de fertilización nitrogenada con una probabilidad de 0,05.

Figura 20. A) Eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN) ;B) Eficiencia de recuperación del nitrógeno (ERN) y C) eficiencia fisiológica del nitrógeno (EFN) para tres niveles de fertilización (N1, N2 y N3). Letras diferentes representan diferencias significativas entre dosis de fertilización nitrogenada con una probabilidad de 0,05.

Figura 21. A) Eficiencia en el uso del agua (EUA) y B) Eficiencia de captura del agua (ECA) medida en todo el ciclo del cultivo de caña de azúcar, en la zona 1 (barras azules) y zona 2 (barras verdes). Letras diferentes representan diferencias significativas entre zonas con una probabilidad de 0,05.

Figura 22. A) Eficiencia en el uso del agua (EUA) y B) Eficiencia de captura del agua (ECA) para cuatro niveles de fertilización nitrogenada (N0, N1, N2 y N3). Letras diferentes representan diferencias significativas entre dosis de fertilización nitrogenada con una probabilidad de 0,05.

RESUMEN

El rendimiento de la caña de azúcar se encuentra fuertemente asociado a la disponibilidad de agua y nitrógeno (N), las cuales presentan grandes variaciones espacio-temporales a nivel de lote. Estas variaciones generan diferentes eficiencias de captura y uso del N y agua, lo que se traduce en un menor aprovechamiento de los recursos disponibles y la imposibilidad de alcanzar rendimientos potenciales. El objetivo de esta tesis fue evaluar en caña de azúcar la productividad, eficiencia de uso de agua (EUA), de N (EUN) y sus componentes en zonas de manejo homogéneas. En base a imágenes satelitales y a muestreos de suelo *in-situ*, durante los ciclos agrícolas 2015/16 y 2017/18 se caracterizó un lote en dos zonas homogéneas de manejo: zona 1 presentó textura franco-arenosa, menor valor del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), materia orgánica (MO) y retención de humedad; y zona 2 con textura franco-arcillosa, de mayor NDVI, MO y retención de humedad. Durante el ciclo 2015/16 se analizó el efecto de zonas de manejo sobre la productividad y eficiencias de captura del agua (ECA), EUA y EUN. En la campaña 2017/18, además del efecto de las zonas, se evaluaron dosis crecientes de fertilización con N (0; 58, 115 y 173 kg N ha⁻¹) sobre las mismas variables. Para ambos ciclos se tomaron muestras de suelo y biomasa aérea en cuatro fases fenológicas del cultivo (establecimiento de la población inicial, macollaje, gran crecimiento y maduración). La campaña 2015/2016 presentó leves excesos hídricos (47 mm) mientras que la 2017/2018 déficit hídrico (56 mm). Se observó que, para ambos ciclos agrícolas, la zona 2 registró mayores valores que la zona 1 para las variables: biomasa fresca total (BT) (> 8,9% y > 20,6%); rendimiento cultural (RC) (> 9% y > 16%); EUN (> 1,8% y > 16,6%) y EUA (> 7,13 % y > 12,3%) para los ciclos 2015/16 y 2017/18, respectivamente. Esto demuestra que las condiciones ambientales del ciclo influyen en la magnitud de las diferencias entre zonas, tendiendo a reducir la diferencia cuando se presentaron balances hídricos más favorables durante el ciclo del cultivo. La interacción fue no significativa ($p > 0,05$) entre zona de manejo y dosis de N para BT, RC, EUA y EUN, lo que demuestra que no existe un aprovechamiento diferencial del N por zona de manejo homogénea. El aumento en la dosis de N incrementó la BT, el RC y la EUA, y disminuyó la EUN, presentando todas las variables mayores valores en la zona 2 que en la zona 1. Estos resultados muestran que la implementación de diagnósticos y recomendaciones sobre las necesidades de agua y de fertilización nitrogenada en caña de azúcar según zonas homogéneas sería una estrategia promisoriosa para realizar un uso más eficiente de estos recursos, mejorando la productividad y reduciendo los riesgos ambientales asociados al uso ineficiente de los mismos.

Palabras clave: caña de azúcar; zonas de manejo homogéneas; eficiencia en el uso de recursos; fertilización nitrogenada.

ABSTRACT

Sugarcane yield is strongly associated with water and nitrogen (N) availability, which present large spatio-temporal variations at field-level. These variations generate different efficiencies for the capture and use of N and water, which translates into less use of available resources and the difficulty of reaching potential yields. The objective of this thesis was to evaluate sugarcane productivity, water use efficiency (WUE), nitrogen use efficiency (NUE) and its components in homogeneous handling zones. During the 2015/16 and 2017/18 agricultural cycles, the experimental field was characterized in two homogeneous handling zones. Based on satellite images and *in-situ* soil samplings, the zones were: zone 1 with sandy-loam texture, lower value of the normalized difference of vegetation index (NDVI), organic matter (OM) and moisture retention; and zone 2 with a clay-loam texture, higher NDVI, OM and moisture retention. During the 2015/16 cycle, the effect of handling zones on productivity and water capture efficiency (WCE), WUE and NUE was analyzed. In the 2017/18 cycle, in addition to the effect of the handling zones, the doses of fertilization with N (0; 58, 115 and 173 kg N ha⁻¹) were evaluated on the same variables. For both cycles, soil and above ground biomass samples were taken in four phenological phases of the crop (initial population establishment, tillering, main growth and ripening). The 2015/2016 cycle presented slight water excesses (47 mm) while the 2017/2018 cycle presented slight water deficit (56 mm). It was observed that, for both agricultural cycles, zone 2 showed higher values than zone 1 for total fresh biomass (TB) (> 8.9% and > 20.6%); cane yield (CY) (> 9% and > 16%); NUE (> 1.8% and > 16.6%) and WUE (> 7.13% and > 12.3%) for the 2015/16 and 2017/18 cycles, respectively. This shows that the environmental conditions of the cycle influence the magnitude of the differences between zones, tending to reduce the difference when there were more favorable water balances during the crop cycle. The interaction between handling zones and N dose for TB, CP, WUE and NUE was not significant ($p > 0.05$), which shows that there is no differential use of N by homogeneous handling zones. Increasing the N dose increased TB, WCE, and WUE, and decreased NUE, being all these variables higher in zone 2 than in zone 1. These results show that the implementation of diagnoses and recommendations based on water and nitrogen fertilization requirements in sugar cane according to homogeneous zones would be a promising strategy to increase the efficiency of these resources, improving productivity and reducing the environmental risks associated with their inefficient use.

Keywords: sugar cane; homogeneous handling zones; resource use efficiency; nitrogen fertilization.

CAPITULO 1

Introducción general

1.1 El cultivo de la caña de azúcar

1.1.1 La caña de azúcar en Argentina

La Caña de azúcar (*Sacharum officinarum* spp.) es una gramínea perenne de cosecha anual que se propaga vegetativamente. Constituye el cultivo sacarífero más importante del mundo, responsable del 70% de la producción total de azúcar. A nivel comercial, su cultivo se extiende hacia los trópicos y sub-trópicos, en más de 100 países situados entre los 36,5° de latitud norte hasta los 31,0° de latitud sur (Meyer et al., 2011).

En Argentina, la producción de caña de azúcar se concentra en las provincias de Tucumán (60-65%), Salta-Jujuy (35%) y Santa Fe-Misiones (1%) (Romero et al., 2009). El cultivo se realiza a lo largo de los 12 meses del año, en una superficie aproximada de 360 mil hectáreas (promedio de los últimos 10 años) (Pérez et al., 2007), en tanto que la actividad fabril ocupa seis meses, entre mayo y noviembre (Centro Azucarero Argentino, 2017). La producción en el noroeste de Argentina (NOA) representa el 99,5% del total de la producción de azúcar del país. En esta región, la actividad industrial la desarrollan 20 ingenios azucareros, cuya producción equivalente es de 2,2 a 2,5 millones de toneladas de azúcar, de las cuales 1,6 a 1,7 millones se destinan para el consumo interno y el excedente de 0,5 a 0,9 millones se destina a la exportación. Además del azúcar, también se obtienen 690 millones de litros de etanol de caña de azúcar y 100 MW/h por cogeneración eléctrica a partir de la biomasa del residuo de la caña de azúcar (Centro Azucarero Argentino, 2017).

Aunque es posible encontrar cañaverales de más de ocho años con buena o aceptable producción, por lo general el ciclo de cultivo de la caña de azúcar dura entre cuatro a seis años (Vicini et al., 2010). En este ciclo, el primer año del cultivo posterior a la plantación se denomina "caña planta", mientras que los rebrotes posteriores a la primera cosecha se denominan "caña soca". El órgano de cosecha de interés comercial es el tallo, que posee sacarosa industrializable. La composición química de los tallos es extremadamente variable en función de diversos factores como la variedad, la edad fisiológica, las condiciones climáticas durante el desarrollo y maduración, las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo tanto como el manejo del cultivo (Marques et al., 2001).

1.1.2 Fenología

El conocimiento de las fases fenológicas de la planta es esencial para maximizar los rendimientos de caña y la recuperación del azúcar (Hunsigi, 2001). De acuerdo con Diola y Santos (2010), la fenología de la caña de azúcar se divide en cuatro fases de desarrollo: a) emergencia y establecimiento de la población inicial de tallos primarios; b) macollaje, periodo comprendido entre el final del establecimiento del cultivo hasta los 120 días después de plantación (caña planta) o rebrote (caña soca); c) gran crecimiento, fase que se inicia inmediatamente después del macollaje y que se extiende hasta los 270 días después de realizada la plantación o rebrote; d) maduración, fase en la que se produce la síntesis y acumulación de azúcar, que por lo general dura desde el fin del gran crecimiento hasta 360 días después de la plantación o rebrote.

La fase de emergencia y establecimiento de la población inicial de tallos primarios se caracteriza por la emergencia sucesiva y la estabilización temporal de tallos primarios. La magnitud, ritmo y uniformidad de la emergencia, y una adecuada distribución espacial de los tallos primarios en el surco, son los factores que determinaran el éxito de esta fase (Romero et al., 2009).

La fase de macollaje se caracteriza porque durante la misma se establece el número potencial de órganos cosechables. Su principal característica es el rápido aumento de la población total de tallos, mientras que la altura media de los mismos se mantiene estable hasta la mitad de esta fase. Posteriormente, se registra un drástico cambio en el ritmo de elongación de tallos, que coincide con la finalización del macollaje y el cierre del cañaveral. Diola y Santos (2010) describen al macollaje como un proceso fisiológico de ramificación subterránea continuo de los nudos, donde macollos formados tempranamente ayudan a producir tallos más gruesos y más pesados, en tanto que los formados tardíamente mueren o permanecen cortos o inmaduros. El número máximo de macollos se alcanza entre los 90 y 120 días posteriores a la plantación o rebrote. Los factores ambientales que regulan esta fase son la radiación solar incidente, el régimen térmico, la disponibilidad de agua y nutrientes (especialmente el nitrógeno), las características de la variedad, la competencia con malezas, los efectos de plagas y enfermedades, entre otros. Además, durante esta fase ocurre la generación del sistema radicular adventicio y definitivo del cañaveral. (Romero et al., 2009)

La fase de gran crecimiento comienza cuando el cultivo intercepta el 70% de la radiación solar fotosintéticamente activa (Inman-Bamber, 1994). Esta fase se caracteriza por elevadas tasas de crecimiento y elongación de entrenudos (Van Dillewijn, 1952; Sinclair et al., 2005), aumento del peso fresco de los tallos y la expansión del área foliar, por lo que en gran medida se determina el peso fresco final por tallo (Romero et al., 2009). En la misma, se produce la mortalidad de gran parte de los tallos diferenciados en el macollaje. Con el cierre del cañaveral (finalización de la fase de macollaje), se desencadena una condición de

severa competencia que deriva en la muerte de tallos, por lo que ocurre una disminución significativa de la población de tallos establecida al término del macollaje, quedando así definido el número final de tallos molibles. Los porcentajes de mortalidad registrados pueden variar entre un 25 a un 70%, dependiendo de la variedad, edad del cañaveral y condiciones ambientales. Singels y Smit (2005) y Vasantha et al. (2012; 2014) sostienen que el número final de tallos se establece luego de la mortalidad del 25 al 40% del número máximo de tallos establecidos durante el macollaje. Saez et al. (2017), en Argentina, reportó rangos de mortalidad de tallos de 23 a 38 y 45 a 56% para caña planta y soca 1, respectivamente. Esta variabilidad depende de la influencia de factores genéticos, ambientales (temperatura, humedad y radiación) y de manejo (riego, fertilización y edad del cañaveral). El estrés hídrico reduce la longitud internodal, mientras que temperaturas sobre 30 °C con humedad ambiental cercana al 80% son adecuadas para un buen crecimiento (Benvenuti, 2005).

La fase de maduración es en la que se define el contenido final de sacarosa en los tallos y la producción de azúcar por unidad de área. Su ocurrencia se relaciona con una progresiva disminución del ritmo de elongación de tallos y el mantenimiento temporal de un área foliar fotosintéticamente activa, la cual disminuye progresivamente asociada con la senescencia. En el ritmo del envejecimiento foliar influyen la disponibilidad de agua y nutrientes, la radiación solar incidente y, en gran medida, la ocurrencia de bajas temperaturas. En esta fase se requiere un bajo contenido de humedad del suelo, por lo que el riego debe ser reducido y luego detenerse para llevar la caña a la madurez. Bajo estas condiciones ambientales, se detiene el crecimiento y se propicia la acumulación de carbohidratos y la conversión de azúcares reductores (glucosa y fructosa) a sacarosa (Pereira Leite, 2009). Los cultivares constituyen un factor de gran importancia en la maduración, registrándose entre ellos diferencias en la modalidad y en la producción de azúcar por unidad de superficie (Romero et al., 2009).

1.1.3 Requerimientos ambientales

La caña de azúcar crece satisfactoriamente en una gran variedad de tipos de suelos, pero los más adecuados son los de textura franco o franco-arcillosa con buen drenaje. Tolera un amplio rango de acidez y alcalinidad, obteniéndose altas producciones en suelos con pH entre 5 y 8. Con pH menores a 5 y mayores a 8, la acidez del suelo y los problemas de alcalinidad y salinidad se convierten en factores limitantes de la producción. Los suelos tienen que estar bien provistos de nutrientes ya que es un cultivo que extrae grandes cantidades de nitrógeno (N), potasio y silicio (Romero et al., 2009).

La caña de azúcar es una planta que no tolera temperaturas de congelamiento (bajo 0 °C), y el crecimiento prácticamente cesa por debajo de los 10-12 °C. Cada fase fenológica presenta diferentes requerimientos térmicos. En la fase de emergencia y establecimiento de

la población inicial de tallos, la brotación se inicia o activa con temperaturas superiores a 10 °C, pero la velocidad de emergencia es baja hasta los 16-18 °C. Las temperaturas óptimas de brotación y macollaje fluctúan entre los 28-32 °C, pudiendo presentar diferencias entre las distintas variedades (Romero et al., 2009). Las temperaturas base rondan los 11,5 a 13 °C para distintas edades y genotipos (Liu et al., 1998). Los rangos de duración en tiempo térmico desde la plantación hasta el pico de macollaje varían con el genotipo, siendo los mismos de 1600 a 1800 °Cd para caña planta y de 1250 a 1363 °Cd para caña soca (Inman-Bamber, 1994; Liu et al., 1998).

Durante la fase de gran crecimiento, las temperaturas inferiores a 16-17 °C afectan el crecimiento vegetativo, manifestando su óptimo térmico entre 28-35°C. La caña de azúcar puede soportar temperaturas máximas de hasta 45-50°C, pero con importantes retrasos en el crecimiento. La duración del período con condiciones térmicas adecuadas influye significativamente en la capacidad productiva del cañaveral, por lo que la selección de variedades acordes a la región agroecológica en la que se desarrollará el cultivo es sumamente importante (Romero et al., 2009).

La radiación solar es un factor ambiental fundamental por su incidencia en la actividad fotosintética, la que determinará el nivel de crecimiento y la acumulación de materia seca. En general, intensidades crecientes de radiación lumínica se asocian con incrementos en el rendimiento cultural y de azúcar por unidad de superficie, ya que este cultivo ha evidenciado ser de las especies más eficientes en responder a elevadas intensidades lumínicas (Romero et al., 2009).

Es un cultivo con altos requerimientos hídricos, ya que posee alta producción de biomasa por unidad de superficie. Para producir un gramo de materia seca de tallo molible requiere 0,5 L de agua, y con igual cantidad de agua se acumulan entre 0,25 a 0,40 g de sacarosa. Se necesitan entre 1000 y 1600 mm durante todo el ciclo para satisfacer las necesidades hídricas del cultivo, aunque el rango de zonas donde se cultiva caña de azúcar a secano varía de 700 a 2000 mm anuales. El consumo de agua varía en cada fase de crecimiento, presentando el máximo requerimiento durante el período de gran crecimiento (Romero et al., 2009).

1.1.4 Nitrógeno

Dentro de los principales factores ambientales y de manejo que determinan el rendimiento de la caña de azúcar se encuentra el N (Glass, 2003).

De los elementos que la caña de azúcar obtiene del suelo para satisfacer sus necesidades nutricionales, el N es el nutriente esencial que más limita su desarrollo ya que el mismo determina el comportamiento productivo de la planta, y con ello, los rendimientos agroindustriales del cultivo (Anderson, 1997; Quintero, 1997; Wood, 1992). El N es uno de

los 16 nutrientes esenciales para las plantas y es requerido relativamente en grandes cantidades (1,3-1,5 kg N ton⁻¹) en cultivos como la caña de azúcar (Calcino, 1994). Es un elemento clave ya que participa en numerosos procesos metabólicos, es un componente esencial de los aminoácidos, de los ácidos nucleicos, la clorofila y otros pigmentos, e interviene en procesos enzimáticos (Pérez, 2011; Romero et al, 2004).

Una adecuada disponibilidad de N, asegura un establecimiento temprano de una población inicial de tallos óptima, con una distribución uniforme y con mínimas fallas. A su vez, genera un mayor y más rápido macollaje y una menor mortandad de los mismos (mayor población de tallos), asegurando la conformación de cañaverales con una elevada población de tallos molibles, componente de máxima importancia en la definición del rendimiento. El N también favorece el crecimiento vegetativo, lo que permitirá obtener un mayor rendimiento en caña y en azúcar por unidad de superficie (Romero et al., 2009; Romero et al., 2004).

La deficiencia de N en caña de azúcar provoca retraso en el crecimiento, baja generación de macollos, alta mortalidad de macollos, tallos delgados y raquíticos, lo que trae aparejado bajos rendimientos a cosecha. En casos de déficits importantes, se presenta un síntoma visible que es el amarillamiento de las hojas, el cual se produce desde la base de la planta hacia el ápice de la misma. Los síntomas de deficiencia aparecen primero en las hojas viejas debido a la movilidad de este elemento en la planta (Pérez, 2011).

El exceso de N puede llevar a un crecimiento vegetativo prolongado y una concentración reducida de sacarosa, principalmente debido al aumento del contenido de agua en los tallos (Muchow y Robertson, 1994). Altas concentraciones de N durante la maduración del cultivo pueden también conducir a mayores cantidades de azúcares reductores en el jugo (Das, 1936) y producir compuestos fenólicos durante el proceso de molienda, los cuales pueden oscurecer el jugo y dificultar el proceso de refinado del azúcar (Keating et al., 1999).

Por lo mencionado, la fertilización nitrogenada constituye una práctica cultural de máxima importancia para que los cañaverales alcancen altos rendimientos, ya que tiene una incidencia directa sobre la productividad del cultivo y calidad del producto de cosecha. Un correcto balance nitrogenado puede conducir a aumentos en el rendimiento que oscilan entre el 10 y el 40% (Romero et al., 2004). Por lo tanto, la nutrición nitrogenada es considerada como uno de los factores más importantes en el aumento de la productividad y longevidad de las plantaciones de caña, lo que hace que este cultivo sea uno de los más fertilizados del mundo. Se debe destacar que, a nivel mundial, la caña de azúcar ocupa el segundo lugar en la dosis de fertilizantes nitrogenados utilizados para la producción del cultivo (216 kg ha⁻¹), comparada con la dosis media de 109 kg ha⁻¹ para otros cultivos (FAO, 2006). Dentro de los aspectos a tener en cuenta para una adecuada fertilización, se deben mencionar la dosis (según la fertilidad del suelo), el momento de aplicación y la edad

del cañaveral (Romero et al., 2004). Los mismos autores determinaron que en suelos fértiles, cuya producción sin fertilización es elevada, se obtuvieron incrementos de rendimiento utilizando dosis relativamente bajas de fertilizante nitrogenado ($46 \text{ kg de N ha}^{-1}$). En cambio, en suelos arenosos, el máximo incremento del rendimiento en caña se logró con una dosis de $92 \text{ kg de N ha}^{-1}$. El momento para realizar la fertilización se relaciona con el ritmo de absorción que tiene la caña de azúcar, la que es máxima en entre inicios del macollaje e inicios del gran crecimiento, donde el cultivo es capaz de absorber más N del que necesita, almacenándolo en sus tejidos (Fogliata, 1995; Romero et al., 2004). Posteriormente, este N es removilizado para ser utilizado en lo que resta de la fase de gran crecimiento, momento de mayor demanda por parte del cultivo, debido a la elongación de tallos (Fogliata, 1995). En cuanto a la edad del cañaveral, la respuesta en caña planta ronda el 50% de los casos, por lo que las mismas son frecuentemente fertilizadas utilizando una dosis de $46 \text{ kg de N ha}^{-1}$. En cañas socas, la respuesta a la fertilización con N es mayor. Además, en casos de socas de elevada edad, la dependencia de la fertilización nitrogenada es importante para prevenir caídas del rendimiento (reducción del rendimiento de hasta el 40%) (Romero et al., 2004).

El 50% del nitrógeno requerido por la caña de azúcar es aportado por la mineralización de la materia orgánica del suelo (Meyer et al., 2007), por lo cual, gran parte del N debería ser aportados por fertilización. Sin embargo, la eficiencia con que la caña de azúcar utiliza este nutriente es relativamente baja, aprovechando solo entre el 20 y el 50% del N aplicado (Fogliata, 1995). Los conceptos de uso eficiente de nutrientes o fertilizantes, generalmente describen que en que magnitud los cultivos o un sistema de producción usan los nutrientes disponibles. Podemos así definir a la eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN) como la proporción de rendimiento (grano o biomasa) por unidad de nitrógeno disponible en el suelo, incluido el nitrógeno del suelo residual presente y el fertilizante nitrogenado; o la eficiencia agronómica de utilización del fertilizante (EAN) como la proporción de rendimiento (grano o biomasa) por unidad de nitrógeno del fertilizante (IPNI, 2007). A su vez, la EUN se puede expresar como el producto entre la eficiencia aparente de recuperación del N (ERN) y la eficiencia fisiológica del N (EFN). La primera mide la absorción de N por el cultivo respecto al N disponible en el suelo o aplicado como fertilizante; la segunda mide eficiencia con la que el cultivo usa el N absorbido para producir producto cosechable (grano o biomasa) (Good et al., 2004, Dobermann, 2007).

Las altas dosis de fertilizante nitrogenado utilizadas a nivel comercial, y la baja EUN, contribuyen a la contaminación del aire y el agua (Sutton et al., 2013). Al ser un elemento con gran movilidad en el sistema suelo-planta, es fácilmente lixiviado hacia las aguas sub-superficiales y freáticas, generando una pérdida del mismo y potencial contaminación ambiental (Isa et al., 2006; Hallberg, 1987). Otros mecanismos de pérdidas son la emisión de amoníaco (NH_3) y de óxido nitroso (N_2O) hacia la atmósfera (Chalco Vera et al., 2017; Mosier et al., 1998), siendo estas emisiones más elevadas de lo esperado en el cultivo de

caña de azúcar en comparación con otros sistemas de cultivo donde se utilizan fertilizantes nitrogenados (Galbally et al., 2005). Además de los problemas medioambientales, las pérdidas de N llevan también a un incremento innecesario de los costos de producción, reduciéndose los niveles de rentabilidad del cultivo. Estos factores han estimulado un mayor énfasis de la investigación en la EUN de la caña de azúcar (Thorburn et al., 2011; Zhao et al., 2014). En este sentido, un mayor conocimiento sobre la EUN nos permitiría reducir significativamente los costos de la fertilización y la liberación de N al medio ambiente, sin afectar negativamente los rendimientos (Hajaria et al., 2013).

La textura del suelo es uno de los factores con gran incidencia en la EUN, ya que determina la disponibilidad de N para las plantas al influir en la mineralización de N, la profundidad y distribución de las raíces (Ahmadi, 2011) y la lixiviación del mismo. Lim et al. (2015) en pepino (*Cucumis sativus* L.) y Ahmadi et al. (2010) en papa (*Solanum tuberosum* L.) encontraron mayores EUN en un suelo de textura franco arcillosa, que en suelos de texturas francas y franco arenosas. A su vez, reportaron que la cantidad de N lixiviado fue mayor en el suelo de textura franco arenosa y menor en el suelo de textura franco arcillosa. Fang y Su (2019) determinaron en maíz que la pérdida de N del fertilizante a través de la lixiviación fue significativamente mayor para los suelos de textura arenosa que para los suelos de textura franco arenosa, mostrando una relación lineal significativa y negativa con el contenido de limo y arcilla en la capa de 0-100 cm. En caña de azúcar, Perego et al. (2012) encontraron que, en suelos de textura arenosa, existía una importante lixiviación de N del fertilizante, y que esta pérdida podría alcanzar gran magnitud si el nitrato estaba presente en el suelo en cantidades superiores a la capacidad de absorción del cultivo. Al no ser adsorbido el N por los coloides del suelo, quedaba en la solución del mismo, siendo susceptible a la lixiviación, especialmente cuando el riego o la lluvia excedían la capacidad de almacenamiento de agua del suelo. La mayor capacidad de almacenamiento de agua de los suelos arcillosos reduce la percolación del agua a través del perfil y, en consecuencia, el arrastre del nitrato a las capas inferiores del suelo (Bortolini, 2000)

Los estudios mencionados demuestran la asociación que existe entre la textura del suelo, la lixiviación de N y la EUN; sin embargo, bajo nuestro conocimiento, este tipo de estudios no se ha realizado en caña de azúcar, cultivo que se caracteriza por un sistema radical de exploración superficial (Smith et al., 2005). Esta característica podría generar que la caña de azúcar utilice el N de manera diferencial al resto de los cultivos. En este sentido, se demostró en maíz que la biomasa de las raíces presentó una relación lineal significativa y negativa con el contenido de arena a una profundidad de 0 a 100 cm (Fang y Su, 2019).

1.1.5 Disponibilidad hídrica

El agua es otro factor fundamental para el desarrollo del cultivo (Parry et al., 2005). La misma es el mayor constituyente de la actividad fisiológica de los tejidos, actúa como

reactivo en los procesos fotosintéticos e hidrolíticos, es solvente para las sales minerales, azúcares y otros solutos, y mantiene la turgencia de las células para su alargamiento y crecimiento (Fogliatta, 1995).

En el cultivo de caña de azúcar, el agua influye en cinco aspectos bien definidos y ligados entre ellos: a) sobre el ritmo semanal de crecimiento que luego se traducirá en tonelaje de caña por hectárea, b) en la fotosíntesis, c) en el aprovechamiento de nutrientes, especialmente del N, d) en favorecer un correcto aprovechamiento y uso de los herbicidas, sobre todo pre-emergentes, y e) sobre la brotación y macollaje. (Fogliatta, 1995). El requerimiento hídrico del cultivo se encuentra entre los 1200 mm y 1600 mm para un ciclo de 10 a 12 meses. Para el NOA, la caña de azúcar se ha cultivado tradicionalmente entre las isohietas de 700 a 1500 mm, por lo cual es evidente que los requerimientos hídricos del cañaveral no resultan completamente satisfechos por las precipitaciones que normalmente ocurren (Pérez et al., 2007), por lo que muchas veces se recurre al riego suplementario.

La mayor parte de la biomasa radicular de la caña de azúcar se encuentra cercana a la superficie, disminuyendo casi exponencialmente con la profundidad del suelo. Generalmente, casi el 50% de la biomasa radicular se concentra en los primeros 20 cm del suelo, y un 85% está en los primeros 60 cm del mismo. (Smith et al., 2005). El crecimiento de las raíces responde a la naturaleza del suelo, que le da elasticidad a la forma y tamaño del sistema radicular. El tamaño y la distribución del sistema radicular se ve fuertemente afectado por la distribución y disponibilidad de agua en el suelo, causando diferencias en la capacidad de los cultivos para explorar las reservas más profundas del suelo (Blackburn, 1984).

Durante la brotación, la emergencia y el establecimiento de la población inicial de tallos, el cultivo requiere menos agua que en otras fases. Sin embargo, una adecuada humedad del suelo genera una emergencia y brotación homogéneas. Escasez de agua en esta fase genera secado de yemas seminales, reduciendo y atrasando la brotación. Por otro lado, excesivas disponibilidades de agua llevan a la podredumbre de las yemas seminales debido a la falta de aireación y al ataque de hongos. De esta manera, tanto los excesos como los deficitarios de agua son perjudiciales para la brotación, causando una baja población de tallos por unidad de área (Netafim, 2011).

Una baja disponibilidad de agua durante las fases iniciales (emergencia y parte del macollaje) debido a primaveras secas, atrasa el desarrollo fenológico y el momento del cierre del cañaveral, momento clave en la estrategia de manejo del cultivo. Sus retrasos a causa del estrés hídrico afectan negativamente el rendimiento cultural, dependiendo su efecto del tipo de suelo, el manejo, la edad del cañaveral, la variedad y las lluvias estivales. El riego suplementario durante este período permite importantes aumentos de la producción, al favorecer el cumplimiento más rápido y efectivo de estas fases, lo que a su

vez propicia el mejor aprovechamiento de las condiciones ambientales más favorables durante el período de gran crecimiento (Digonzelli, 2013).

Cualquier déficit de agua durante la fase de formación de macollos reducirá la producción de los mismos, aumentará su mortalidad y reducirá la población final de tallos, que es un importante componente del rendimiento. Sin embargo, excesos de humedad durante la fase de macollaje es especialmente perjudicial en suelos pesados, ya que coincide con la época de crecimiento activo de las raíces, las cuales son inhibidas por la condición anaeróbica creada en el suelo.

La fase de mayor exigencia en disponibilidad hídrica es la de gran crecimiento, ya que en esta se define el rendimiento cultural, o sea la producción de caña por unidad de superficie. En esta fase, se consume cerca del 60% del total de agua que necesita el cultivo. Déficits hídricos durante esta fase se traducen en pérdidas significativas de la producción (Digonzelli, 2013). Espíndola y Paytas (2015) reportaron para el área cañera de Santa Fé, Argentina, que deficiencias de agua en el inicio de esta fase generan pérdidas del rendimiento de 34,7 a 45,2%, dependiendo de la variedad.

Diversos autores estudiaron las relaciones entre la disponibilidad hídrica y las fases fenológicas del cultivo de caña de azúcar, reportando diferentes períodos de mayor sensibilidad al estrés hídrico. Doorenbos y Kassam (1979) determinaron que el rendimiento es más sensible al estrés hídrico durante las fases de germinación y macollaje, seguido de la fase de gran crecimiento, mientras que la fase de maduración es la menos sensible al estrés hídrico. En este sentido Gascho (1985) afirmó que es necesario durante las fases más tempranas (germinación-emergencia hasta macollaje) que el cultivo disponga de suficiente agua, aunque el uso consuntivo durante este período sea menor que durante la fase de gran crecimiento. Por otra parte, Pene y Edi (1999) mostraron que el rendimiento es más sensible al estrés hídrico durante la fase de gran crecimiento, ya que el cultivo puede recuperarse del estrés hídrico durante la fase de macollaje. En este sentido, Robertson et al. (1999) descubrieron que los cultivos podían recuperarse del estrés hídrico durante la fase de macollaje a través del aumento de las tasas de emergencia de los macollos y las hojas (es decir, restablecer el dosel), siempre que el estrés no fuera demasiado severo y no continuara por mucho tiempo. Afirmando este segundo grupo de estudios, Wiedenfeld (2000) determinó que el rendimiento se vio afectado por el estrés hídrico que se impuso al detener el riego durante seis semanas durante la fase de gran crecimiento del tallo e Inman-Bamber (2004) afirmó que si un periodo de estrés hídrico se extiende durante la fase de activo o gran crecimiento las consecuencias en el rendimiento pueden ser severas. Robertson et al. (1999) también detuvieron el riego durante la fase de gran crecimiento, pero durante un período más prolongado (dos o tres meses), e informaron reducciones significativas del rendimiento. La diferencia de las respuestas de los cultivos probablemente se deba a la amplia gama de severidad del estrés hídrico y duraciones impuestas en cada estudio.

Robertson y Donaldson (1998) e Inman-Bamber (2004) demostraron que un estrés hídrico moderado durante la fase de maduración aumenta el rendimiento de sacarosa. Durante esta fase, el suministro restringido de agua o la ocurrencia de condiciones de estrés hídrico moderado (74-76% de humedad en las vainas de las hojas) son necesarios para producir la maduración del cultivo, debido a la reducción de la tasa de crecimiento vegetativo, que deshidrata a la caña y la fuerza a la conversión total de los azúcares en sacarosa recuperable.

El agua de riego es frecuentemente limitada y es un insumo costoso. Por esta razón, es de gran importancia la determinación de la cantidad óptima de agua necesaria a lo largo del ciclo del cultivo, para lograr una mayor eficiencia en el uso de la misma. Estudios conducidos en varios países han demostrado que, para una determinada condición climática y de suelo, existe una relación lineal entre la producción de caña y el consumo de agua en la temporada (Netafim, 2011). La eficiencia en el uso del agua (EUA) de un cultivo puede ser definida como el rendimiento o producción de biomasa por unidad de agua consumida o utilizada por el mismo (evapotranspiración del cultivo). La misma depende principalmente de características intrínsecas de la especie y/o variedad relacionadas con la capacidad de optimización de los procesos de asimilación de carbono y de evapotranspiración de agua (metabolismo C3 o C4) y de las características del ambiente en el que crece y se desarrolla la planta (demanda atmosférica) (Andrade y Gardiol, 1994; Medrano, 2007).

Las especies C4 presentan menor demanda de CO₂ que las especies C3, lo que les confiere una mayor eficiencia en la economía del agua, lo cual les permite fotosintetizar aun con los estomas parcialmente cerrados y evitar la pérdida de las moléculas de agua; este tipo de fotosíntesis se considera muy eficiente bajo condiciones de altas insolación y temperatura. La presencia de este mecanismo de concentración de CO₂ en las hojas de las especies C4 les otorga una EUA más alta que las especies C3 (Woo y Osmond, 1982; Long, 1999). Se ha estimado que por cada molécula de CO₂ fijada, las plantas C3 deben absorber, transportar y evaporar hacia la atmósfera aproximadamente 500 moléculas de agua, mientras que las especies C4 son más eficientes en el uso del agua y se estima que requieren cerca de 250 moléculas de agua para fijar una molécula de CO₂ (Taiz y Zeiger, 2004). Por ejemplo, para producir una tonelada de papa o trigo (especies C3) se requieren 500 o 900 m³ de agua (Stewart y Howell, 2003), mientras que para producir la misma cantidad de caña de azúcar (especie C4) el requerimiento hídrico es de aproximadamente 90 a 100 m³ de agua. (Torres et al., 2004).

Diversos autores estudiaron las relaciones lineales y significativas entre el uso del agua y el rendimiento de cultivos. Thompson et al. (1967) compararon las respuestas de la caña de azúcar en Sudáfrica a una gama de tratamientos de riego complementarios en dos tipos de suelos (uno arenoso y otro arcilloso). La respuesta del rendimiento al agua aplicada fue similar en ambos sitios y determinaron que las plantas que crecen en suelos de textura

arenosa extraen agua desde regiones más profundas, mientras que en los suelos arcillosos lo hacen en regiones más superficiales, lo que refleja las diferencias relativas en la profundidad de enraizamiento en los dos tipos de suelo. En ambos tipos de suelo, hubo una relación lineal entre la tasa de aumento en la altura de la caña y el uso de agua. De manera similar, Oliveira et al. (2009) en Brasil, encontraron respuestas lineales en el rendimiento con la aplicación de diferentes láminas de riego.

1.2 Manejo de la variabilidad espacio-temporal

El rendimiento de un cultivo es el resultado de la interacción entre la genética, los factores bióticos y abióticos incidentes y el manejo aplicado (Van Ittersum et al., 2003). Estos factores pueden variar en el espacio y en el tiempo, originando así la variabilidad espacial y temporal de los rendimientos, inclusive a nivel del lote (Mulla y Schepers, 1997). La variabilidad espacial expresa las diferencias de rendimiento dentro de un lote para una misma campaña y cosecha, mientras que la variabilidad temporal expresa diferencias de rendimiento dentro de un lote a través del tiempo en distintas campañas (Bongiovanni et al., 2006).

Las variaciones ambientales dentro de los lotes pueden ser naturales (por ejemplo, propiedades físico-químicas del suelo, topografía), aleatorias (por ejemplo, precipitaciones) o de manejo (por ejemplo, fertilización, riego, densidad de siembra) (Hatfield et al., 2000). Entre los atributos físicos del suelo, la variabilidad en la textura, y más precisamente en el tamaño de partícula, presenta gran relevancia ya que influye en numerosas propiedades físico-químicas del suelo como la retención de humedad, el contenido de materia orgánica, la retención de cationes, la infiltración, la lixiviación de nitratos, entre otras. En este sentido, Campbell et al. (1996) en Canadá y Quiroga et al. (2005) en Argentina comprobaron una estrecha relación positiva entre los contenidos de materia orgánica y los contenidos de arcilla de los suelos bajo siembra directa. Un mayor contenido de materia orgánica se asoció a incrementos en la fertilidad y a una mayor capacidad de retención de agua de los suelos en la región Pampeana Semiárida de Argentina (Díaz-Zorita et al., 1999; Quiroga et al., 1999). A su vez, Cox et al. (2003) asociaron un mayor contenido de arcillas al incremento de la capacidad de retención de agua del suelo.

Suelos con diferentes texturas y contenido de materia orgánica presentan diferencias marcadas en el rendimiento de diferentes cultivos. Cox et al. (2003) determinaron que los rendimientos de soja en suelos franco-arcillosos de Mississippi (USA) aumentaron a medida que se incrementaba el contenido de arcillas de los suelos, como consecuencia de una mayor disponibilidad de agua en períodos con precipitaciones inferiores a lo normal. Kitamura et al. (2007) encontraron, en Brasil, que el contenido de arcillas de la capa

superficial del suelo explicó el 7,3% del rendimiento en poroto. Durigon et al. (2009) determinaron que hubo una correlación positiva entre la productividad del arroz y la cantidad de arcilla y los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} retenidos en ella. Montezano et al. (2006) verificaron una correlación lineal positiva entre rendimiento de maíz y los contenidos de arcilla y materia orgánica del suelo. En trigo, incrementos en los contenidos de materia orgánica del suelo aumentaron los rendimientos, en respuesta a una mayor disponibilidad de nutrientes y mejores condiciones de captación, almacenaje y oferta de agua (Díaz-Zorita et al., 1999). Resultados similares fueron descritos por Kravchenko y Bullock (2000) en cultivos de soja y maíz en Indiana (USA).

La variabilidad productiva asociada a variabilidad espacio-temporal del lote ha sido reportada en cultivos como maíz y soja (Bongiovanni, 2002; Sadler et al., 1998; Jaynes y Colvin, 1997), donde gran parte de la variabilidad descripta se asocia a la disponibilidad de agua y a su dinámica (Mulla, 1997). A su vez, Fontana et al. (2006) observaron en la región Pampeana Semiárida de Argentina un comportamiento diferencial del cultivo de trigo en sitios del lote que presentaban diferencias en la composición granulométrica de los suelos. Estos autores determinaron que suelos con granulometrías más finas y mayor espesor, presentaron en promedio mayor contenido de materia orgánica dando lugar a rendimientos más altos y menor respuesta a la fertilización nitrogenada. Sin embargo, la mayoría de los estudios reportan sobre la incidencia de la topografía del terreno en las variaciones del rendimiento de diferentes cultivos (por ejemplo, Kravchenko et al., 2000 en maíz y soja; Timlin et al., 1998 y Bongiovanni, 2002 en maíz).

Las evidencias demuestran la relevancia de considerar las variaciones espacio-temporales en la textura del suelo a nivel de lote para entender las variaciones en el rendimiento de los cultivos. A su vez, la mayoría de estudios explora el efecto de la variación de la topografía en la variación del rendimiento, pero no precisamente la variación de la textura del mismo, menos aún en caña de azúcar. Por lo tanto, las variaciones espacio-temporales del ambiente, y en especial de la textura y el contenido de materia orgánica del suelo, dificultan la toma de decisiones en cuanto al manejo de los cultivos, requiriéndose desarrollar herramientas de diagnóstico adaptadas para el manejo eficiente de la fertilización nitrogenada y el agua.

En las últimas décadas, y con el objetivo de mejorar la eficiencia productiva y optimizar el uso de recursos e insumos, se ha impulsado el desarrollo de tecnologías y conocimientos para manejar la variabilidad espacio-temporal a nivel de lote (Pierce y Nowak, 1999). El conocimiento de esta variabilidad es esencial para el manejo posterior del cultivo (manejo sitio específico o manejo por ambientes), siendo este uno de los objetivos de la agricultura de precisión (AP). El punto de partida de estas tecnologías consiste en delimitar zonas de manejo homogéneas dentro de los lotes de producción (Moral et al., 2010), definiendo a las mismas como la sub-región dentro de un lote que expresa una combinación relativamente homogénea de factores limitantes del rendimiento para lo cual, el aporte de un insumo y/o

práctica de manejo particular es apropiado (Doerge, 1999). Luchiari et al. (2000) establecieron que estas características de homogeneidad en cada una de las zonas de manejo conducen a resultados similares en cuanto al rendimiento potencial del cultivo, eficiencia en el uso de recursos e insumos, e impacto ambiental.

A partir de los avances tecnológicos en materia de software tales como sistemas de información geográfica (SIG), sistemas de posicionamiento global (GPS), sensores y controladores de aplicación, se ha generado un importante auge en la aplicación de la AP (Kemerer, 2011). Estas herramientas contribuyen a integrar y a sintetizar gran cantidad de información a distintas escalas y de diferente naturaleza, lo que permite identificar, con precisión, la potencialidad de cada zona dentro de los lotes de producción. Diferentes capas de información como serie de suelo, análisis físico-químico del suelo, napa de agua, altimetría, conductividad eléctrica aparente (CEa), mapas de rendimiento, fotografías aéreas multiespectrales, e imágenes satelitales, permiten delinear áreas de aptitud productiva similar (Pagani, 2015).

Las fotografías aéreas multiespectrales y las imágenes satelitales se definen como la representación visual de la información capturada por un sensor montado en un satélite artificial (Pérez y Muñoz, 2006). Dentro de las imágenes satelitales que más se utilizan para realizar estas estimaciones podemos mencionar a las que se obtienen de las plataformas satelitales Landsat, Spot, Sentinel y Modis. Mediante la obtención de las imágenes satelitales y el uso de herramientas para su análisis, podemos calcular y determinar una serie de índices de vegetación, entre los cuales se encuentra el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés). Se ha determinado ampliamente que estos índices se relacionan con variables agronómicas como biomasa, índice de área foliar (IAF), cobertura y rendimiento de los cultivos, por lo que resultan útiles para evaluar indirectamente la condición del cultivo (Rouse et al., 1974). En este sentido, variaciones en la calidad de los sitios dentro de un mismo lote productivo, que se traducen en variaciones en la condición del cultivo, pueden ser evaluadas a través de índices espectrales (Kemerer, 2011). A su vez, el IAF puede estar influenciado por la disponibilidad de N, ya que la deficiencia de N genera cambios en todo el patrón espectral (Zhao et al., 2005).

El uso de estos índices de vegetación en el cultivo de caña de azúcar se ha enfocado principalmente a la clasificación de áreas cultivadas, al seguimiento de las zafras, a las estimaciones de la producción, a la discriminación de variedades y a la estimación de variables biofísicas, tomando como referencia trabajos desarrollados en maíz y trigo (Murillo y Carbonell, 2012). Sin embargo, bajo nuestro conocimiento, no se encuentran estudios que evalúen variaciones en la EUN y EUA entre zonas de manejo homogéneas en caña de azúcar y su interacción con la disponibilidad de N adicionado como fertilizante.

1.3 Planteo del problema

La demanda global de productos agrícolas continuará creciendo en el futuro debido al crecimiento poblacional y al aumento de la calidad de la dieta (Andrade, 2016). Por lo tanto, es necesario incrementar el rendimiento de los cultivos y la eficiencia de la producción para lograr compensar este constante incremento de la demanda de alimentos y fibras (IPNI, 2007).

Tradicionalmente, los sistemas productivos han logrado satisfacer las demandas mediante el incremento de sus producciones en base a la expansión agrícola, la mejora genética y la mayor intensidad en el uso de recursos e insumos (plaguicidas, fertilizantes, agua, maquinaria, etc.). Sin embargo, esta situación generó aumentos significativos en el impacto ambiental, generando ambientes degradados y de alta vulnerabilidad (bajos contenidos de carbono en suelo, erosión hídrica y eólica, emisiones de gases con efecto invernadero, acidificación de los océanos, etc.) que requieren cada día más cantidad de insumos y recursos para mantener la productividad (Andrade 2016).

Estas evidencias demuestran que esta estrategia de incrementos de las producciones de alimentos y fibras no es viable social, económica y ambientalmente, por lo que es necesario cambiar la misma para disociar los incrementos de la productividad del impacto ambiental. En este sentido, hoy en día se disponen de numerosas tecnologías de procesos y conocimientos que pueden aportar a generar innovaciones sustentables. Precisamente, la AP es una de estas tecnologías de procesos y conocimiento que buscan satisfacer la demanda futura de alimentos de manera competitiva (aumentando los rendimientos y/o manteniéndolos con menor cantidad de insumos), inclusiva (tecnologías baratas basadas en el conocimiento), equitativas (que sean de aplicación en diversos sistemas de cultivos) y cuidadosas con el ambiente (minimizando el impacto ambiental) (Andrade, 2016).

Para lograr un incremento sustancial en los rendimientos con bajo o nulo impacto ambiental, es necesario incrementar la eficiencia en el uso de recursos e insumos. Esto traería aparejado un incremento en la eficiencia global del sistema, generando mayores beneficios económicos y sustentabilidad a la producción (Ciampitti y Garcia, 2007). La eficiencia en el uso de recursos e insumos (nutrientes, agua, radiación, etc.) describe como las plantas o los sistemas de producción utilizan los recursos e insumos y se las puede definir como la cantidad de biomasa seca total o el rendimiento de un órgano de cosecha en seco (grano, tallo, etc.) producido por unidad de recurso y/o insumo disponible (Chalco Vera, 2012).

En Argentina existe alta variabilidad en el rendimiento cultural promedio de la caña de azúcar, los cuales varían entre 56 a 100 t/ha de caña y de 3,5 a 10 t/ha de azúcar, dependiendo de las condiciones en las que el cultivo se desarrolla (Pérez et al., 2007). Sin embargo, los rendimientos más altos ocurren en menos del 10% de la superficie cultivada

(Scandaliaris et al., 2003). Entre las causas que contribuyen a estas variaciones en el rendimiento se pueden mencionar factores ambientales, estructura de los productores y factores de manejo del cultivo (Ferraro et al., 2009). A su vez, al ser la caña de azúcar un cultivo extensivo que se desarrolla por lo general en grandes superficies, existe alta variabilidad espacio-temporal en el rendimiento. Vicini (2007) menciona que entre las causas de estas diferencias se encuentran las fallas o falta de tallos en el cañaveral, diferencias de relieve dentro del lote (lomas, bajos, etc.) y variaciones en el contenido hídrico y de fertilidad del suelo.

Como se mencionó, dos de los principales recursos/insumos asociados al manejo de los cultivos y que inciden en la productividad de los mismos son el agua y el N (Parry et al., 2005; Glass, 2003). Respecto al fertilizante nitrogenado, la eficiencia de conversión del N en productos cosechables (EUN) promedio de diferentes cultivos a nivel mundial es de 47 % (Lassaleta et al., 2014). El conocimiento de la eficiencia del uso del nitrógeno en diferentes ambientes en caña de azúcar permitiría ajustar de manera adecuada la dosis óptima de fertilización nitrogenada que permita maximizar el retorno económico con el menor impacto ambiental (Chalco Vera, 2012).

El otro recurso/insumo que limita la productividad es el agua, la cual se torna cada día más limitante en el planeta (Wallace y Gregory, 2002). En búsqueda de reducir los efectos de las sequías agrícolas e incrementar la disponibilidad de agua para otros usos, se requiere mejorar la eficiencia de captura y uso del agua, ya sea de las precipitaciones como del agua de riego (Gleick, 2003). Morabito et al. (1998) y Prieto (2006) indican que la eficiencia general del manejo del agua de riego de cultivos en Argentina se sitúa en el rango de 35 a 40%, valores similares a los reportados internacionalmente (Burt y Styles, 1999). Indican, además, que la eficiencia de aplicación y uso a nivel de parcela presenta alta variabilidad.

Las variaciones en la eficiencia en el uso de los recursos e insumos se relacionan con las características propias del ambiente en el que se desarrolla el cultivo, por lo que es importante conocer la interacción entre la eficiencia en el uso de recursos e insumos y las características propias del ambiente. En este sentido, conocer como varía la eficiencia en el uso del agua y del N en sitios de productividad y propiedades edáficas diferentes permitir adecuar las prácticas de manejo con el objetivo de realizar un uso más eficiente de los mismos, generando mayor retorno económico al productor, minimizando el potencial impacto ambiental negativo de la práctica de fertilización.

1.4 Objetivos e hipótesis de la investigación

1.4.1 Objetivo general

Evaluar en caña de azúcar la productividad, eficiencias de uso de agua, de N y sus componentes en zonas de manejo homogéneas.

1.4.2 Objetivos específicos

- ✓ Establecer, mediante muestreos *in-situ* e imágenes satelitales, zonas de manejo (productividad y propiedades edáficas diferentes) dentro de un mismo lote de caña de azúcar.
- ✓ Determinar en cada zona de manejo la biomasa fresca total, el rendimiento cultural y las eficiencias de captura y de uso del agua y nitrógeno.
- ✓ Determinar el efecto de la dosis de nitrógeno sobre la biomasa fresca total, el rendimiento cultural y las eficiencias de captura y de uso del agua y nitrógeno.
- ✓ Determinar si en caña de azúcar existe un aprovechamiento diferencial de la fertilización nitrogenada según zona de manejo.

1.4.3 Hipótesis planteada

- ✓ Zonas de manejo con mayor contenido de materia orgánica y arcilla presentan incrementos en la productividad de la caña de azúcar debido a incrementos en a) la eficiencia de uso de nitrógeno, b) la eficiencia de recuperación del nitrógeno, c) la eficiencia de uso de agua y d) la eficiencia de captura del agua, respecto a zonas de manejo con textura más arenosa y bajo contenido de materia orgánica.
- ✓ Zonas de manejo con mayor contenido de materia orgánica y arcilla permiten un mayor aprovechamiento del fertilizante nitrogenado, respecto a zonas de manejo con textura arenosa y menor contenido de materia orgánica, debido a un mejor aprovechamiento de la humedad disponible.

CAPITULO 2

Materiales y métodos

2.1 Localización y descripción del área de estudio

El estudio se realizó en un lote de caña de azúcar ubicado en la localidad de El Tabacal, departamento Orán, Salta, Argentina (23,2°S 64,2°O), durante los ciclos agrícolas 2015/2016 y 2017/2018 (Figura 1). El clima del lugar es subtropical con estación seca, presentando notables variaciones en sus distintas regiones, como consecuencia de su relieve variado. El área está caracterizada por una temperatura media anual de 21,4 °C, con veranos calurosos (con un rango de temperaturas medias para esta época de 21 a 35 °C y temperaturas máximas de hasta 45 °C) y húmedos (78% H.R.), e inviernos templados (rango de temperaturas medias para esta época de 8,3 a 24 °C) con baja frecuencia de heladas (Arias y Bianchi, 1996). La orientación de sus cordones montañosos influye en la distribución de las precipitaciones que se concentran en verano durante los meses de noviembre a marzo, y oscilan entre 800 a 1.300 mm anuales (Bianchi y Yañez, 1992).

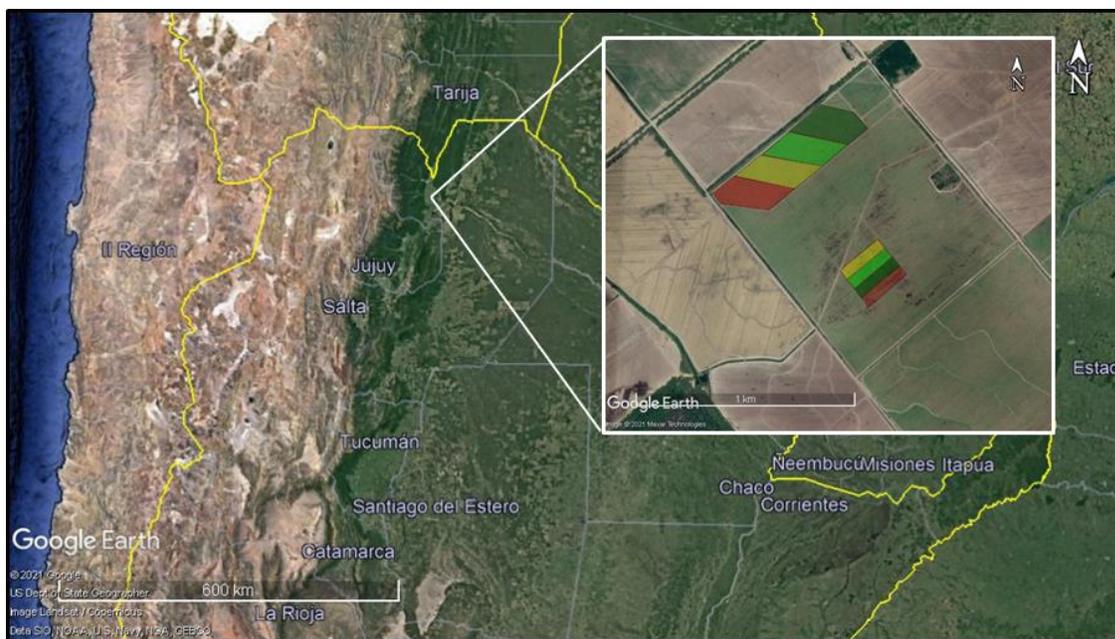


Figura 1. Localización del sitio experimental, El Tabacal, departamento de Orán, Salta, Argentina.

2.2 Descripción general del ensayo

El cultivo fue plantado en 2013 con la variedad NA 97-3152, por lo que al inicio del ensayo (ciclo 2015/2016) el mismo tenía dos años de edad (soca 1). Esta variedad se caracteriza por ser vigorosa, con una capacidad de macollaje media, porte erecto, brotación rápida, maduración tardía, y ausencia de floración para nuestras condiciones ambientales (Germán Serino, comunicación personal, 2019). Presenta una alta capacidad productiva, tanto de biomasa como de azúcar. Esta variedad representa en la actualidad el 27, 15 y 6% de la superficie cultivada de los ingenios El Tabacal, Rio Grande y Ledesma, respectivamente (Fernando Yañez, comunicación personal, 2019).

2.2.1. Delimitación de zonas de manejo homogéneas

El primer paso para garantizar una delimitación óptima de las zonas de manejo homogéneas fue la selección de imágenes satelitales de acuerdo a Kemerer (2011). La selección se basó en imágenes multiespectrales Landsat 8 con una resolución espacial de 30 por 30 metros y de fechas en las que el cultivo manifestó la máxima reflectancia, es decir, alcanzó el pico de crecimiento.

Las imágenes satelitales se obtuvieron de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) y del United States Geological Survey (USGS). Para la delimitación de cada zona, se utilizaron imágenes de hasta tres años de antigüedad y se efectuó una comparación entre imágenes de fechas con y sin cultivo. Para el segundo ciclo agrícola, se utilizaron las mismas imágenes que en el primer ciclo e imágenes Planet de una resolución de 3 por 3 metros provistos por la plataforma web Taranis.

Se evaluaron 3 lotes de producción y la selección del lote y la delimitación de zonas de manejo homogéneas se realizaron a partir del cálculo del NDVI. Se eligió el NDVI para realizar la zonificación ya que este índice está directamente relacionado con el vigor y la productividad del cultivo, y es útil para determinar la variabilidad dentro del lote y delimitar zonas homogéneas. Dado que los índices son algoritmos que involucran dos o más bandas espectrales, el NDVI se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{\text{Infrarrojo} - \text{rojo}}{\text{Infrarrojo} + \text{rojo}}$$

Se seleccionó el lote A54 ya que el mismo contaba con datos históricos y actuales de imágenes satelitales, y además presentaba alta variabilidad espacial, características deseadas para el ensayo (Figura 2).



Figura 2. Lote seleccionado (A54) para realizar el ensayo. Las zonas homogéneas 1 y 2 representan zonas con diferente NDVI y propiedades físico-químicas del suelo.

La delimitación de zonas de manejo homogéneas se realizó empleando el método de clasificación no supervisada mediante el programa Qgis. Este método consiste en agrupar clases espectrales (valores de píxeles similares) presentes en la imagen y no implica ningún conocimiento previo del área de estudio. Estos grupos presentan píxeles con un comportamiento espectral homogéneo y, por tanto, definen clases temáticas de interés (Chuvienco, 1996). Una vez delimitadas las zonas de manejo homogéneas, se caracterizó edáficamente las mismas para corroborar la existencia de diferencias en parámetros edáficos entre las mismas. Para ello, se realizó un análisis físico-químico detallado del perfil del suelo, mediante el cual se determinaron el contenido de nitrógeno, fósforo y potasio, la conductividad eléctrica, la textura, la materia orgánica y el pH. La Figura 3 muestra las dos zonas homogéneas intra-lote (Zona 1 y Zona 2, respectivamente) con diferentes propiedades edáficas y NDVI, pero que mantenían el resto de condiciones de manejo homogéneas (variedad, edad del cañaveral, manejo de la fertilización y del riego, control de malezas, etc.).

2.2.2 Ciclo agrícola 2015/16

Durante el ciclo agrícola 2015/16 se analizó el efecto de la zona homogénea (zonas 1 y 2) sobre la productividad y eficiencia en el uso del N y agua. Se realizaron dos riegos

aplicando una lámina complementaria total de 176 mm y se fertilizo con 250 kg ha⁻¹ de urea granulada (46-0-0) (115 kg de N ha⁻¹) aplicada entre las fases fenológicas de establecimiento de la población inicial de tallos y macollaje. En cada zona homogénea (tratamiento), se delimitaron 10 sitios o repeticiones para captar la variabilidad intrínseca de cada una de ellas, por lo que se utilizó un diseño completamente aleatorizado con 10 repeticiones y se generaron 20 unidades experimentales.

2.2.3 Ciclo agrícola 2017/18

Durante el ciclo agrícola 2017/18 se continuó con el ensayo realizando una exploración más intensiva de las zonas, buscando mayor uniformidad en la respuesta de los atributos del rendimiento y de eficiencia. Para ello, se analizaron diferentes niveles de fertilización con N en cada una de las zonas homogéneas. En este ciclo agrícola, y para disminuir la alta variabilidad producida por las propiedades del suelo intra-zona, se seleccionaron los sitios donde el contraste entre productividad y tipo de suelo en el primer ciclo agrícola fue mayor (Figura 3 y 22). Durante este ciclo agrícola, se aplicó una lámina de agua complementaria total de 150 mm distribuidos en dos riegos. El experimento consistió en cuatro tratamientos de fertilización nitrogenada en cada una de las zonas homogéneas (Figura 3). Las dosis de N fueron 0, 58, 115 y 173 kg ha⁻¹ de N aplicados como urea granulada entre las fases fenológicas de establecimiento de la población inicial de tallos y macollaje. Para la elección de estos valores se tomó en cuenta la dosis comercial más frecuentemente utilizada en el cultivo (115 kg ha⁻¹ de N) y a partir de esta se determinaron una dosis menor y otra mayor. (58 y 173 kg ha⁻¹ de N respectivamente), además del tratamiento testigo sin fertilizar (0 kg ha⁻¹ de N). Se utilizó un diseño en franjas con tres pseudo-repeticiones y arreglo factorial (dos zonas y cuatro dosis de nitrógeno), generándose 24 unidades experimentales. Cabe aclarar que las pseudo-repeticiones son muestras tomadas en distintos sectores de cada franja correspondiente a cada uno de los tratamientos de fertilización, dada la estructura del manejo de los lotes por parte de la empresa, no se podía disponer de réplicas verdaderas. Las franjas experimentales fueron de 33 surcos por 100 m para la zona 1 y 234 surcos por 100 m para la zona 2. Tanto el diseño experimental como el tamaño de las franjas se debieron a cuestiones operativas de la empresa a la hora de aplicar el fertilizante (Figura 5).

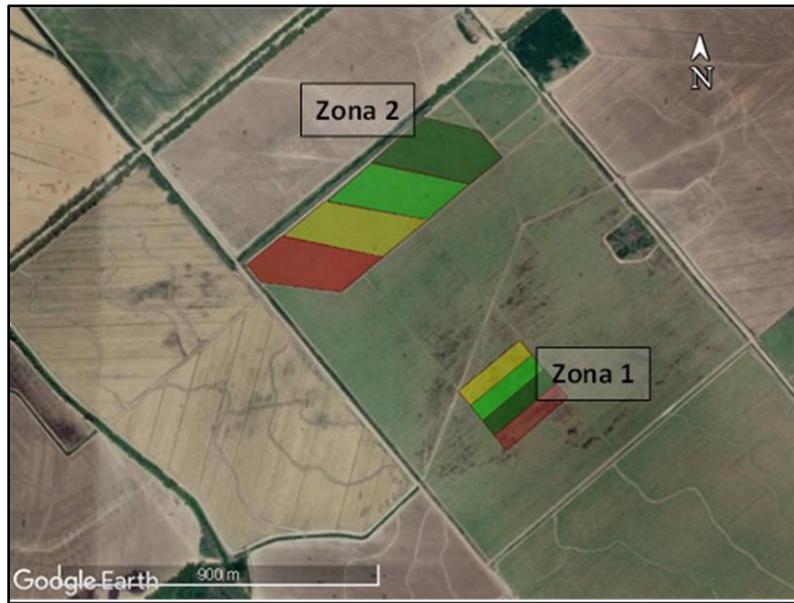


Figura 3. Ubicación de los tratamientos de fertilización con nitrógeno en cada una de las zonas de manejo.

2.3 Determinaciones de suelo y planta

En cada unidad experimental (20 para el ciclo 2015/16 y 24 para el ciclo 2017/18), se realizó un muestreo al azar de biomasa aérea total y de suelo en las fases fenológicas de establecimiento de la población inicial, macollaje, gran crecimiento y maduración (Tabla 1). En el muestreo de establecimiento de la población inicial, los sitios de muestreo se georreferenciaron para extraer de zonas cercanas en los subsiguientes muestreos.

Tabla 1. Muestreos realizados durante los ciclos agrícolas 2015/16 y 2017/18.

Ciclo	Fecha	Fase fenológica	Suelo	Biomasa
2015/2016	11/11/2015	Muestreo inicial	X	
	03/12/2015	Establecimiento población inicial	X	X
	05/01/2016	Macollaje	X	X
	26 y 27/05/2016	Gran crecimiento	X	X
	12 y 13/09/2016	Maduración	X	X
2017/2018	14/11/2017	Muestreo inicial	X	
	14/12/2017	Establecimiento población inicial	X	X
	24/01/2018	Macollaje	X	X
	15/05/2018	Gran crecimiento	X	X
	11/09/2018	Maduración	X	X

2.3.1 Muestreo de suelo

Los muestreos de suelos periódicos durante las cinco fases fenológicas consistieron en extraer muestras hasta el metro de profundidad en las mismas zonas que para biomasa. Durante el ciclo 2015/2016 las muestras se tomaron a cuatro profundidades diferentes (0-25; 25-50; 50-75; 75-100 cm), mientras que para el ciclo 2017/2018 las muestras fueron tomadas solo a dos profundidades (0-25; 25-50 cm). Esta diferencia se debió a que los análisis de suelo y la dinámica de nutrientes en las mayores profundidades (50-75; 75-100 cm) durante el ciclo 2015/2016 no mostraron valores relevantes. De cada muestra y profundidad, se calculó el contenido de humedad gravimétrica con una sub-muestra de aproximadamente 100 g de suelo. Para esto, se pesaron las muestras húmedas y después se llevaron a una estufa de secado con circulación forzada de aire durante 48 horas a 105 °C. A partir de estos valores, y utilizando la densidad aparente de cada estrato de suelo, la que fue determinada para cada zona, se calculó la lámina de agua disponible en el suelo mediante las siguientes formulas:

$$H^{\circ} grav. = (PF - PS) / (PS - Pb)$$

$$H^{\circ} vol. = H^{\circ} grav. \times D.A.$$

$$Lam. = H^{\circ} vol. \times Prof.$$

Dónde:

$H^{\circ} grav.$: humedad gravimétrica (g de agua g de suelo⁻¹)

PF : peso fresco de la muestra (g de suelo)

PS: peso seco de la muestra (g de suelo)

Pb: peso de la bandeja (g)

H° vol: humedad volumétrica (cc de agua cc de suelo⁻¹)

D.A.: densidad aparente del suelo (g cm⁻³)

Lam.: lamina o contenido de agua en el suelo (mm)

Prof: profundidad de muestreo (cm)

En el primer ciclo agrícola, en uno de los 10 puntos de muestreo de cada zona, y para todas las fechas de muestreo, se realizó el muestreo de suelo hasta los dos metros de profundidad, de manera tal de determinar si existió consumo de agua por parte del cultivo más allá del metro de profundidad. Estas muestras tuvieron ocho profundidades (0-25; 25-50; 50-75; 75-100; 100-125; 125-150; 150-175; 175-200 cm).

Se determinó el contenido de nitrato y amonio por el método de microdestilación por arrastre de vapor, para cada una de las profundidades de cada punto de muestreo y para todas las fechas de muestreo. Esta técnica ha sido descrita y recomendada para la determinación de formas inorgánicas de N en suelos por Keeney y Nelson (1982). La misma permite la cuantificación de las formas minerales de N a concentraciones tan bajas como 0,1 mg L⁻¹. La determinación de las formas inorgánicas de N requiere previamente la preparación de un extracto de suelo con una solución que recupere cuantitativamente el amonio intercambiable (NH₄⁺), el nitrito (NO₂⁻) y el nitrato (NO₃⁻) presentes en la muestra. El amonio se estima a partir de la liberación de amoníaco por destilación de una alícuota de extracto de suelo con un compuesto alcalino (MgO), y el nitrato más el nitrito son estimados a partir de la liberación de amoníaco por destilación de la misma alícuota con un agente reductor (aleación Devarda). Posteriormente, el amoníaco liberado por destilación es recibido en una solución de ácido bórico (indicador) y determinado por titulación con ácido sulfúrico. A partir de estos datos, y utilizando los valores obtenidos de humedad gravimétrica, densidad aparente y factores de corrección, se calculó la cantidad de N en el suelo para cada muestra mediante la siguiente fórmula:

$$N_{suelo} = \frac{((100 + H^{\circ}) \times NO_3)}{100 - H^{\circ}} * \frac{D.A. \times Prof. \times T}{4,43 \times 10} + \frac{((100 + H^{\circ}) \times NH_4)}{100 - H^{\circ}} * \frac{D.A. \times Prof. \times T}{1,3 \times 10}$$

Dónde:

N suelo: cantidad de N en el suelo (kg N ha⁻¹)

H° : humedad gravimétrica (g de agua g de suelo⁻¹)

NO_3 : concentración de nitrato en la muestra de suelo (ppm)

NH_4 : concentración de amonio en la muestra de suelo (ppm)

$D.A$: densidad aparente (g cm⁻³)

$Prof$: profundidad de muestreo (cm)

T : factor de corrección (10) por % de suelo (%)

4,43 y 1,3: factores de corrección para NO_3 y NH_4 , respectivamente.

La medición de los otros parámetros físico-químicos se realizó con las siguientes técnicas de laboratorio: 1) El fósforo (P) soluble se midió por el método de Bray. Este método se basa en la extracción de las formas de fósforo fácilmente solubles, principalmente fosfatos de calcio y una fracción de los fosfatos de aluminio y hierro, con la combinación de ácido clorhídrico y fluoruro de amonio. 2) la disponibilidad actual de potasio (K) se realizó por el método del Cloruro de Calcio, el cual estima el K de la solución del suelo y el método de Acetato de amonio que estima el K intercambiable. 3) se determinó la conductividad eléctrica (C.E.) mediante la utilización de un conductímetro sobre una muestra de extracto de suelo. 4) El pH se determinó por el método potenciométrico 6) La textura se determinó por el método del densímetro de Bouyoucos, que se basa en la diferente velocidad de sedimentación de las partículas del suelo en función de su tamaño. Una vez determinados los correspondientes porcentajes de arena, limo y arcilla de una muestra de suelo, se determina la clase textural mediante el uso del triángulo textural. 7) La determinación de la materia orgánica se realizó de manera cuantitativa, analizando el carbono orgánico oxidable por el método de Walkey y Black.

2.3.2 Muestreo de biomasa fresca y seca total

En todas las fases fenológicas, se realizó un corte al ras del suelo de toda la biomasa total en dos metros lineales (3,2 m²). Se determinaron el número de tallos (NT) y la biomasa fresca total (BT). Del total de tallos muestreados, se tomaron sub-muestras homogéneas correspondientes al 20% del total para determinar la materia seca total (MST), de láminas de las hojas y de tallos (incluyendo vainas de las hojas), para lo que se utilizó una estufa de secado por circulación forzada de aire a 60 °C hasta obtener un peso constante. Posteriormente, las sub-muestras se molieron y el contenido de N se determinó por el método de Kjeldahl. Este método de análisis químico es empleado para determinar el contenido en nitrógeno de una sustancia y el mismo consiste en tres pasos: digestión, destilación y titulación. En el primer paso se oxida el material vegetal generando como

producto sulfato de amonio, para lo que se utiliza un digestor que alcanza temperaturas superiores a los 300 °C y ácido sulfúrico como insumo de la digestión; en el segundo paso se destila el producto obtenido en el primer paso (en forma de amoniaco) mediante la utilización de un destilador semi-automático con la utilización de hidróxido de sodio y fenolftaleína (como indicador) hasta alcanzar un medio alcalino; en el tercer paso se realiza la titulación manual del producto obtenido en el segundo paso, empleando una microbureta y ácido clorhídrico hasta que el indicador vire nuevamente su color. Los resultados obtenidos se expresan en miligramos de nitrógeno por gramo de material analizado (Nielsen, 1998).

A su vez, en el muestreo de maduración, se determinaron todos los componentes del rendimiento: BT, NT, peso medio de tallos, rendimiento de la caña (rendimiento cultural). Al igual que en todos los muestreos durante el ciclo del cultivo, se determinaron la MST, de tallos y de hojas utilizando una sub-muestra del 20% del total de la misma.

2.3.3 Cálculo de eficiencias en el uso de recursos e insumos

Para ambos ciclos agrícolas, se calcularon las eficiencias en el uso del agua y nitrógeno para el ciclo completo del cultivo, para lo cual se utilizaron y analizaron los datos de la MST (incluido su contenido de N) y de los contenidos de humedad y nitrógeno del suelo.

El agua utilizada (AU), la eficiencia de captura del agua (ECA) y la eficiencia del uso del agua (EUA) se calcularon mediante las siguientes formulas:

$$AT = Ai + Pp + R$$

$$AU = Ai + Pp + R - Af$$

$$EUA = MST/AU$$

$$ECA = AU / (Pp + R)$$

Dónde:

AT: agua total para el cultivo (mm) aportada por el suelo, riego y las precipitaciones

AU: agua utilizada por el cultivo (mm)

Ai: contenido inicial de agua del suelo (mm)

Pp: precipitación efectiva durante el ciclo del cultivo (mm)

R: riego (mm)

Af: contenido final de agua del suelo (mm)

EUA: eficiencia en el uso del agua (kg MST mm⁻¹)

ECA: eficiencia de captura del agua (adimensional)

MST: materia seca aérea total (kg ha⁻¹)

La eficiencia en el uso de nitrógeno (*EUN*) y el N total disponible en el suelo se calcularon mediante las fórmulas:

$$EUN = \frac{MST}{Nd}$$

$$Nd = Ni + Nfert + Nm$$

Dónde:

EUN: eficiencia en el uso de nitrógeno (kg MST kg N⁻¹)

MST: materia seca aérea total (kg ha⁻¹)

Nd: nitrógeno total disponible en el suelo (kg N ha⁻¹)

Ni: nitrógeno inicial presente en el suelo (0-100 cm) antes de la siembra (kg N ha⁻¹)

Nfert: nitrógeno aportado por el fertilizante (kg N ha⁻¹)

Nm: nitrógeno mineralizado (kg N ha⁻¹).

Como N mineralizado se utilizó el valor de 78,2 kg N ha⁻¹ obtenido de otro trabajo en caña de azúcar en Argentina (Acreche, 2017).

Además, se calcularon las eficiencias de recuperación (*ERN*) y fisiológica del N (*EFN*). La primera se define como la capacidad que tiene el cultivo de absorber el nitrógeno disponible, mientras que la segunda representa la habilidad del cultivo para transformar el nitrógeno absorbido en biomasa. Para sus cálculos se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$ERN = N \text{ en la } MST / Nd$$

$$EFN = \frac{MST}{N \text{ en la } MST}$$

Dónde:

ERN: eficiencia de recuperación del nitrógeno (kg N kg N⁻¹)

EFN: eficiencia fisiológica del nitrógeno (kg kg N⁻¹)

N en la MST: kg de nitrógeno presentes en la MST (kg N ha⁻¹)

MST: materia seca aérea total (kg ha⁻¹)

Nd: nitrógeno total disponible en el suelo (kg N ha⁻¹)

En el caso particular del ciclo agrícola 2017/18, se calculó la eficiencia agronómica de utilización, recuperación y fisiológica del fertilizante.

$$EAN = (MST_{NX} - MST_{N0}) / N_{NX}$$

$$ERN_{fert} = (N \text{ en la } MST_{NX} - N \text{ en la } MST_{N0}) / N_{NX}$$

$$EFN_{fert} = (MST_{NX} - MST_{N0}) / (N \text{ en la } MST_{NX} - N \text{ en la } MST_{N0})$$

Dónde:

EAN: eficiencia agronómica del fertilizante (kg MST kg N⁻¹)

ERN_{fert}: eficiencia de recuperación del N del fertilizante (kg N kg N⁻¹)

EFN_{fert}: eficiencia fisiológica del N del fertilizante (kg kg N⁻¹)

N en la MST: kg de nitrógeno presentes en la MST (kg N ha⁻¹) *MST*: materia seca aérea total (kg ha⁻¹)

MST_{N0}: materia seca aérea total del tratamiento N0 (kg ha⁻¹)

MST_{Nx}: materia seca aérea total del tratamiento Nx (kg ha⁻¹)

Nd: nitrógeno total disponible en el suelo (kg N ha⁻¹)

N_{Nx}: dosis de N correspondiente al tratamiento Nx (kg N ha⁻¹)

2.4 Análisis estadístico

Para los datos del primer ciclo agrícola, se realizó un análisis de la varianza (ANOVA) para un diseño completamente aleatorizado, donde se exploraron los efectos de las zonas de manejo (1 y 2). Para los datos del segundo ciclo agrícola, se realizó un análisis de la varianza (ANOVA) para un diseño en franjas con arreglo factorial, donde se exploraron los efectos de las zonas (1 y 2) y de las dosis de nitrógeno (0; 58, 115 y 173 kg N ha⁻¹). En ambos ciclos agrícolas, cuando existieron diferencias entre las zonas, dosis o su interacción, se utilizó la prueba LSD de Fisher (p-valor $\leq 0,05$) para comparar los valores medios de las variables. Además, se realizó el análisis de correlación de Pearson para medir el grado de relación entre las variables BT, MST, RC, PSt, NT, N biomasa, ERN, EFN, EUN, AT, AU, EUA, N suelo y ECA. Se utilizó el software InfoStat (Di Rienzo et al., 2011) para todos los análisis.

CAPITULO 3

Resultados

3.1 Caracterización climática

Los ciclos agrícolas 2015/16 y 2017/18 presentaron diferencias en las variables meteorológicas entre ellos y también con respecto a los promedios históricos de la serie 1961-2006 (Figura 5). En el ciclo agrícola 2015/16 las precipitaciones totales acumuladas durante el ciclo agrícola fueron similares al promedio histórico (+ 3,8%), mientras que durante el ciclo agrícola 2017/18 las precipitaciones fueron sensiblemente inferiores a la serie histórica (- 24,8%). Se destaca que, durante los meses más lluviosos (Enero a Marzo), las precipitaciones acumuladas fueron 24,3% mayores y 43% menores al promedio histórico para los ciclos 2015/16 y 2017/18, respectivamente. Dado que en ambos ciclos se utilizó una lámina similar de riego complementario, estos valores marcan la diferencia entre ciclos agrícolas en el agua total disponible durante dicho período.

La dinámica de las temperaturas (mínima, media y máxima) fue similar para los ciclos 2015/16, 2017/18 y la serie histórica (Figura 5). Se observa que, durante ambos ciclos agrícolas, la temperatura máxima fue superior a la serie histórica en los meses de Diciembre a Febrero, y que dicha temperatura máxima también fue consistentemente superior a la serie histórica en los meses de Abril y Mayo del ciclo agrícola 2017/18. Además, durante este último ciclo agrícola, se registraron temperaturas mínimas más bajas con respecto a la serie histórica, especialmente durante los meses de Enero a Marzo y de Junio a Agosto. En el ciclo agrícola 2015/16, las temperaturas mínimas y medias durante todo el ciclo, y la temperatura máxima desde el mes de marzo en adelante, fueron similares al promedio histórico para la zona.

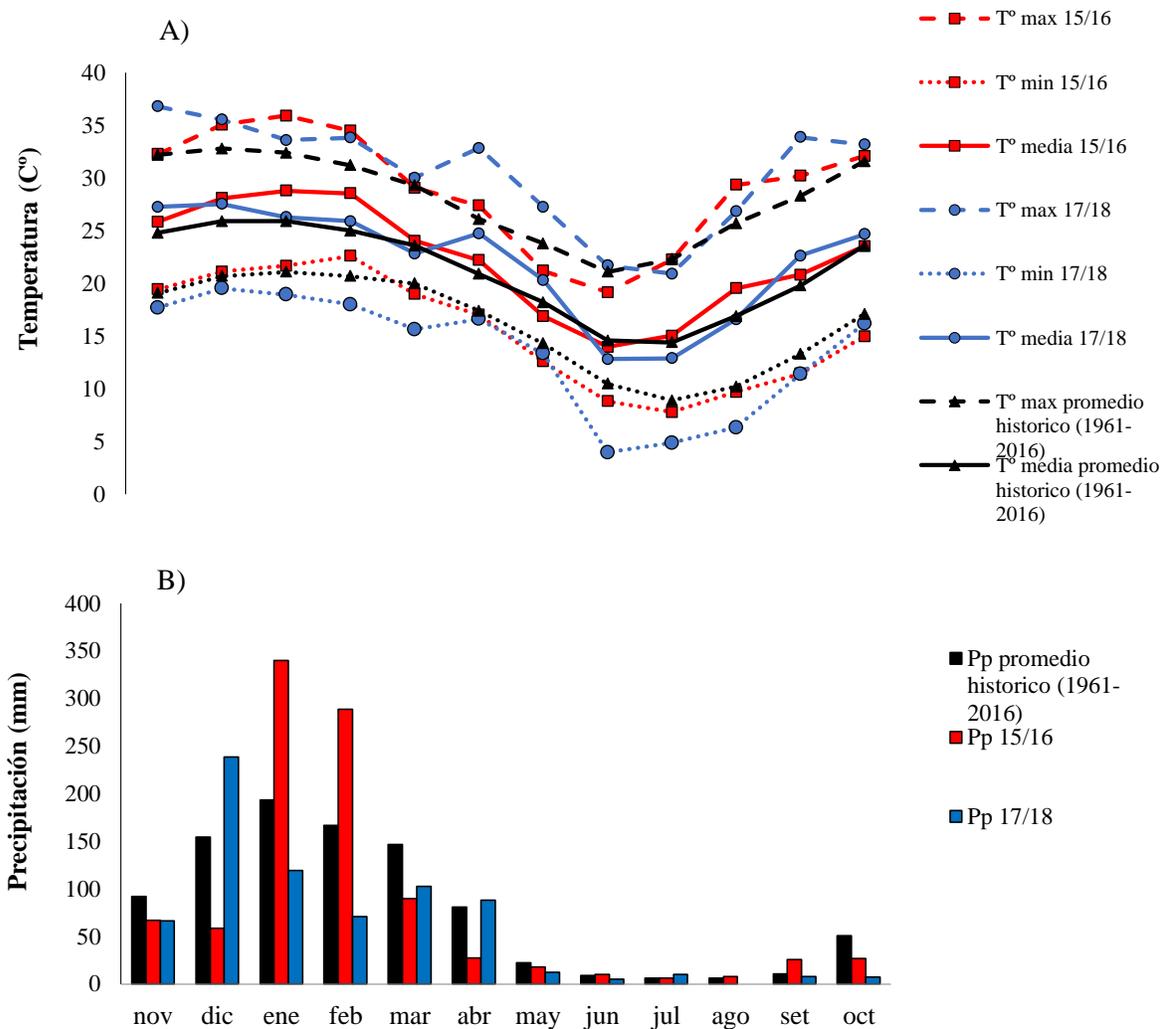


Figura 4. A) Temperaturas máximas, mínimas y medias y B) precipitación acumulada mensual para el promedio de la serie histórica 1961-2016 (negro) y para los ciclos agrícolas 2015/16 (rojo) y 2017/18 (azul). Datos para la localidad de El Tabacal, Salta, Argentina.

3.2 Delimitación de zonas de manejo homogéneas

En base a las imágenes satelitales, y a los muestreos de suelo *in-situ*, se realizó la zonificación del lote (zonas 1 y 2; Figura 5). La Zona 1 se caracterizó por presentar un suelo de textura franco a franco-arenoso, con menor capacidad de retención de humedad y menor contenido de MO que la zona 2, la cual presentó un suelo de textura franco a franco-arcilloso (Tabla 2). Por defecto, de aquí en adelante se denomina a la Zona 1 como arenosa y a la Zona 2 como arcillosa.

Tabla 2. Análisis físico-químico del suelo para las zonas 1 y 2 en el ciclo agrícola 2015/16.

Zona	Profundidad (cm)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Capacidad hídrica de saturación (%)	Conductividad eléctrica (mmhos cm ⁻¹)	Materia orgánica (%)	Nitrógeno total (%)	Relación C/N
1	0-25	50	37	13	32	0,80	0,84	0,07	7
	25-50	56	33	11	26	0,80	0,51	0,03	11
	50-75	54	35	11	26	0,72	< 0,4	< 0,01	-
	75-100	52	37	11	27	0,92	< 0,4	< 0,01	-
2	0-25	24	43	33	50	0,88	1,98	0,11	10
	25-50	28	43	29	38	0,72	0,79	0,05	9
	50-75	44	35	21	37	0,76	0,17	0,02	5
	75-100	52	33	15	32	0,84	0,38	0,02	11

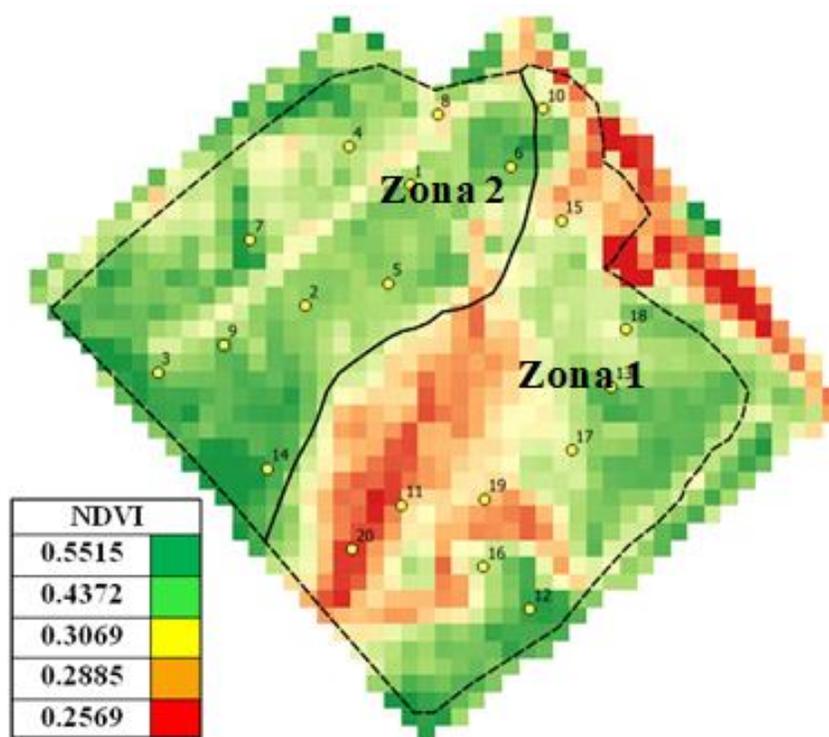


Figura 5. Mapa de NDVI y primera zonificación del lote A54 obtenida a partir del programa QGis. Los valores numéricos de NDVI aumentan de rojo a verde. Zona 1: arenosa; Zona 2: arcillosa.

Para corroborar la zonificación realizada, se comparó la misma con el NDVI de una imagen satelital Landsat 7 tomada en el mismo lote (A54) en el ciclo agrícola 2013 para el cultivo de soja, del cual se dispuso del mapa de rendimientos (Figura 6). En la Figura 6 se observa claramente la mayor productividad de la Zona 2 (expresada con un color gris oscuro en el panel izquierdo), que se asocia con un valor de NDVI más alto (panel derecho).

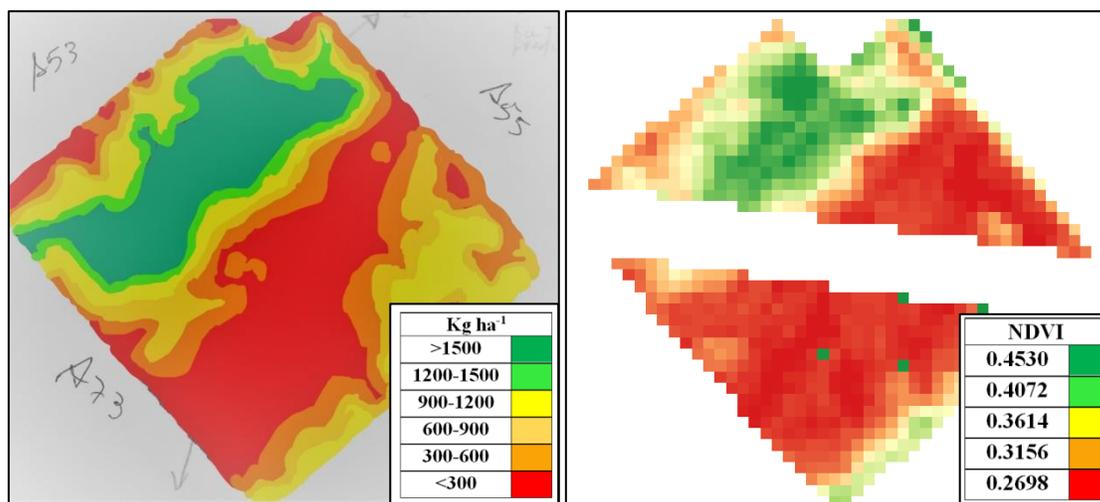


Figura 6. Mapas de rendimiento (izquierda) y de NDVI (derecha) para el cultivo de soja en el lote A54 en el ciclo agrícola 2013. En el panel izquierdo, los rendimientos aumentan de rojo a verde. En el panel derecho, los valores numéricos de NDVI aumentan de rojo a verde. Zona 1: arenosa; Zona 2: arcillosa.

3.3 Ciclo agrícola 2015/16

Dependiendo de la fase fenológica, se encontraron diferencias significativas entre las zonas para la variable contenido de N en el suelo ($p= 0,0016$; $p= 0,0179$ para muestreo inicial y macollaje, respectivamente), mientras que para AT, las diferencias fueron observadas a lo largo del ciclo ($p< 0,0130$). La EFN también presentó diferencias significativas entre zonas ($p= 0,0160$), mientras que existieron diferencias significativas marginales entre zonas para la EUA ($p= 0,0597$).

3.3.1 Rendimiento y componentes

El número de tallos (NT) por metro lineal no presentó diferencias significativas entre zonas ($p>0,1596$) en ningún muestreo (Figura 7A). En ambas zonas, la dinámica de tallos muestra un crecimiento del número de tallos hacia el macollaje del cultivo y una mortandad de los

mismos hacia la fase de maduración, estabilizándose el número final de tallos en 17 a 18 tallos m^{-1} (Figura 7A).

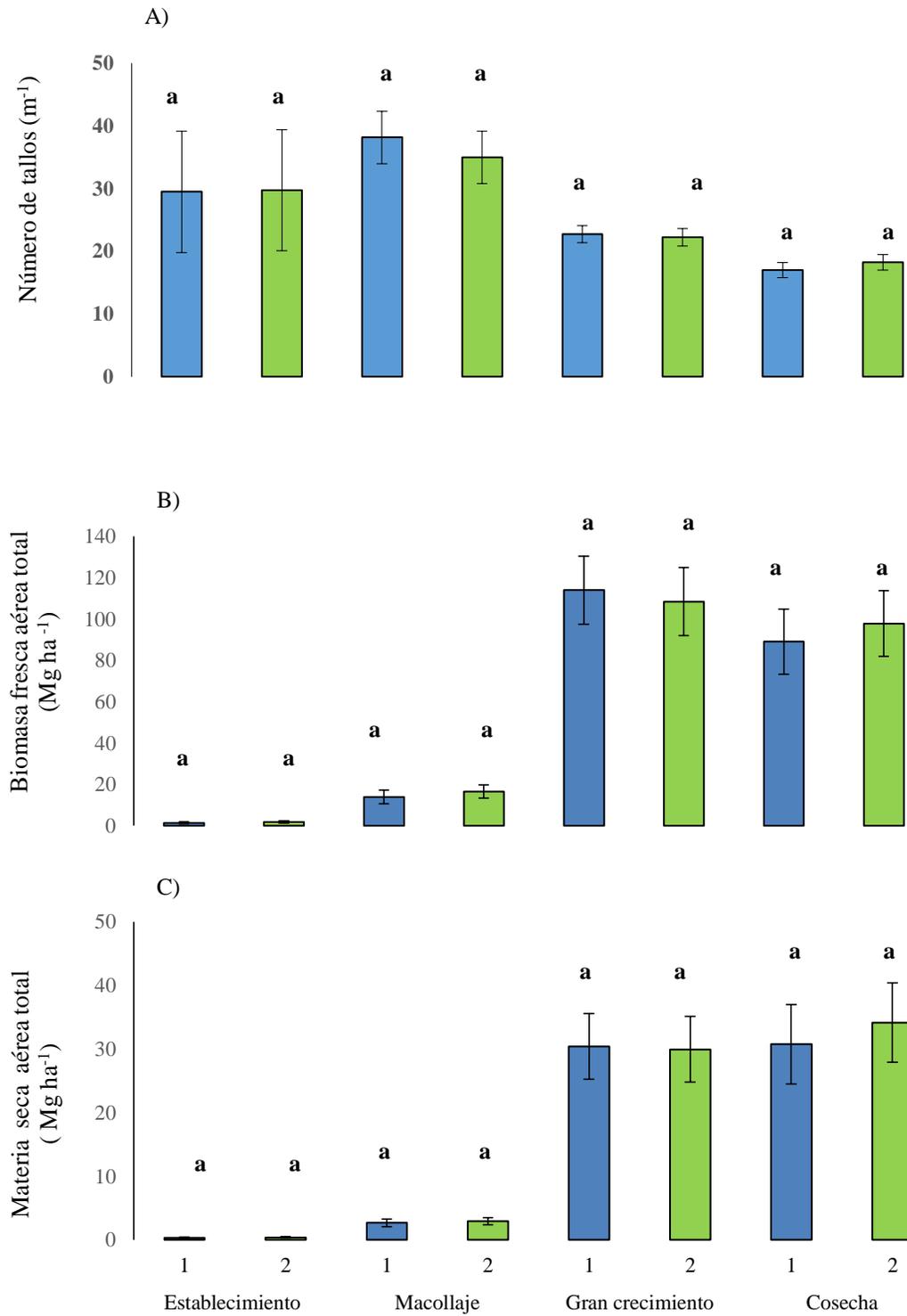


Figura 7. A) Dinámica del número de tallos por metro lineal, B) Biomasa fresca aérea total (Mg ha^{-1}) y C) Materia seca aérea total (Mg ha^{-1}), para las zonas 1 (barras azules) y 2 (barras verdes) durante las cuatro fases fenológicas del cultivo de caña de azúcar. Letras diferentes representan diferencias significativas entre zonas para cada momento de muestreo con una probabilidad de 0,05.

No existieron diferencias significativas ($p > 0,05$) en la biomasa fresca aérea total (BT) durante todo el ciclo del cultivo entre las zonas 1 y 2. Sin embargo, la zona 2 presentó $8,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ más de BT a madurez de cosecha que la zona 1 (Figura 7B). Este comportamiento también se observa para la materia seca aérea total (MST), donde la diferencia fue de $3,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ a favor de la zona 2 (Figura 7C).

Se observa que, en ambas zonas, la dinámica de la BT aumenta hacia el gran crecimiento del cultivo, disminuyendo luego hacia el muestreo de maduración, mientras que la MST aumenta hasta la fase de maduración del cultivo sin cambios posteriores.

No se encontraron diferencias significativas entre las dos zonas para el rendimiento cultural ($p = 0,2268$) ni para el peso seco de tallos (PSt) a cosecha ($p = 0,2329$). La Zona 2 presentó un RC y un PSt a cosecha que superaron en $7,44$ y $2,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ a los obtenidos en la Zona 1 (figuras 8A y 8 B).

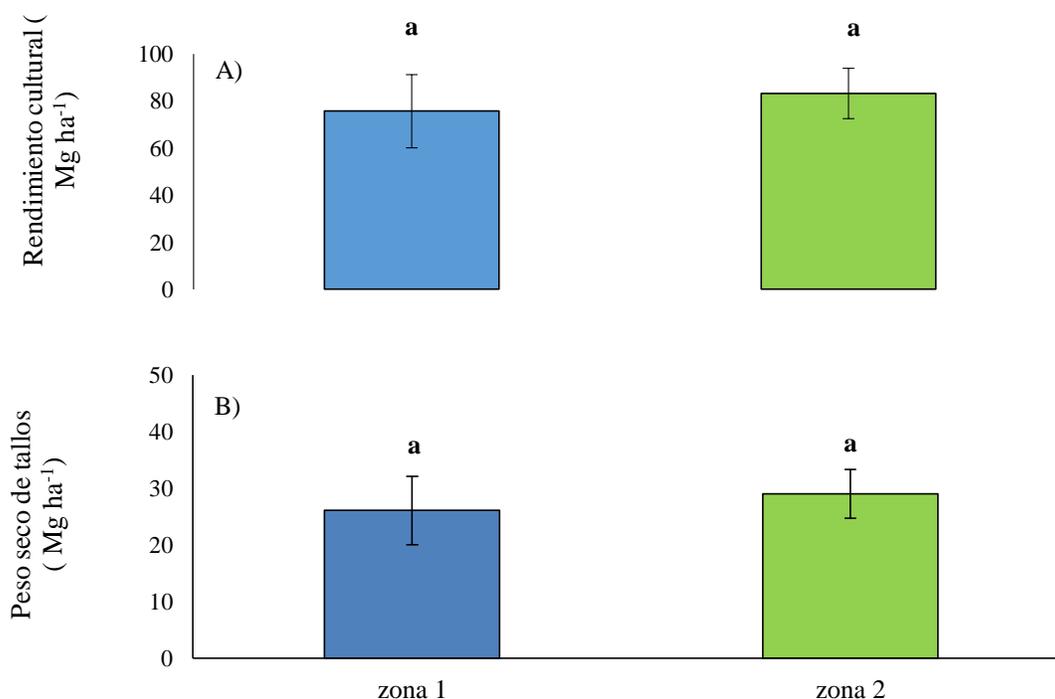


Figura 8. A) Rendimiento cultural (Mg ha^{-1}) y B) Peso seco de tallos a cosecha (Mg ha^{-1}), para las zonas 1 (barras azules) y 2 (barras verdes). Letras diferentes representan diferencias significativas entre zonas con una probabilidad de 0,05.

3.3.2 Eficiencia de uso de nitrógeno

La dinámica del contenido de N en el suelo a lo largo del ciclo del cultivo muestra que, en general, hasta el muestreo de gran crecimiento el mismo fue mayor en la zona 2, caracterizada por un suelo con mayor contenido de MO (Tabla 3). Se observa que el contenido de N en el suelo antes del inicio del cultivo era significativamente superior en la zona 2 ($p = 0,0016$), y que en la fase de maduración los valores promedio de contenido de N en el suelo para ambas zonas tienden a equipararse en un valor aproximado de 63 kg N ha^{-1} . Esta equiparación del contenido de N en el suelo a cosecha se podría deber al mayor consumo de N por parte del cultivo en la zona 2 (a pesar de no presentar diferencias significativas, el cultivo en la zona 2 mostró mayor MST).

No existieron diferencias marcadas en el contenido de N total de la biomasa durante el ciclo del cultivo ($p > 0,05$), por lo que el N total absorbido por el cultivo fue similar entre zonas. Los valores promedio a cosecha fueron de $119,6$ y 115 kg N ha^{-1} para las zonas 1 y 2, respectivamente (Tabla 3).

Tabla 3. Análisis de las variables contenido de nitrógeno en el suelo (0-100 cm) y contenido de nitrógeno en la biomasa medidas al inicio y en cuatro fases fenológicas de la caña de azúcar para las zonas 1 y 2 durante el ciclo agrícola 2015/2016.

Tratamiento	Muestreo inicial		Establecimiento PI		Macollaje		Gran crecimiento		Maduración		
	N suelo	N biomasa	N suelo	N biomasa	N suelo	N biomasa	N suelo	N biomasa	N suelo	N biomasa	
Zona	1	25,4 a	-	59,8 a	5,28 a	56,6 a	32,4 a	50,5 a	124,1 a	63,7 a	119,6 a
	2	47,2 b	-	62,2 a	5,73 a	73,3 b	40,9 a	62,6 a	109,5 a	63,1 a	115,4 a
ANOVA											
Fuente de variación											
Zona	0,0016	-	0,8219	0,5797	0,0179	0,0846	0,1127	0,0846	0,9338	0,8773	

N suelo: contenido de nitrógeno en el suelo N biomasa: contenido de nitrógeno en la biomasa. Letras diferentes representan diferencias significativas entre zonas para cada momento de muestreo con una probabilidad de 0,05.

La caña de azúcar no mostró diferencias entre zonas homogéneas para EUN ($p= 0,2725$) y ERN ($p= 0,4649$) en el ciclo del cultivo (Figuras 9A y 9B). Sin embargo, la eficiencia fisiológica del nitrógeno (EFN) fue significativamente mayor en la zona 2 ($p= 0,016$), generándose en esta zona 49,7 kg extra de MST por cada kg de N absorbido (Figura 9C).

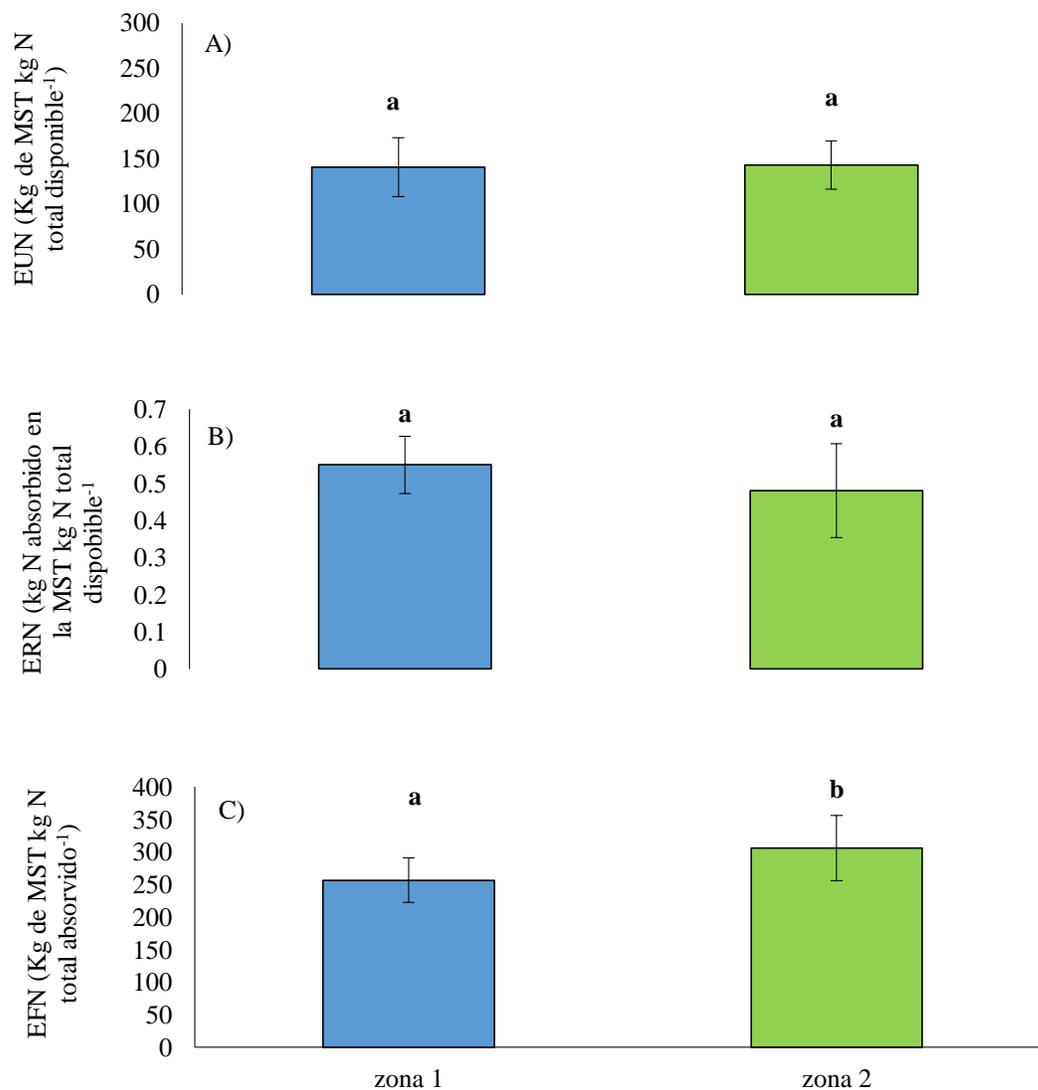


Figura 9. A) Eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN) ; B) Eficiencia de recuperación del nitrógeno (ERN) y C) Eficiencia fisiológica o de utilización del nitrógeno (EFN), para las zonas 1 (barras azules) y 2 (barras verdes). Letras diferentes representan diferencias significativas entre zonas con una probabilidad de 0,05.

3.3.3. Eficiencia de uso de agua

El agua total disponible en el suelo a lo largo del ciclo del cultivo fue, en promedio, un 15 % mayor ($p < 0,05$) en la zona 2 que en la zona 1 (Tabla 4). Independientemente de la zona, se observa una mayor disponibilidad de agua en el perfil hasta la fase de gran crecimiento, a partir de la cual la cantidad de agua total disminuye hacia la fase de maduración debido a la alta extracción de agua por parte del cultivo (mayor crecimiento y elongación de tallos) y a las escasas precipitaciones características de esos meses en ese ambiente (Figura 4).

No se encontraron diferencias significativas entre las zonas para el agua utilizada por el cultivo a lo largo del ciclo del mismo ($p > 0,1541$) (Tabla 4). La dinámica del agua utilizada en el ciclo del cultivo fue similar a la del agua total, tendiendo a incrementarse hasta la fase de gran crecimiento y disminuyendo hacia la fase de maduración (Tabla 4).

Tabla 4. Análisis de las variables agua total disponible en el suelo (mm) y agua utilizada por el cultivo (mm) medidas al inicio y en cuatro fases fenológicas de la caña de azúcar para las zonas 1 y 2 durante el ciclo agrícola 2015/2016.

Tratamiento	Muestreo inicial		Establecimiento PI		Macollaje		Gran crecimiento		Maduración		
	AT	AU	AT	AU	AT	AU	AT	AU	AT	AU	
Zona	1	125,3 a	-	217,1 a	73,5 a	412,4 a	264,2 a	820,1 a	599,6 a	270,6 a	135,8 a
	2	183,1 b	-	274,9 b	99,7 a	455,9 b	239,7 a	879,2 b	653,4 a	297,1 a	137,1 a
ANOVA											
Fuente de variación											
Zona**		0,0035	-	0,0035	0,2758	0,0070	0,2397	0,0070	0,1541	0,051	0,8949

AT= agua total disponible por el cultivo; AU= agua utilizada por el cultivo. Letras diferentes representan diferencias significativas entre zonas para cada momento de muestreo con una probabilidad de 0,05. ** =Probabilidades de que existan diferencias significativas entre zonas para las distintas variables, Probabilidades < 0,05 muestran diferencias significativas entre las zonas 1 y 2.

La diferencia significativa marginal entre zonas homogéneas ($p= 0,0597$) para la EUA en el ciclo completo del cultivo mostró una tendencia a una mayor generación de kg de MST por mm de agua total en la zona 2 respecto a la zona 1 (Figura 10A). Sin embargo, no existieron diferencias entre zonas para la ECA del agua ($p= 0,2909$) (Figura 10B).

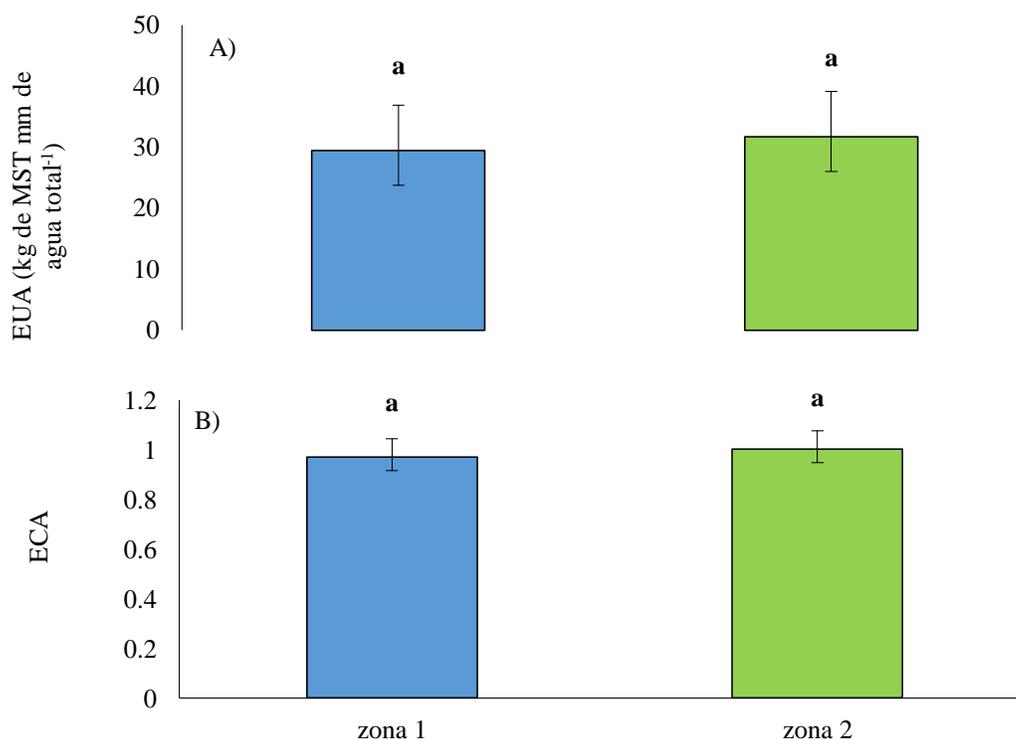


Figura 10. A) Eficiencia en el uso del agua (EUA) y B) Eficiencia de captura del agua (ECA) para las zonas 1 (barras azules) y 2 (barras verdes). Letras diferentes representan diferencias significativas entre zonas con una probabilidad de 0,05.

La Tabla 5 muestra la matriz de correlaciones de las variables analizadas en el ciclo 2015/16. Las correlaciones que se analizan son las que no presentan autocorrelaciones entre variables. Las variables RC, BT, PSt y NT presentaron correlaciones positivas con la EUN y EUA ($p < 0,01$; $R^2 > 0,75$). A su vez, estas dos eficiencias presentaron una correlación positiva robusta y altamente significativa entre ellas ($p < 0,01$; $R^2 = 0,93$) y una correlación positiva con la ERN ($p < 0,05$; $R^2 > 0,47$). Además, la EFN se correlacionó negativamente con la ERN ($p < 0,05$; $R^2 > 0,56$). Como era de esperar la ECA no se correlacionó significativamente con la EUA ($p > 0,05$; $R^2 = 0,42$).

Tabla 5. Matriz de correlaciones entre las variables medidas durante el ciclo agrícola 2015/2016.

	BT	MST	RC	PSt	NT	N biomasa	ERN	EFN	EUN	AT (mm)	AU (mm)	EUA	N Suelo
BT	-												
MST	0,97**	-											
RC	1,00**	0,97**	-										
PSt	0,81**	0,84**	0,81**	-									
NT	0,84**	0,83**	0,84**	0,69*	-								
N biomasa	0,40	0,39	0,40	0,39	0,19	-							
ERN	0,53*	0,53*	0,53*	0,29	0,34	0,86**	-						
EFN	0,32	0,34	0,32	0,53*	0,41	-0,56**	-0,58**	-					
EUN	0,91**	0,93**	0,91**	0,75**	0,78**	0,44*	0,67*	0,19	-				
AD	0,41	0,41	0,41	0,45	0,34	-0,02	-0,16	0,51**	0,18	-			
AU	0,10	0,12	0,10	0,16	0,22	0,17	0,04	-0,24	-0,23	0,19	-		
EUA	0,92**	0,95**	0,92**	0,83**	0,83**	0,31	0,47*	0,39	0,93**	0,31	-0,42	-	
N suelo	0,08	0,08	0,08	0,19	0,06	-0,15	-0,46*	0,43	-0,28	0,63**	0,31	-0,03	-
ECA	-0,10	-0,12	-0,10	-0,16	-0,22	0,17	0,04	-0,24	-0,23	0,19	1,00**	-0,42	0,31

*(p< 0,05); ** (p< 0,01)

BT = biomasa fresca aérea total; RC = rendimiento cultural; MST = materia seca aérea total; PSt= peso seco de tallos; NT = número de tallos; N suelo = nitrógeno disponible en el suelo; N biomasa = contenido de nitrógeno en la biomasa; AT = agua total disponible; AU = agua utilizada; EUN = eficiencia en el uso del nitrógeno; EFN = eficiencia de utilización del nitrógeno; ERN = eficiencia de absorción del nitrógeno; ECA= eficiencia de captura del agua; EUA = eficiencia en el uso del agua.

3.4 Ciclo agrícola 2017/18

La Figura 22 muestra que, a los 60 días de la fertilización (fertilizante aplicado el 07/12/2017 durante la fase de macollaje), el crecimiento vegetal (observado mediante imágenes de NDVI) difirió entre los tratamientos de fertilización nitrogenada. En la zona 2 se observa que el NDVI se asoció con la disponibilidad de N (a mayor nitrógeno, mayor NDVI), mientras que en la zona 1 esta asociación no fue tan clara, solamente distinguiéndose el tratamiento no fertilizado de los fertilizados.

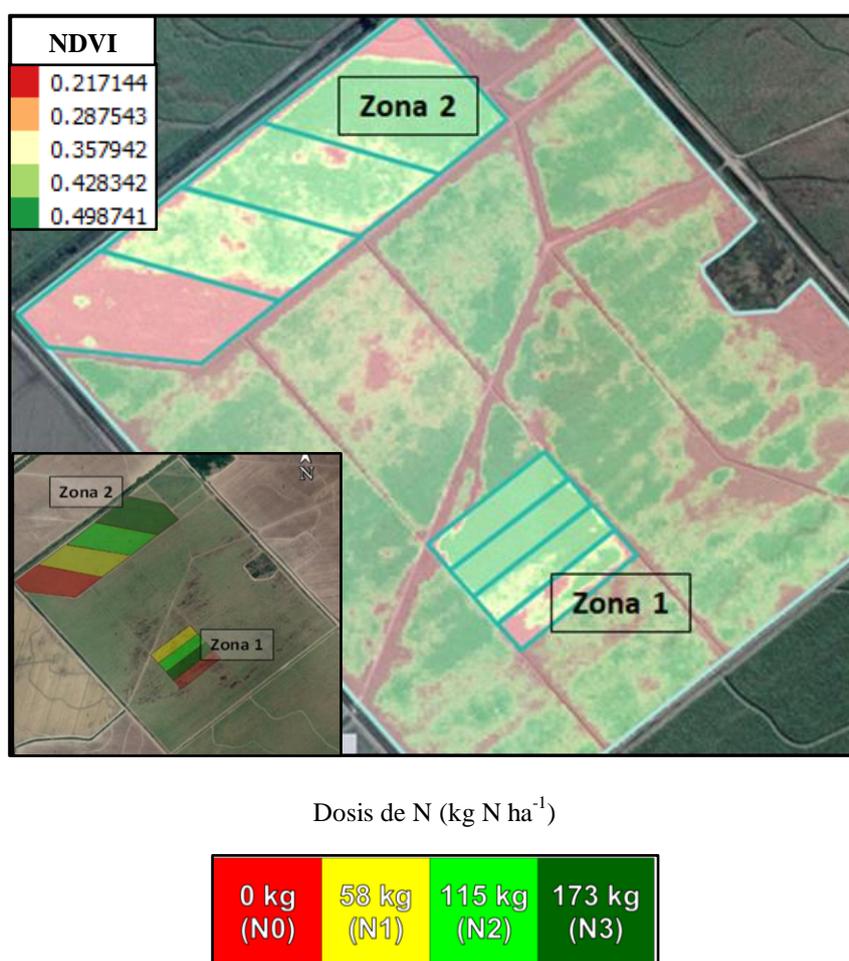


Figura 11. Mapa de NDVI para el lote A54 en una fecha posterior a la aplicación de fertilizante nitrogenado (06/02/2018). Los valores numéricos de NDVI aumentan de rojo a verde. El cuadro inserto a la izquierda muestra la disposición de los cuatro tratamientos de fertilización nitrogenada (0, 58, 115 y 173 kg ha⁻¹) para las zonas 1 y 2.

La caracterización de las propiedades edáficas de estas zonas homogéneas reducidas corroboró el muestreo realizado durante el primer ciclo agrícola, mostrando alto contraste entre las mismas: la Zona 1 presentó un suelo franco-arenoso, de baja capacidad de retención de humedad y mediano contenido de MO materia orgánica,

mientras que la Zona 2 presentó un suelo franco-arcilloso, de alta capacidad de retención de humedad y un mayor contenido de materia orgánica (Tabla 6).

Tabla 6. Análisis físico-químico del suelo para las zonas 1 y 2 en el ciclo agrícola 2017/18.

Zona	Profundidad (cm)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Capacidad hídrica de saturación (%)	Conductividad eléctrica (mmhos cm ⁻¹)	Materia orgánica (%)	Nitrógeno total (%)	Relación C/N
1	0-25	52	40	13	29	0,36	0,86	0,06	8
	25-50	55	32	13	29	0,24	0,34	0,03	7
2	0-25	25	43	34	53	0,80	1,90	0,11	10
	25-50	28	45	31	43	0,68	0,70	0,05	8

Dependiendo de la fase fenológica, se encontraron diferencias significativas para la interacción entre zona y dosis para AT en las fases de gran crecimiento y maduración, AU en las fases de macollaje y gran crecimiento y para la EUN en el ciclo completo del cultivo (Tabla 8). Las zonas (1 y 2) y los niveles de fertilización (N0, N1, N2 y N3) presentaron diferencias significativas para la BT, RC, MST, PSt, NT, contenido de N en el suelo, contenido de N en la biomasa, EUN, ECA, EUA, agua utilizada y agua total. La ERN presentó solo diferencias significativas entre zonas. Los casos puntuales de interacción significativa explicaron poco de la variabilidad total encontrada en dichas variables (cuadrado medio del error claramente menor al cuadrado medio del error de los factores simples).

3.4.1 Rendimiento y componentes

Exceptuando la fase de establecimiento de la población inicial, el número de tallos fue mayor en la zona 2 que en la zona 1 durante todo el ciclo del cultivo ($P < 0,0347$) (Figura 12A). La dinámica del número de tallos muestra que, independientemente de la zona, existió un crecimiento de los mismos hacia el macollaje del cultivo, seguida de una mortandad hacia cosecha, estabilizándose el número de tallos en 10 y 14 tallos m⁻¹ para las zonas 1 y 2, respectivamente (Figura 12A).

En el mismo sentido, las mayores dosis de fertilización nitrogenada produjeron mayor número de tallos, independientemente de la fase fenológica. La dosis N3 siempre fue significativamente mayor que N0 y N1 a partir de la fase de macollaje, mientras que no presentó diferencias significativas con N2 (Figura 13). En la fase de maduración, se obtuvieron en promedio 5 tallos más por metro lineal con N3 respecto al testigo sin fertilizar (N0).

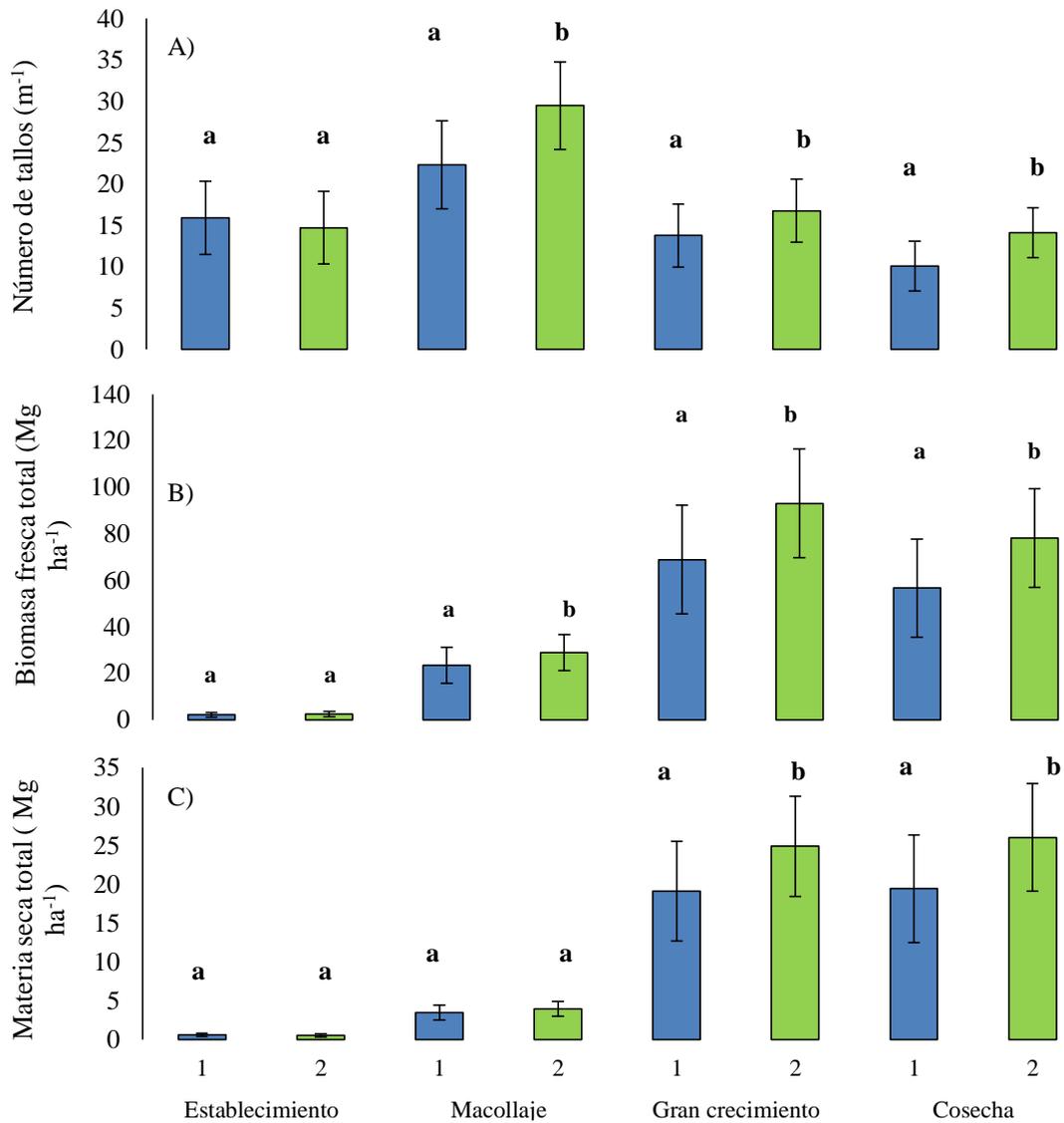


Figura 12. A) Dinámica del número de tallos por metro lineal ; B) Biomasa fresca total y C) Materia seca total para cuatro fases fenológicas de la caña de azúcar en la zona 1 (barras azules, 1) y en la zona 2 (barras verdes, 2). Letras diferentes representan diferencias significativas entre zonas para cada momento de muestreo con una probabilidad de 0,05.

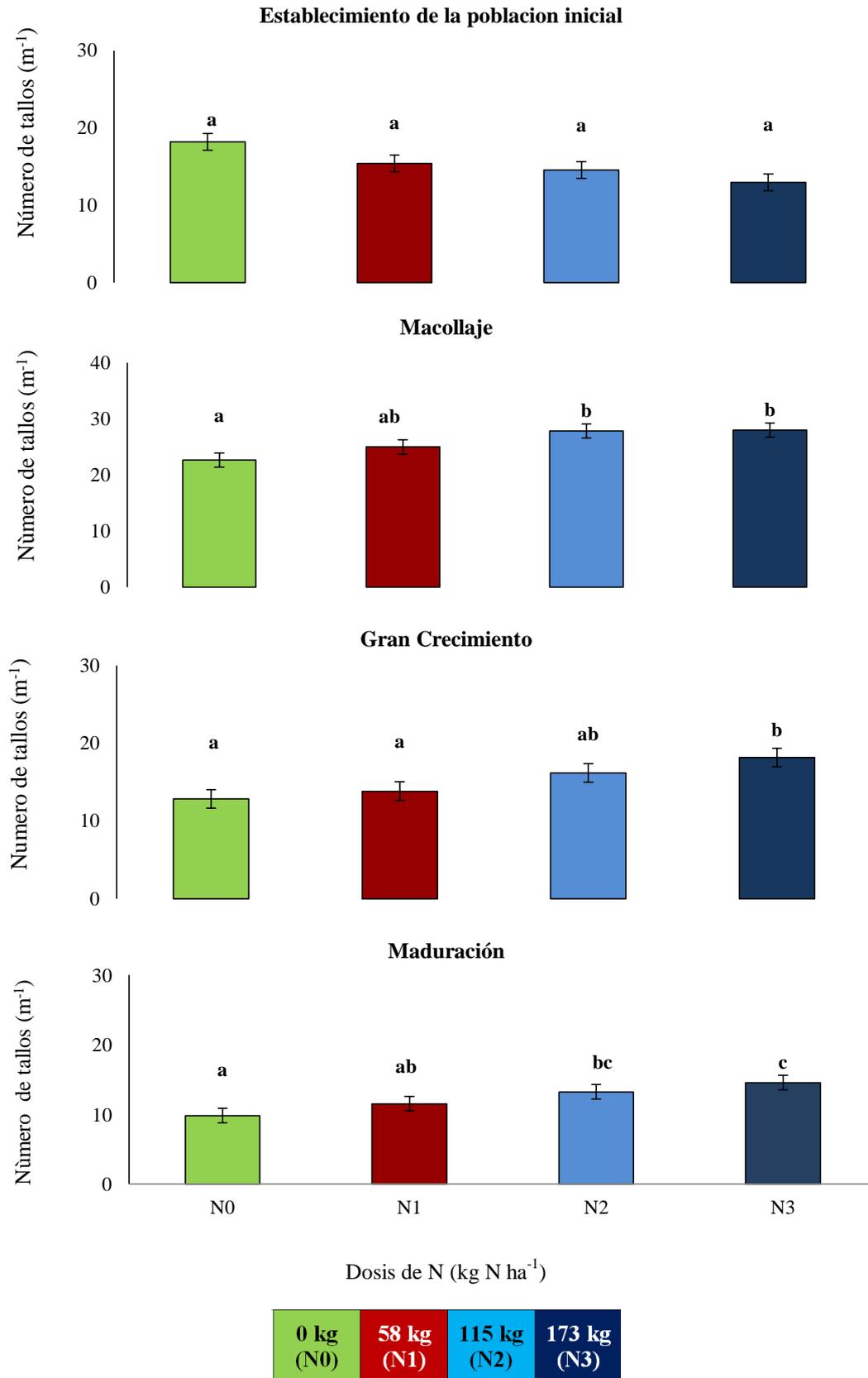


Figura 13. Dinámica del número de tallos por metro lineal para cuatro niveles de fertilización (N0, N1, N2 y N3) durante las cuatro fases fenológicas de la caña de azúcar. Letras diferentes

representan diferencias significativas entre dosis de fertilización nitrogenada para cada estadio fenológico con una probabilidad de 0,05.

A partir del macollaje, la BT fue significativamente superior en la zona 2 que en la zona 1 ($p < 0,0294$). En maduración, la zona 2 presentó en promedio $21,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ más de BT que la zona 1 (Figura 12B). Este comportamiento fue similar para la MST donde la diferencia en la fase de maduración fue de $6,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ a favor de la zona 2 ($p < 0,0002$) (Figura 12C). Independientemente de la zona, la BT y la MST aumentaron hacia la fase de gran crecimiento del cultivo, solamente disminuyendo hacia cosecha en la BT.

La fertilización nitrogenada incrementó la BT durante el ciclo del cultivo. Hacia la fase de maduración la dosis de fertilización N3 presentó una diferencia de $46,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ de BT con respecto al testigo N0 (Figura 14). Similar comportamiento se observó para la MST donde la diferencia entre N3 y N0 a cosecha fue de $15,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ a favor de N3 (Figura 15).

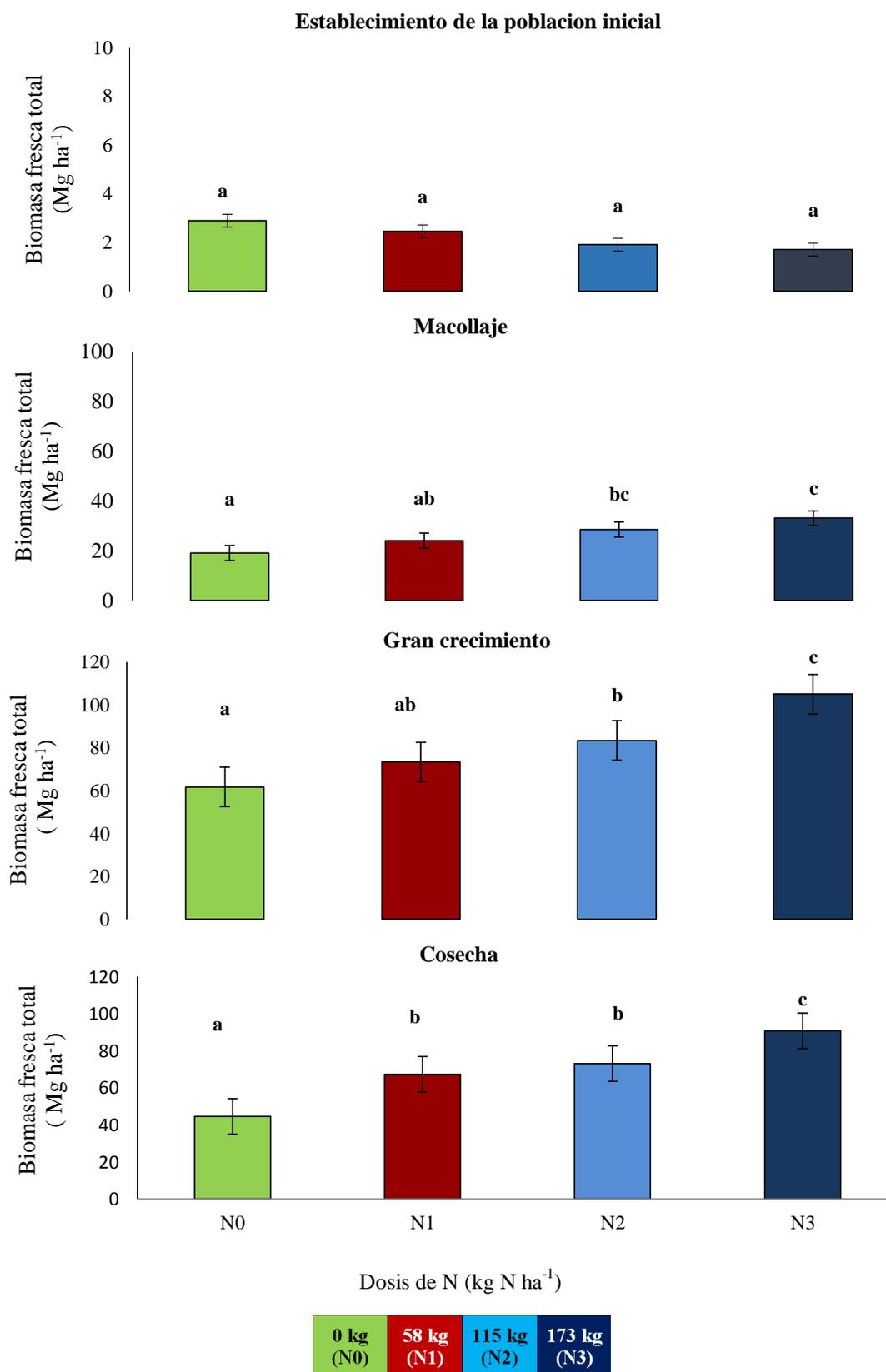


Figura 14. Biomasa fresca total para cuatro niveles de fertilización (N0, N1, N2 y N3) durante las cuatro fases fenológicas de la caña de azúcar. Letras diferentes representan diferencias significativas entre dosis de fertilización nitrogenada para cada estadio fenológico con una probabilidad de 0,05.

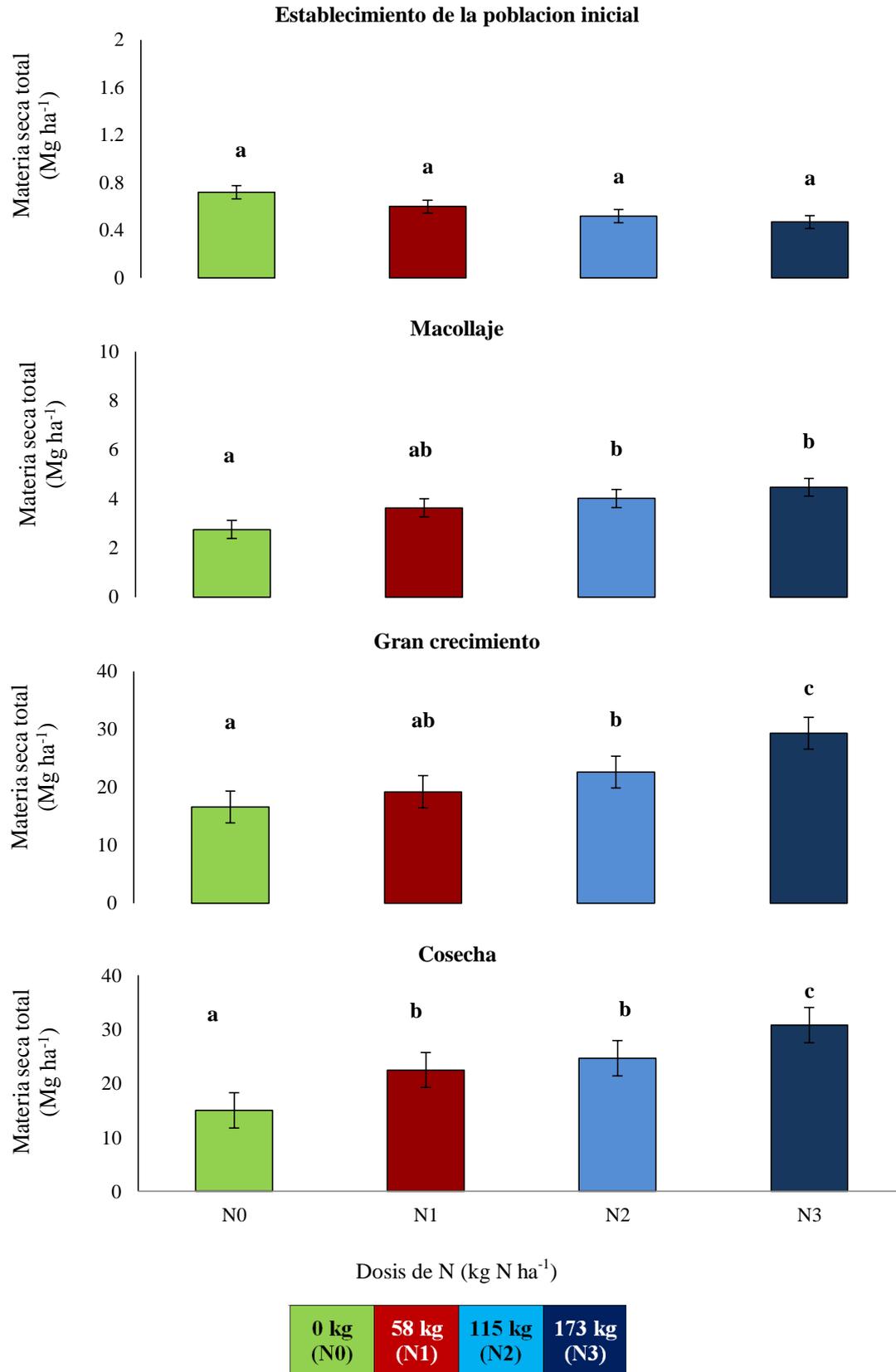


Figura 15. Materia seca total para cuatro niveles de fertilización (N0, N1, N2 y N3) durante las cuatro fases fenológicas de la caña de azúcar. Letras diferentes representan diferencias significativas entre dosis de fertilización nitrogenada para cada estadio fenológico con una probabilidad de 0,05.

La zona 2 presentó un rendimiento cultural (RC) que supero en 18,73 Mg ha⁻¹ al obtenido en la zona 1 (p= 0,003). Este comportamiento se repitió para la variable peso seco de tallos (PSt), donde se obtuvo una diferencia de 5,7 Mg ha⁻¹ de PSt a favor de la Zona 2 (p= 0,005) (Figuras 16A y 16B). Continuando con el análisis de estas variables, se encontró que a medida que se aumentó la dosis de fertilización nitrogenada se obtuvieron mayores RC y PSt (p<0,001) (Figuras 17A y 17B). Se obtuvo una diferencia de 40,3 y 13,4 Mg ha⁻¹ de RC y PSt, respectivamente, cuando se comparó el tratamiento N3 con respecto al testigo N0.

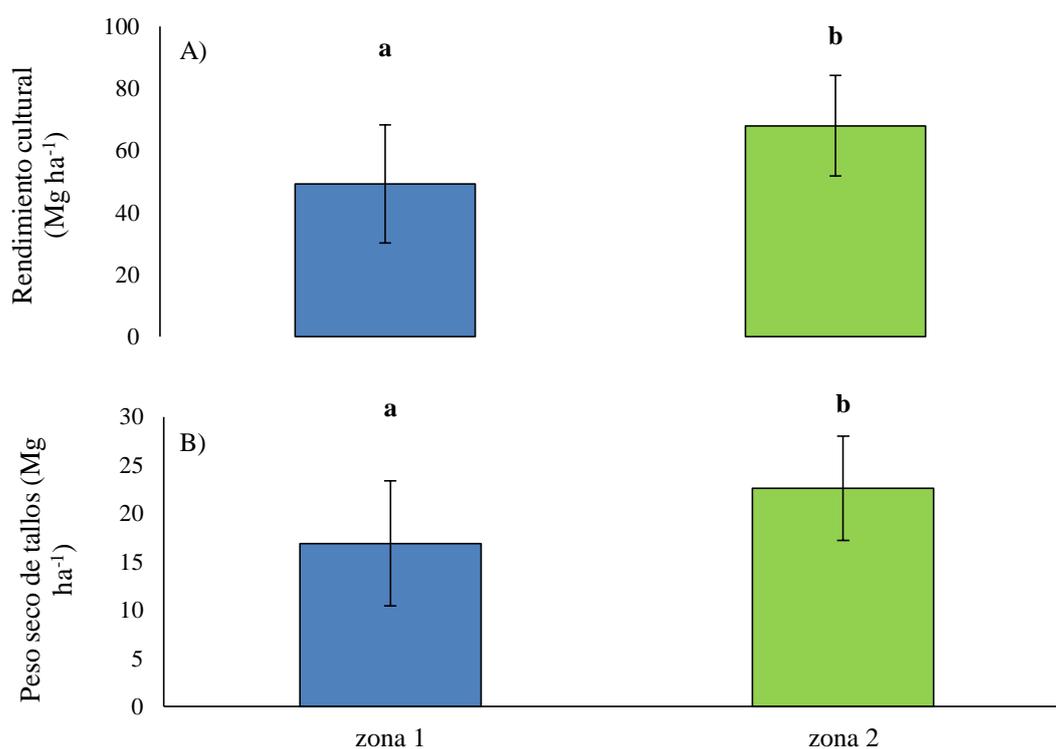


Figura 16. Rendimiento cultural y peso seco de tallos a cosecha para las zonas 1 (barras azules) y 2 (barras verdes). Letras diferentes representan diferencias significativas entre zonas con una probabilidad de 0,05.

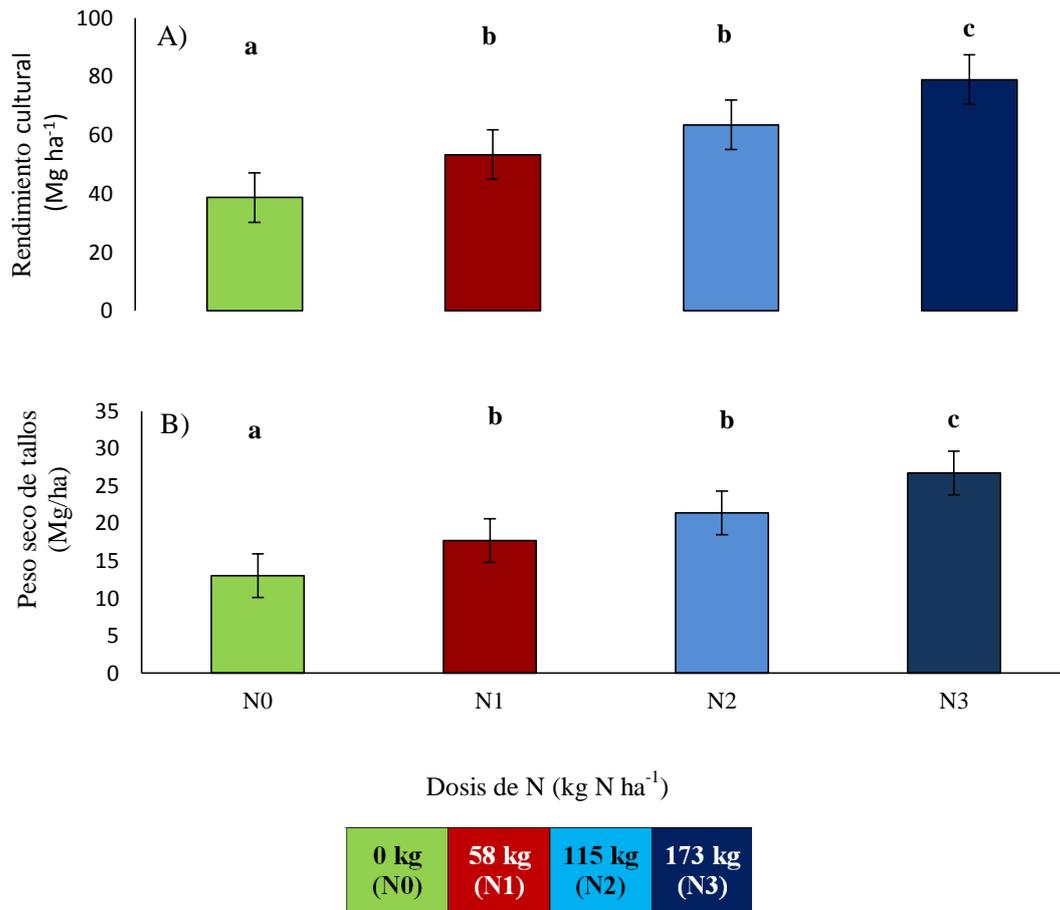


Figura 17. A) Rendimiento cultural y B) Peso seco de tallos a cosecha para cuatro niveles de fertilización (N0, N1, N2 y N3). Letras diferentes representan diferencias significativas entre dosis de fertilización nitrogenada con una probabilidad de 0,05.

3.4.2 Eficiencia de uso de nitrógeno

La dinámica del contenido de nitrógeno en el suelo a lo largo del ciclo del cultivo muestra que el mismo fue siempre mayor en la zona 2, caracterizada por tener un suelo con mayor contenido de materia orgánica (Tabla 7).

El contenido de N en el suelo presentó un comportamiento particular asociado a la fertilización nitrogenada. En el muestreo de macollaje, el cual se realizó días después de la fertilización, existió una tendencia al incremento del contenido de N en el suelo a medida que aumentó la dosis de fertilización (Tabla 7). Posteriormente, para las fases de gran crecimiento y cosecha, el contenido de N en el suelo disminuyó a medida que mayor fue la dosis de fertilización, siendo menor para los tratamientos N2 y N3, aunque las diferencias solo fueron significativas entre N0 y N2.

Se encontraron diferencias significativas en el contenido de N total en la biomasa entre las zonas 1 y 2 solo en los muestreos de macollaje y cosecha, presentando la zona 2 mayor contenido de N en la biomasa que la zona 1. Los valores promedio a cosecha fueron de 48,6 y 61,1 kg N ha⁻¹ para las zonas 1 y 2, respectivamente (Tabla 7).

A partir del muestreo de macollaje, existió una relación directa entre el contenido de N en la biomasa y la dosis de fertilización nitrogenada, donde a mayor dosis de fertilización mayor fue el contenido de N en la biomasa (Tabla 7). Esto se ve claramente en las fases de gran crecimiento y cosecha, donde la diferencia entre los tratamientos N3 y N0 fue de 53,49 y 41,41 kg N ha⁻¹, respectivamente.

Tabla 7. Análisis de las variables contenido de nitrógeno en el suelo (0-100 cm) y contenido de nitrógeno en la biomasa medidas al inicio y en cuatro fases fenológicas y para cuatro niveles de fertilización (N0, N1, N2 y N3) en las zonas 1 y 2 durante el ciclo agrícola 2017/2018.

Tratamiento		Muestreo inicial		Establecimiento PI		Macollaje		Gran crecimiento		Maduración	
		N suelo	N biomasa	N suelo	N biomasa	N suelo	N biomasa	N suelo	N biomasa	N suelo	N biomasa
Nitrógeno	N0	-	-	78,2 a	10,7 a	49,9 a	13,9 a	76,2 b	47,1 a	56,6 b	30,1 a
	N1	-	-	75,1 a	8,6 a	52,7 ab	24,5 b	64,5 ab	69,8 ab	49,3 ab	52,4 b
	N2	-	-	72,8 a	8,4 a	54,1 ab	34,9 c	61,2 a	88,7 b	40,7 a	65,5 bc
	N3	-	-	76,4 a	7,5 a	64,2 b	40,2 c	65,7 ab	100,6 b	47,9 ab	71,4 c
Zona	1	40,2 a	-	54,1 a	9,6 a	54,1 a	22,7 a	45,7 a	78,7 a	43,2 a	48,5 a
	2	47,5 b	-	97,2 b	7,6 a	56,3 b	34,1 b	88,1 b	74,4 a	54,1 b	61,1 b
ANOVA											
Fuente de variación											
	Zona	0,050	-	0,0001	0,2004	0,5752	0,0005	0,0001	0,6892	0,0001	0,0374
	Nitrógeno	-	-	0,8611	0,3249	0,1013	0,0001	0,2082	0,021	0,0311	0,0004
	Nitrógeno*Zona	-	-	0,8440	0,6851	0,070	0,1020	0,1084	0,5181	0,1544	0,9300

N suelo = Contenido de nitrógeno del suelo; N biomasa = Contenido de nitrógeno total en la biomasa). Letras diferentes representan diferencias significativas entre zonas para cada momento de muestreo con una probabilidad de 0,05

A nivel global, la EUN presentó diferencias significativas entre las zonas, presentando la zona 2 mayor EUN que la zona 1 ($p = 0,0001$) (Figura 18A). Durante todo el ciclo, la zona 2 generó 26,7 kg más de MST por kg de N disponible. La ERN fue mayor en la zona 2 que en la zona 1 ($p = 0,0274$), absorbiendo durante todo el ciclo del cultivo 0,06 kg de N más por kg de N disponible, lo que equivale a un 20% más de N absorbido en la zona 2 (Figura 18B). Contrariamente a lo sucedido con EUN y ERN, no se encontraron diferencias significativas en la EFN entre las dos zonas homogéneas ($p > 0,05$) (Figura 18C)

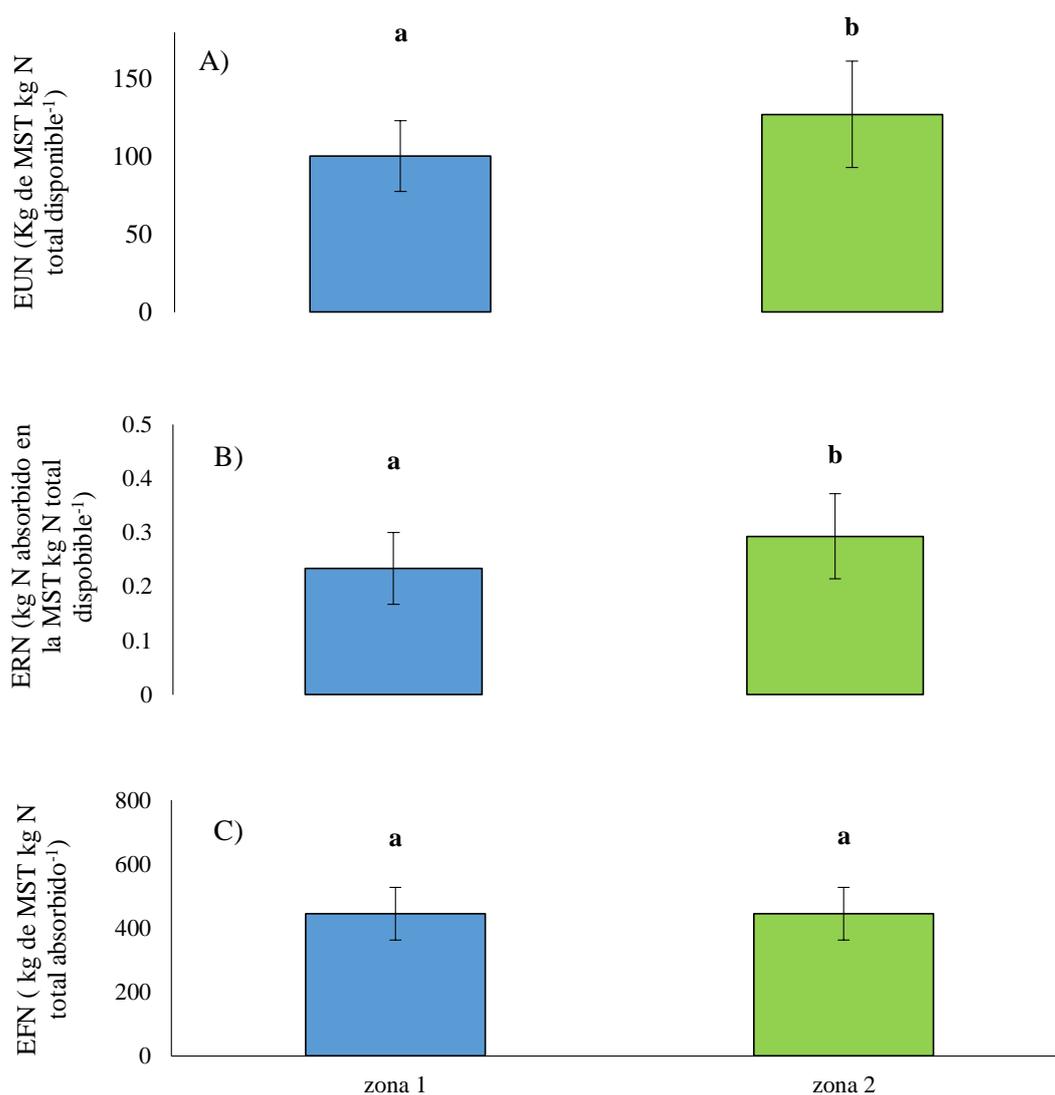


Figura 18. A) Eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN); B) Eficiencia de recuperación del nitrógeno (ERN) y C) Eficiencia de fisiológica o de utilización del nitrógeno (EFN) en un suelo arenoso (barras azules, zona 1) y uno arcilloso (barras verdes, zona 2). Letras diferentes representan diferencias significativas entre zonas con una probabilidad de 0,05.

A nivel global, mientras mayor fue la dosis de fertilización nitrogenada, menor fue la EUN del cultivo ($p = 0,0183$) (Figura 19A). Las diferencias significativas para EUN solo se observaron entre los tratamientos de alta y baja fertilización: la EUN fue similar entre los tratamientos N0 y N1 y entre los tratamientos N2 y N3. Por otro lado, no existieron diferencias significativas entre dosis de fertilización nitrogenada para las variables ERN y EFN ($p > 0,05$) (Figuras 19B y 19C). Los cuatro tratamientos de N mostraron una ERN promedio de 0,26 kg de N en la MST por cada kg de N aplicado, mientras que la EFN fue mayor en la dosis N0 que en la dosis N2, no existiendo diferencias entre el resto de las dosis utilizadas (Figura 19C).

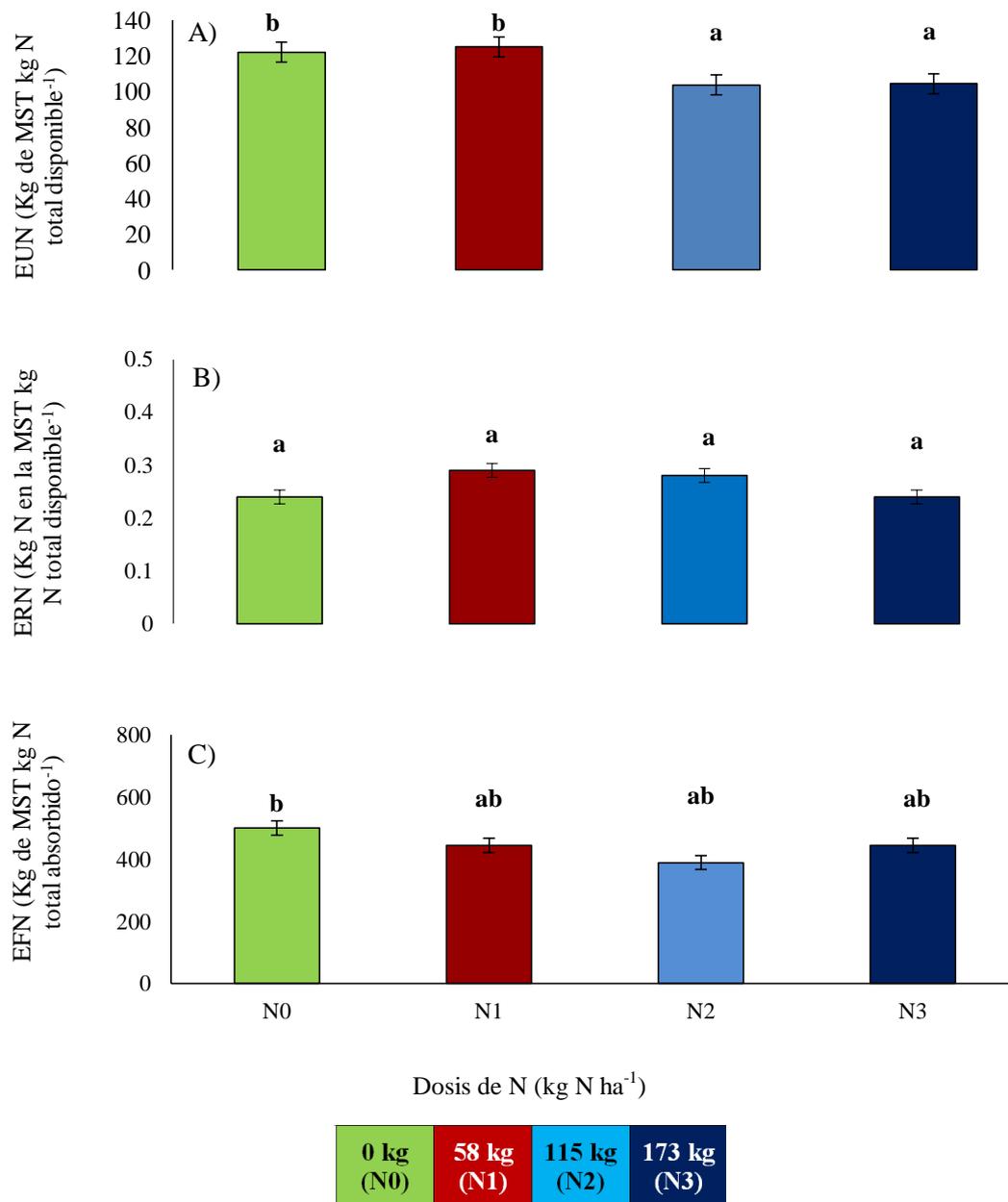


Figura 19. A) Eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN); B) Eficiencia de recuperación del nitrógeno y C) Eficiencia fisiológica del nitrógeno para cuatro niveles de fertilización (N0, N1, N2 y N3). Letras diferentes representan diferencias significativas entre dosis de fertilización nitrogenada con una probabilidad de 0,05.

El análisis de la eficiencia en la utilización del fertilizante mostró que, independientemente del tipo de suelo, no existieron diferencias significativas entre dosis N para las variables ERN_{fert} y EFN_{fert} ($p > 0,05$), aunque la ERN_{fert} mostró una tendencia a disminuir a medida que aumento la dosis de fertilización; mientras que la EAN presento un mayor valor para la dosis N1 respecto a N2 y N3 que no se diferenciaron significativamente entre ellas (Figura 20).

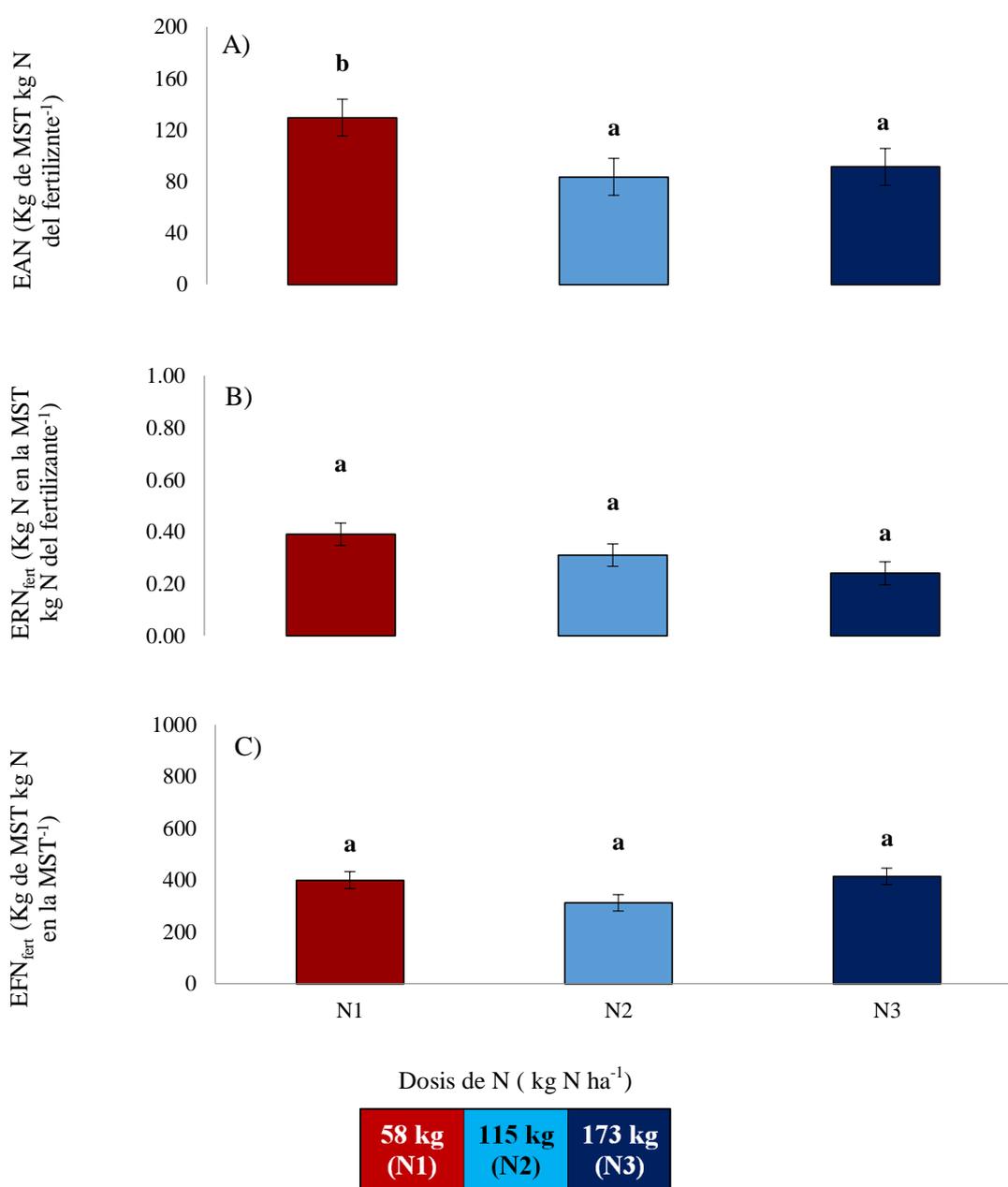


Figura 20. A) Eficiencia agronómica del nitrógeno (EAN), B) Eficiencia de recuperación del N del fertilizante (ERN_{fert}) y C) Eficiencia fisiológica del N del fertilizante (EFN_{fert}) para tres niveles de fertilización (N1, N2 y N3). Letras diferentes representan diferencias significativas entre dosis de fertilización nitrogenada con una probabilidad de 0,05.

3.4.3 Eficiencia de uso del agua

El agua total disponible en el suelo siempre fue mayor en la zona 2 que en la zona 1 (Tabla 8). En ambas zonas, se observa la acumulación progresiva de agua en el perfil del suelo hasta la fase de gran crecimiento, a partir de la cual la cantidad de agua disminuye hacia cosecha debido a la alta extracción de agua por parte del cultivo (mayor crecimiento y elongación de tallos) y a las escasas precipitaciones características de esos meses en ese ambiente. Por otro lado, no existieron diferencias en el agua total en el suelo para las cuatro dosis de fertilización nitrogenada (Tabla 8).

Si bien el agua utilizada por el cultivo durante el ciclo del mismo presentó diferencias significativas, no se observa ninguna tendencia clara en la misma. En la fase de macollaje, el agua utilizada fue mayor en la zona 2, mientras que en la fase de gran crecimiento fue mayor en la zona 1, tendiéndose a equiparar en ambas zonas hacia la fase de cosecha (Tabla 8). En la misma línea con lo observado para las zonas, se encontraron diferencias significativas para el agua utilizada entre dosis de fertilización. Sin embargo, las mismas no muestran ninguna tendencia clara sobre la respuesta del agua utilizada a las dosis de fertilización nitrogenada (Tabla 8).

Tabla 8. Análisis de las variables agua total disponible en el suelo (0-100cm) y agua utilizada por el cultivo (mm) medidas al inicio y en cuatro fases fenológicas de la caña de azúcar y para cuatro niveles de fertilización nitrogenada (N0, N1, N2 y N3), en las zonas 1 y 2, durante el ciclo 2017/2018.

Tratamiento		Muestreo inicial		Establecimiento PI		Macollaje		Gran crecimiento		Maduración	
		AT	AU	AT	AU	AT	AU	AT	AU	AT	AU
Nitrógeno	N0	-	-	284,1 a	63,35 a	519,7 a	262,8 a	621,8 a	269,7 a	389,7 b	167,9 a
	N1	-	-	289,3 a	79,5 a	503,6 a	248,5 a	627,9 a	308,5 b	349,1 a	198,3 b
	N2	-	-	285,5 a	85,1 a	498,1 a	254,3 a	633,2 a	304,4 b	341,8 a	199,8 b
	N3	-	-	287,8 a	85,0 a	499,2 a	248,1 a	634,9 a	304,6 b	347,9 a	165,9 a
Zona	1	127,2 a	-	234,7 a	79,1 a	450,6 a	211,9 a	616,7 a	319,6 a	321,6 a	177,9 a
	2	233,9 b	-	341,4 b	77,4 a	559,1 b	294,9 b	642,2 b	274,1 b	392,6 b	188,1 a
ANOVA											
Fuente de variación											
Zona		0,0015	-	0,0001	0,8378	0,0001	0,0001	0,0001	0,0003	0,0001	0,2617
Nitrógeno		-	-	0,9999	0,2114	0,2174	0,3444	0,3172	0,0482	0,0018	0,0166
Nitrógeno*Zona		-	-	0,9999	0,6739	0,6739	0,0187	0,0006	0,0026	0,0003	0,0726

AT= Agua total disponible en el suelo (mm); AU = Agua utilizada por el cultivo (mm). Letras diferentes representan diferencias significativas entre zonas para cada momento de muestreo con una probabilidad de 0,05

La EUA fue superior en la zona 2 que en la zona 1, siendo la diferencia de 5,89 kg más de MST por mm de agua utilizada por la planta ($p=0,007$) (Figura 21A). Esta mayor EUA podría estar relacionada, en parte, a la mayor ECA (Figura 21B) y producción de MST (Figura 12) registrada en la zona 2 durante el ciclo 2017/2018.

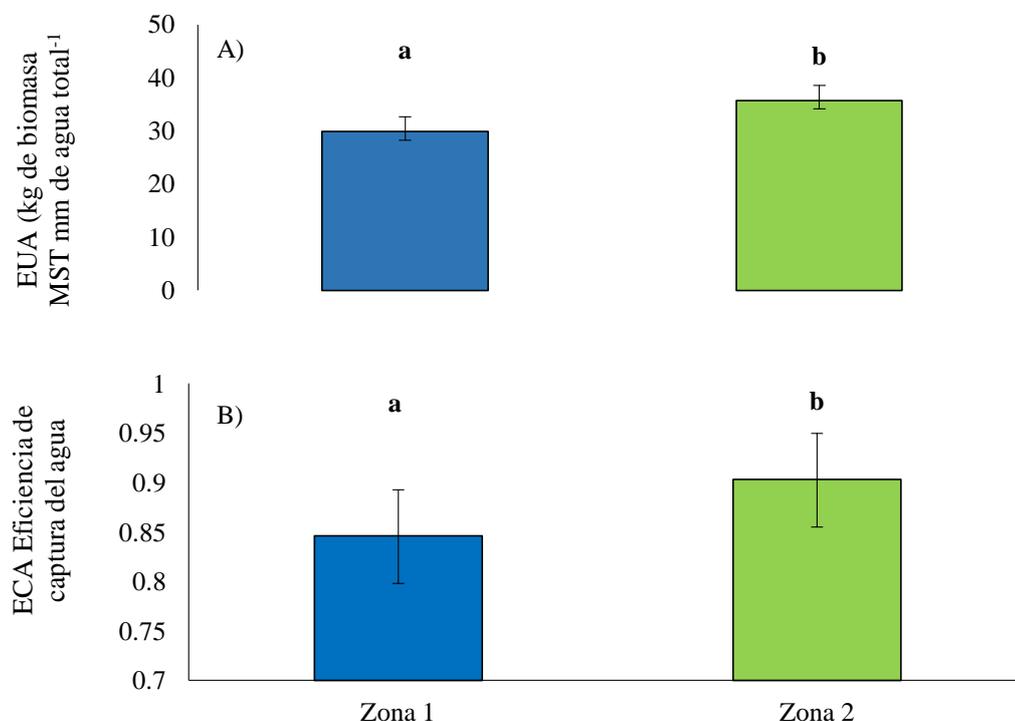


Figura 21. A) Eficiencia en el uso del agua (EUA) y B) Eficiencia de captura del agua (ECA) medida en todo el ciclo del cultivo de caña de azúcar, en la zona 1 (barras azules) y zona 2 (barras verdes). Letras diferentes representan diferencias significativas entre zonas con una probabilidad de 0,05.

En general, una mayor dosis de N produjo incrementos en la EUA, generando el tratamiento N3 unos 21,52 kg más de MST por mm de agua total en el suelo que el testigo N0 ($p= 0,0183$) (Figura 22A). Sin embargo, las mayores dosis de N no aumentaron la ECA (Figura 22B), presentando esta variable un valor promedio de 0,87 para todos los tratamientos de fertilización nitrogenada.

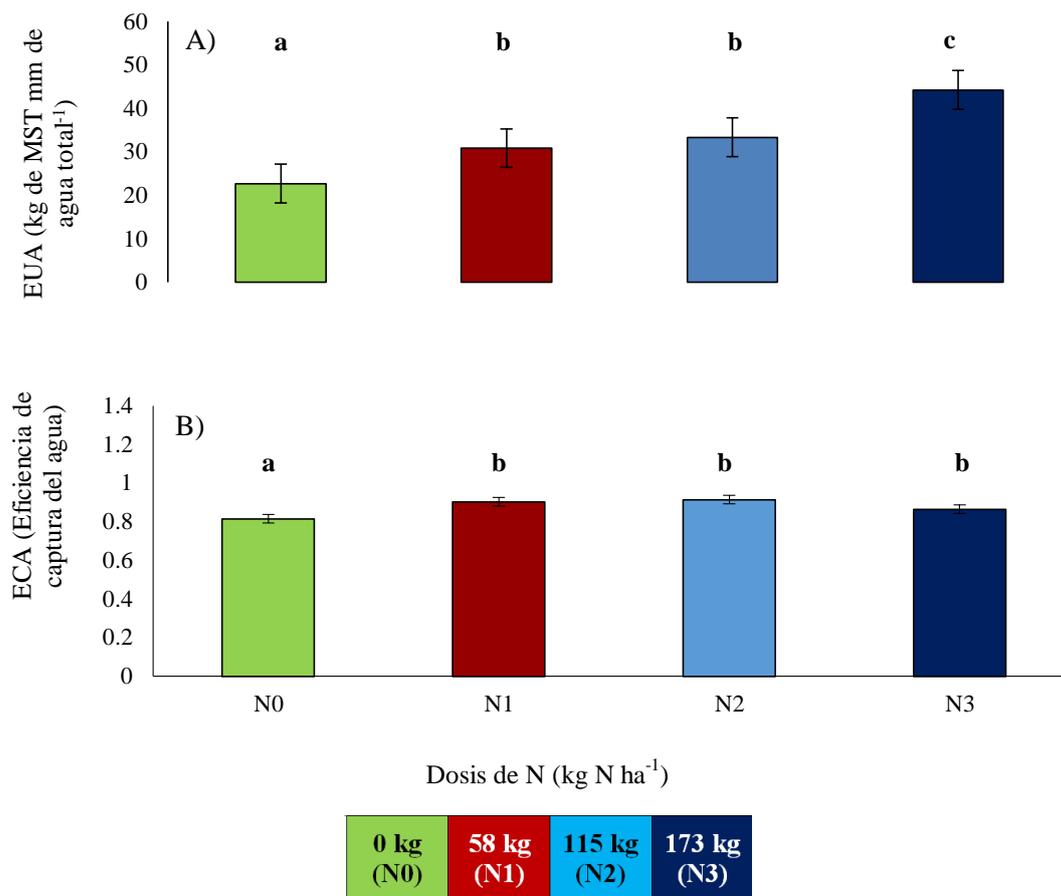


Figura 22. Eficiencia en el uso del agua (EUA) y Eficiencia de captura del agua (ECA) para cuatro niveles de fertilización nitrogenada (N0, N1, N2 y N3). Letras diferentes representan diferencias significativas entre dosis de fertilización nitrogenada con una probabilidad de 0,05.

La matriz de correlaciones de las variables del ciclo agrícola 2017/18 se muestra en la Tabla 9. A diferencia del ciclo agrícola 2015/2016, en este ciclo no se encontró una correlación significativa entre las variables BT, RC, PSt y NT con la EUN posiblemente debido a las importantes diferencias que se encontraron con los distintos niveles de fertilización que podrían enmascarar una asociación positiva de los componentes del rendimiento con esta eficiencia ($p > 0,05$; $R^2 < 0,24$). Al igual que en el ciclo 2015/16, la EUA si presentó asociaciones robustas con todos los componentes del rendimiento ($p < 0,01$; $R^2 > 0,75$), pero no se correlacionó de manera significativa con la EUN ($p > 0,05$; $R^2 = 0,18$). La EUN presentó una correlación positiva con la ERN ($p < 0,05$; $R^2 = 0,59$). Al igual que en el ciclo 2015/16, la EFN se correlacionó negativamente con la ERN ($p < 0,01$; $R^2 > 0,67$). Finalmente, la ECA no presentó una correlación significativa con la EUA ($p > 0,05$; $R^2 = 0,31$).

Tabla 9. Matriz de correlaciones entre las variables medidas durante el ciclo agrícola 2017/2018.

	BT	MST	RC	PSt	NT	N biomasa	ERN	EFN	EUN	AD (mm)	AU (mm)	EUA	N suelo
BT	-												
MST	0,99**	-											
RC	0,95**	0,94**	-										
PSt	0,94**	0,94**	1,00	-									
NT	0,79**	0,80**	0,78**	0,79**	-								
N biomasa	0,79**	0,82**	0,77**	0,80**	0,62**	-							
ERN	0,32	0,31	0,31	0,31	0,26	0,60**	-						
EFN	-0,17	-0,21	-0,21	-0,24	-0,11	-0,72**	-0,67**	-					
EUN	0,24	0,19	0,19	0,15	0,24	0,02	0,59**	0,19	-				
AD	0,45*	0,41*	0,48*	0,45*	0,6**	0,31	0,47*	0,00	0,61**	-			
AU	0,50**	0,49*	0,42*	0,4*	0,53**	0,52**	0,38	-0,33	0,16	0,53**	-		
EUA	0,97**	0,98**	0,93**	0,93**	0,75**	0,78**	0,27	-0,16	0,18	0,32	0,31	-	
N suelo	0,80**	0,84**	0,78**	0,81**	0,64**	0,77**	-0,01	-0,32	-0,34	0,06	0,36	0,83**	-
ECA	0,50**	0,49*	0,42*	0,4*	0,53**	0,52**	0,38	-0,33	0,16	0,53**	1,00**	0,31	0,36

*(p< 0,05); ** (p< 0,01).

BT = biomasa fresca aérea total; RC = rendimiento cultural; MST = materia seca aérea total; PSt= peso seco de tallos; NT = número de tallos; N suelo = nitrógeno disponible en el suelo; N biomasa = contenido de nitrógeno en la biomasa; AD = agua total; AU = agua utilizada; EUN = eficiencia en el uso del nitrógeno; EFN = eficiencia de utilización del nitrógeno; ERN = eficiencia de absorción del nitrógeno; ECA= eficiencia de captura del agua; EUA = eficiencia en el uso del agua.

CAPITULO 4

Discusión y conclusiones

4.1 Discusión general

El objetivo de esta tesis fue determinar la productividad, eficiencias de uso de agua, de N y sus componentes en caña de azúcar en zonas de manejo homogéneas. Durante el ciclo agrícola 2015/16 el estudio fue no manipulativo. En base a imágenes satelitales y a muestreos de suelo *in-situ*, se caracterizó un lote con manejo homogéneo en dos zonas (1 y 2), caracterizadas por presentar propiedades físico-químicas de los suelos diferentes. Debido a la alta variabilidad encontrada intra-zona, durante este ciclo agrícola no se encontraron diferencias significativas entre zonas en la mayoría de las variables de respuesta, aunque se observó cómo tendencia valores superiores en la Zona 2. Para el segundo ciclo agrícola (2017/18), se utilizó la información generada durante el ciclo anterior para identificar los sitios más uniformes (de menor variabilidad) dentro de cada zona homogénea (1 y 2) y evaluar el efecto de las zonas (propiedades físico-química de los suelos) y de la fertilización nitrogenada sobre las variables de interés. Se encontraron diferencias significativas entre zonas en la mayoría de las variables de respuesta, siendo la Zona 2 la de mejor comportamiento. A su vez, se determinaron diferencias significativas entre los distintos niveles de fertilización nitrogenada (0, 58, 115 y 173 kg N ha⁻¹).

Las precipitaciones se encuentran dentro de los factores ambientales que más limitan el crecimiento y desarrollo de la caña de azúcar (Herrera, 2000). Las condiciones climáticas imperantes en cada ciclo agrícola influyeron de manera notoria en los resultados, tanto en los valores absolutos de las variables de respuesta como en la diferencia entre las zonas de manejo homogéneas. El balance hídrico para ambos ciclos agrícolas, calculado como la evapotranspiración del cultivo y la oferta hídrica (precipitación + riego), reveló que el ciclo agrícola 2015/16 presentó un balance hídrico positivo con un excedente de 47 mm, mientras que el ciclo 2017/2018 presentó un balance hídrico moderadamente deficiente en 56 mm. En el ciclo agrícola 2015/16 se generaron los mayores rendimientos y componentes del mismo asociados a la mayor precipitación acumulada y su mejor distribución anual (llovió un 24% más que la media histórica entre los meses de enero a marzo, meses de mayor demanda del cultivo); mientras que en el ciclo agrícola 2017/18, la cantidad acumulada y la distribución desfavorable de las precipitaciones para el crecimiento del cultivo pudieron haber generado estrés hídrico, principalmente afectando el macollaje y gran crecimiento del cultivo. En estas fases se encuentra el período crítico para la generación del rendimiento en caña de azúcar ya que en ellas se define el número potencial de tallos y se presentan las mayores tasas de elongación de tallos y crecimiento del cultivo (Romero et al., 2009; Diola y Santos, 2010). Wiedenfeld (2000) determinó que el mayor efecto en la reducción del rendimiento se da en la fase de gran crecimiento, ya que coincide con la mayor demanda de evapotranspiración del cultivo. Además de la época en que se

produce el déficit hídrico, también es importante la magnitud en la cual se produce el mismo. En este sentido, Inman-Bamber (2004) observó que déficits hídricos de al menos 36 mm son requeridos para disminuir la tasa de elongación del tallo, mientras que déficits de entre 120 y 145 mm reducen la acumulación de biomasa y sacarosa, respectivamente. Precisamente, los resultados de esta tesis muestran un déficit hídrico de 56 mm en el ciclo 2017/2018, presentando en el período crítico 213 mm menos que la media histórica, lo que generó 21% menos biomasa y rendimiento que en el ciclo 2015/16.

Aunque en menor medida, la temperatura también resultó más favorable durante el ciclo agrícola 2015/16, ya que presentó una distribución y valores de temperatura más adecuados para el crecimiento y desarrollo del cultivo. Si bien la temperatura máxima de diciembre a febrero fue mayor a la serie histórica en ambos ciclos agrícolas, la temperatura mínima del ciclo agrícola 2017/18 fue sensiblemente menor tanto a la serie histórica como al ciclo agrícola 2015/16. Esto condujo a que, en dicho período (período crítico para la generación del rendimiento de la caña de azúcar) la temperatura media del ciclo agrícola 2015/16 fuera 2 °C superior a la del ciclo agrícola 2017/18 (27 vs. 25 °C). Las temperaturas más favorables que se registraron en el período 2015/2016 condujeron a una mayor producción de biomasa (y por lo tanto mayor rendimiento) ya que la misma afecta el desarrollo foliar y caulinar (Kingston, 2000; Ferraris y Chapman, 1991) y la tasa de elongación de los entrenudos (Inman-Bamber, 1994). A su vez, diversos autores estudiaron la influencia de las bajas temperaturas sobre el cultivo. Saez (2017) y Kingston (2000) determinaron que temperaturas inferiores a 21 °C afectaron el crecimiento vegetativo del cultivo. Otros autores reportaron que la temperatura base para la elongación de entrenudos fluctúa entre los 16 °C (Singels y Bezuidenhout, 2002; Singels et al., 2005) a 19,8 °C (Liu et al., 1998). Todas estas evidencias hacen suponer que durante el ciclo 2017/18 la temperatura también pudo haber tenido una influencia negativa en la generación del rendimiento y sus componentes.

Los resultados permiten no rechazar la Hipótesis 1 que plantea que “zonas de manejo con mayor contenido de materia orgánica y arcilla presentan incrementos en la productividad de la caña de azúcar debido a incrementos en a) la eficiencia de uso de nitrógeno, b) la eficiencia de recuperación del nitrógeno, c) la eficiencia de uso de agua y d) la eficiencia de captura del agua, respecto a zonas de manejo con textura más arenosa y bajo contenido de materia orgánica”. Las variables RC, BT, NT, MST y PSt, como así también las eficiencias en el uso de recursos (ERN, EFN, EUN, ECA y EUA) presentaron valores más altos en la zona 2 para ambos ciclos agrícolas. Estas diferencias entre zonas fueron mayores y significativas en el ciclo agrícola 2017/18 posiblemente debido a la reducción de la variabilidad intrazona lograda en la implantación del ensayo y a las condiciones ambientales más extremas de este ciclo agrícola. Por ejemplo, el RC durante el ciclo 2017/18 fue un 26,9% más bajo para la zona 1 respecto de la zona 2, mientras que para el ciclo agrícola 2015/16 fue de solo 9,63% inferior. En general, los valores se encuentran dentro del rango reportado por Acreche et al (2015) quienes determinaron que los RC promedio de caña soca cultivadas en Argentina varían de 60 a 140 Mg ha⁻¹. En ambos ciclos agrícolas se observó que las características propias del

suelo de la zona 2 (textura arcillosa, mayor capacidad de retención hídrica y mayor contenido de materia orgánica) generaron una mayor disponibilidad y mejor distribución de agua y N en el suelo durante los ciclos agrícolas, sin embargo esta aproximación presenta la limitante de que este trabajo considera la tasa de mineralización promedio para suelos de caña de azúcar en el norte de Argentina y no mediciones in-situ de la mineralización en cada uno de las zonas trabajadas.

La mayor disponibilidad y mejor distribución de agua y N en la zona 2 se tradujo en mayores RC, BT, MST, NT y PSt y por ende en mayores ERN, EUN, ECA y EUA. A pesar de que la interacción entre zona de manejo y fertilización fue no significativa, existió una tendencia que muestra que los tratamientos de fertilización nitrogenada utilizados en el ciclo agrícola 2017/18 podrían haber incrementado parte de la diferencia encontrada entre zonas homogéneas. Considerando solo el tratamiento de fertilización nitrogenada comercial común en ambos ciclos agrícolas (115 kg N ha^{-1}), la diferencia entre zonas de manejo homogéneas para RC en el ciclo 2017/18 disminuyó (20,6% más bajo para la zona 1 respecto a la zona 2) en comparación con la diferencia encontrada considerando todos los tratamientos de fertilización nitrogenada (26,9% más bajo para la zona 1 respecto a la zona 2).

Los valores de EUN y EUA fueron mayores en la zona 2 que en la zona 1 en ambos ciclos agrícolas, siendo la diferencia entre zonas de 3 y $26,7 \text{ kg MST kg N}^{-1}$ y $2,3$ y $5,9 \text{ kg MST mm}^{-1}$, para los ciclos agrícola 2015/16 y 2017/18, respectivamente. Al igual que para el RC, la mayor diferencia entre zonas para el ciclo 2017/18 se debió a la incidencia de las condiciones climáticas imperantes en cada ciclo agrícola y a la homogeneidad lograda en la implantación del segundo ciclo agrícola. Nuevamente se observa una tendencia de disminución de las diferencias entre zonas debido a los tratamientos de fertilización nitrogenada utilizados en el ciclo agrícola 2017/18 si solo se considera el tratamiento de fertilización nitrogenada comercial (115 kg N ha^{-1}), las diferencias entre zonas para las EUN y EUA durante el ciclo 2017/18 fueron $18,8 \text{ kg MST kg N}^{-1}$ y $4,3 \text{ kg MST mm}^{-1}$. Dentro de las principales causas que generan una disminución en la EUN se encuentran las pérdidas de N del sistema (volatilización, denitrificación, escurrimiento, lixiviación, inmovilización) (Raun y Schepers, 2008), la falta de sincronía entre la demanda del cultivo y el aporte de N desde el suelo (Shanahan et al., 2008; Cassman et al., 2002), la influencia de las condiciones ambientales durante la estación de crecimiento (Hatfield y Prueger, 2004) y las aplicaciones uniformes de N en lotes con variabilidad espacial (Schmidt et al., 2007). Esta tesis confirma que, entre otras causas, las diferencias de EUN entre zonas se podrían asociar a la variabilidad espacial de los lotes.

La diferencia de EUN entre las zonas 1 y 2 es similar a la reportada por Thorburn et al. (2017), quienes encontraron en Australia que la EUN del cultivo de caña de azúcar en un suelo de textura fina fue más alta que en un suelo de textura gruesa. Al igual que los resultados reportados en esta tesis, estas diferencias se debieron, en parte, a la mayor capacidad de retención de agua del suelo de textura fina. Los mismos autores encontraron que años con precipitaciones relativamente altas y una buena distribución de la misma a lo largo del ciclo del cultivo (como las que se registraron en el ciclo

2015/16), producen una disminución de las diferencias de EUN (y por lo tanto en el RC) entre estos dos tipos de suelo, es decir que la capacidad de retención de agua del suelo y sus efectos resulta menos importante en años lluviosos que en años secos. En años secos, parte en esta mayor respuesta en la EUN asociada a una mayor retención de agua en suelos con mayor contenido de arcilla se puede deber a una mayor ERN, algo que se encontró en los resultados de esta tesis. Los valores reportados de ERN son similares a los reportados por otros autores (Garside y Bell 2007; Thorburn et al. 2003), los que sostienen que esta variable es altamente dependiente de factores como la época del año, el suelo, sitio y manejo agronómico. Precisamente, y en contraposición a lo que ocurre en un año seco, los resultados de esta tesis mostraron que en el ciclo agrícola 2015/16 existió una tendencia a que esta variable sea mayor en la zona 1. Esto se puede explicar en que, al disponer el suelo de humedad suficiente, la retención de humedad del mismo no jugó un papel relevante en la ERN, siendo las características propias de la zona 1 (mayor facilidad de un suelo arenoso para mineralizar la materia orgánica; ver más abajo) la que logró ceder el N disponible al cultivo con mayor facilidad.

Las propiedades físico-químicas de los suelos y la topografía del terreno han sido reportadas como generadoras de variabilidad en los rendimientos de diferentes cultivos. Por ejemplo, Cox et al. (2003) encontraron en Mississippi (USA) que la producción de soja aumentaba a medida que se incrementaba el contenido de arcillas de los suelos como consecuencia de una mayor disponibilidad de agua en períodos secos o precipitaciones inferiores a lo normal, mientras que Baver et al. (1972) y Rogasik et al. (1988) reportaron que suelos con texturas francas y franco arenosas, con bajos contenidos de arcillas y MO afectaron de forma negativa la productividad del cultivo de trigo. Por otro lado, la MO es un componente crítico de la relación planta-suelo debido a que es clave en el ciclado de nutrientes e influye sobre propiedades químicas que modifican la disponibilidad de los mismos (Bongiovanni y Lombartini, 2006; Vityakon, 2007). Además, la disminución de la MO causa pérdidas en la capacidad de retención de agua y nutrientes, acelera los procesos erosivos y disminuye la actividad biológica y enzimática de los suelos (Ghani et al., 2003). En caña de azúcar, Souza et al. (2010) encontraron que el potasio y el relieve del lote fueron los atributos más importantes para la obtención de altos rendimientos. Cerri y Magalhães (2012) encontraron que el rendimiento se correlacionó positivamente con el carbono, N, y la MO, y negativamente con el P. Además, en el mismo estudio, el contenido de arcilla explicó el 22% de la variación del rendimiento. Landell et al. (2003) determinaron que el 47% de la variación del rendimiento de la caña de azúcar se explicó por el porcentaje de saturación de bases, el contenido de calcio y la MO. Sanches et. al. (2019) reportaron que la cantidad de MO disponible del suelo, el contenido de arcilla y la capacidad de intercambio catiónico fueron los factores más importantes que afectaron la variación del rendimiento de la caña de azúcar. Por lo tanto, existen amplias evidencias de que modificaciones en la textura y la MO generan variaciones en la disponibilidad de agua y nutrientes que afectan el rendimiento. Precisamente, las diferencias encontradas en las propiedades físico-químicas del suelo entre las zonas 1 y 2 de este experimento permitieron

identificar las posibles causas de las variaciones en el RC y demás componentes del mismo, los cuales generaron las diferencias en ERN, EUN, ECA y EUA.

La textura del suelo y el contenido de MO actúan de manera sinérgica debido a que las arcillas protegen la MO contra la biodegradación (Van Veen y Kuikman, 1990), ya que la misma es adsorbida sobre la superficie de las partículas de arcilla y limo o es recubierta por los minerales de arcilla (Golchin et al., 1994). Estos mecanismos ralentizan la tasa de mineralización del N de la MO (Juma, 1993; Ladd et al., 1993), la cual ha sido reportada como el principal factor que incide sobre la disponibilidad de N en el suelo (Robertson et al., 1993; Zak et al., 1990). En años sin limitaciones hídricas relevantes, el menor contenido de MO y N de la zona arenosa se vería contrabalanceado por la mayor tasa de mineralización en la misma, como posiblemente ocurrió en el ciclo agrícola 2015/16 de este experimento. Por otro lado, en años con limitaciones hídricas manifiestas, como en el ciclo agrícola 2017/18 de este experimento, la tasa de mineralización de un suelo arenoso no compensa el menor contenido de MO y N del mismo. Además, las características propias de un suelo arcilloso permitirían que los mismos sincronicen mejor la oferta de nitrógeno del suelo y la demanda del mismo por el cultivo, como pudo haber ocurrido en la zona 2 de este experimento.

Se recopilaron evidencias suficientes para rechazar la Hipótesis 2 que plantea que “zonas de manejo con mayor contenido de materia orgánica y arcilla permiten un mayor aprovechamiento del fertilizante nitrogenado, respecto a zonas de manejo con textura arenosa y menor contenido de materia orgánica, debido a un mejor aprovechamiento de la humedad disponible”. La falta de interacciones entre zona de manejo y dosis de N generó que el efecto de la fertilización nitrogenada sobre RC, BT, MST, NT, PSt, EFN, EUN, ECA y EUA fuese independiente de la zona. En general, los efectos puros de tratamiento muestran mayores valores de dichas variables en la Zona 2. Como se mencionó anteriormente, esto estaría relacionado con las mejores propiedades físico-químicas del suelo de esta zona. La tendencia general fue a mayor dosis de fertilización nitrogenada, mayor RC, BT, MST, NT, PSt, ECA y EUA; mientras que para EFN y EUN el comportamiento fue el opuesto, registrándose las mayores eficiencias con las menores dosis de N. Otros autores determinaron una relación lineal y positiva entre el RC, BT, MST o NT y el aumento de la dosis de fertilización nitrogenada (Trivelin et al. 2002; Otto et al. 2009; Almeida Júnior et al. 2011; Chalco Vera, 2012). La zona 2 presentó una importante respuesta a la fertilización nitrogenada, registrándose un incremento del 30 o 13% en la MST o NT, respectivamente, cuando se compararon las dosis de fertilización 0 y 115 kg N ha⁻¹. Bologna-Campbell et al. (2013), al comparar la respuesta de la caña de azúcar a la fertilización nitrogenada, encontraron un incremento en la MST del 37% al utilizar una dosis similar a la reportada en este trabajo de tesis (120 kg N ha⁻¹), mientras que Trivellin et al. (2002) reportaron un comportamiento similar en el NT al evaluar la aplicación de N en cantidades crecientes. En un estudio más detallado de la respuesta de la dinámica de tallos a distintas dosis de fertilización nitrogenada, Chalco Vera (2012) señaló que el efecto del incremento de N en el NT actúa más bien disminuyendo la mortandad de tallos al final del macollaje que aumentando el NT que se alcanzan en pleno macollaje. En este sentido, Bell et al.

(2014) determinaron para el cultivo de caña de azúcar, que la mayor parte de la absorción de N del cultivo ocurre entre los 6-8 meses después de la plantación o rebrote, lo cual se confirmó en los resultados encontrados en esta tesis. La mayor absorción de N se produjo a partir del gran crecimiento del cultivo y en las mayores dosis de fertilización nitrogenada, asociadas a un mayor NT (posiblemente debido a una menor mortandad de los mismos). Las razones expuestas, y las características del suelo de la Zona 2, explican en parte las diferencias entre zonas.

Por lo general, la EUA es mayor en zonas de mayor productividad y se asocia positivamente con el N disponible. Esta relación entre EUA y la disponibilidad de N ha sido documentada previamente por varios autores (Teixeira et al., 2014; Halvorson et al., 2004) quienes reportaron que la fertilización nitrogenada mejoró la EUA por el incremento en el aprovechamiento de la radiación, asociado a una mayor expansión foliar y retraso en la senescencia de las hojas (Lemaire y Gastal, 2009), lo que generó una mayor capacidad fotosintética incrementando la proporción de agua transpirada.

Si bien no existió diferencia significativa para la interacción entre zona y fertilización nitrogenada, en la zona 1 la EUA se incrementó un 45% al comparar las dosis de fertilización de 0 y 115 kg N ha⁻¹, mientras que para la zona 2 este incremento fue del 21%. Estos resultados demuestran que podría haber un efecto sinérgico de la fertilización nitrogenada sobre la EUA, y que el mismo sería diferente para ambientes con propiedades físico-químicas del suelo distintas, generando mayor respuesta en la EUA a la fertilización con N en suelos de textura más liviana. Esta mayor respuesta a la fertilización nitrogenada en RC, BT, MST y NT en la zona 1 se traduciría en una mayor EUA. Dicho de otra manera, para las condiciones climáticas del ciclo 2017/18 existió una tendencia que mostró que las pérdidas productivas por no fertilizar fueron mayores en la zona arenosa que en la zona arcillosa. Estos resultados son similares a los que mostraron Ye et al. (2007) para el cultivo de arroz fertilizado con dosis crecientes de N en dos suelos diferentes (arenoso y arcilloso). Estos autores encontraron que el rendimiento en el suelo arcilloso fue mayor que en el suelo arenoso y, a su vez, que el efecto del aumento del rendimiento debido a la fertilización nitrogenada fue mayor en el suelo arenoso que en el suelo arcilloso, justificando esta respuesta en la diferente fertilidad básica del suelo.

Los valores promedio de EUN encontrados en este estudio (1,17; 0,63 y 0,53 Mg MST kg N⁻¹ para las dosis de N de 58, 115 y 173 kg N ha⁻¹) se encuentran dentro del rango reportado por Thorburn et al. (2017), quienes mostraron que, a nivel mundial, la EUN promedio de la producción de caña de azúcar varía entre 0,25 y 3 Mg MST kgN⁻¹, dependiendo de la dosis de fertilización, los suelos y el clima. Las menores EUN se encuentran en los países que tienen las tasas de aplicación de fertilizante nitrogenado promedio más altas (Ladha et al., 2005). Esta reducción en la EUN con el aumento de la dosis de N está relacionada con una sub-utilización del N aportado, ya sea debido a posibles pérdidas por lixiviación y volatilización del N o debido a un posible desequilibrio nutricional en dosis altas que lleva a menor eficiencia en la utilización del N absorbido (Mello, 1987). Dicho de otra manera, el efecto de la fertilización nitrogenada sobre la EUN se explica a través de ERN y EFN. Bell et al (2014)

observaron, en Australia, que dosis de N en el rango de 140 a 180 kg N ha⁻¹ arrojaron resultados variables en RC (50 a 150 Mg ha⁻¹), en el contenido de N en la biomasa (40 a 212 kg N ha⁻¹) y en la ERN (0,1 a 0,22 kg N kg N⁻¹ o 1 a 22%); Thorburn et al. (2003) registraron resultados similares en Australia, obteniendo una ERN similarmente baja (< 10%) en un cultivo de caña fertilizado con 120 kg N ha⁻¹; siguiendo esta tendencia Meier et al. (2006) registraron recuperaciones mucho más bajas de N proveniente del fertilizante en la biomasa aérea (4 a 5% del N aplicado). Por otro lado Vallis et al (1996) y Prasertsak et al. (2002) estudiaron la ERN obteniendo un amplio rango de valores con promedios que oscilaron entre 23 y 33%. Las ERN reportadas en esta tesis presentan valores en el rango de los estudios mencionados, pero no se observó una respuesta de la misma a la fertilización nitrogenada. En cuanto a la EFN, los valores encontrados en esta tesis (1,47; 1,32; 1,15 Mg MST kg N absorbido para las dosis de N 0, 58 y 115 kg N ha⁻¹) se encuentran dentro del rango y presentaban la misma tendencia al aumento de la fertilización que lo reportado por Bell et al (2014). Estos autores realizaron una compilación de diversos trabajos en Australia y determinaron que, según la disponibilidad de N, la EFN variaba entre 2,35 a 0,45 Mg de caña fresca kg N en la biomasa⁻¹, para cultivos con y sin limitaciones de N respectivamente. Es decir que la EFN se maximiza cuando la disponibilidad de N es baja, ilustrando la flexibilidad con la que el cultivo de la caña de azúcar utiliza el N.

Estos resultados y los de la literatura demuestran la baja eficiencia con que la caña de azúcar utiliza el N y que existe una interacción entre el nitrógeno y el agua total disponible (a través de la textura y el contenido de MO) que permite un aprovechamiento diferencial del mismo. Diversos estudios se han realizado para incrementar la EUN en caña de azúcar tratando de penalizar lo menos posible el rendimiento del cultivo. Por un lado, existen estudios que disminuyen la dosis de N en busca de mayor eficiencia. En Brasil, una disminución de la dosis de N de 100 a 50 kg de N ha⁻¹ generó un aumento del 95-98% en la EUN y una pérdida de rendimiento del 1-2% (Otto et al., 2013; Amaral y Molin, 2013). En la misma línea, Otto et al. (2017) mediante estudios de simulación, demostraron que una reducción del 33% en la dosis de fertilizante nitrogenado (120 Kg N ha⁻¹) generó un aumento del 54% en la EUN (de 0,83 a 1,28 Mg tallo kg N⁻¹) con solo 1% pérdida de rendimiento (de 93 a 92 Mg ha⁻¹). Otra de las alternativas de manejo que existen para aumentar la EUN son las aplicaciones partidas del fertilizante, sincronizando la mayor oferta de N con el momento de mayor demanda del cultivo. Orcellet et al. (2015) demostraron en el cultivo de cebada (*Hordeum vulgare L.*) que, dependiendo de la dosis de N, el efecto del fraccionamiento en la aplicación de N aumentó significativamente la EUN y el rendimiento del cultivo.

Los resultados de esta tesis sugieren una tercera alternativa que es un manejo diferencial de la fertilización nitrogenada según zonas homogéneas. Esta alternativa, no excluyente de las anteriores, considera que el fertilizante se aprovecharía con distinta eficiencia según las condiciones ambientales, las propiedades físico-químicas del suelo y el momento del ciclo del cultivo, debido a la diferente productividad de los ambientes.

4.2 Principales resultados

- La combinación de muestreos *in situ* con imágenes satelitales constituye una herramienta sencilla y eficaz para delimitar zonas de manejo homogéneas en caña de azúcar.
- Se debe considerar el efecto de las propiedades físico-químicas de los suelos para incrementar la eficiencia en el uso de recursos e insumos (y por lo tanto del rendimiento) en zonas de manejo homogéneas en caña de azúcar: zonas homogéneas con mayores contenidos de arcillas (franco-arcillosos) y mayor contenido de materia orgánica generaron mayores eficiencias de captura y uso del agua y nitrógeno.
- Existe interacción entre condiciones ambientales y zona de manejo homogénea en la respuesta al uso del N (sin considerar el efecto del N aplicado) y agua disponible en el suelo: ciclos agrícolas secos permitirían una mejor respuesta relativa, en términos de eficiencia, al uso de estos recursos y/o insumos en suelos de bajo contenido de materia orgánica y textura más gruesa (franco-arenosa), mientras que ciclos agrícolas húmedos permitirían maximizar las respuestas en suelos de alto contenido de materia orgánica y texturas más finas (franco-arcillosa).
- El incremento de la dosis de fertilización nitrogenada repercute en una mayor BT y RC, pero disminuye la EUN; sin embargo, una mayor fertilización permite un mejor aprovechamiento del agua, generando una mayor EUA.
- No existió un aprovechamiento diferencial del fertilizante nitrogenado según las distintas texturas del suelo presentes en las dos zonas, lo que se tradujo en similares productividades y eficiencias entre zonas; sin embargo, existió una tendencia a maximizar la EUA ante incrementos de las dosis de N en suelos de textura más liviana.

4.3 Implicancias prácticas

Los resultados promisorios de esta tesis permiten afirmar que sería posible diagramar estrategias de manejo de la fertilización nitrogenada y el riego en caña de azúcar considerando zonas de manejo homogéneas. Este manejo podría permitir un incremento en la eficiencia en el uso de recursos e insumos que repercutiría en una mayor productividad, rentabilidad y menor contaminación ambiental. Para ello se deben considerar, además, las condiciones climáticas imperantes en el ciclo agrícola. Si se disponen de recursos (agua y nitrógeno) finitos (ya sea por cantidad disponible, oportunidad de aplicación o estrategia de manejo sustentable), en un año donde las previsiones climáticas apuntan a un año seco, las mayores respuestas a la aplicación de los mismos se encontrarían en un suelo de textura liviana (franco-arenosa), por lo que se debería priorizar el uso en dichos suelos (a pesar de que los valores absolutos de rendimientos esperables sean mayores en suelos franco-arcillosos). Si por el contrario las previsiones apuntan a un ciclo agrícola húmedo, se debería considerar una estrategia

dual en el uso de recursos, seleccionando los momentos de aplicación según la textura del suelo. Por un lado, las respuestas serán mayores en un suelo de textura fina (franco-arcilloso), por lo que se debería priorizar la utilización de recursos en dichos suelos. Sin embargo, al ser un año que climáticamente es favorable para la producción de caña de azúcar, fertilizar diferencialmente ambas zonas también podría ser una estrategia exitosa: aplicaciones de N en un suelo franco-arenoso en una ventana de fertilización reducida favorecería el uso eficiente de este nutriente ya que el mismo tendría menos posibilidades de ser lixiviado por su menor afinidad con las partículas de arena; mientras que en un suelo franco-arcilloso, la ventana de fertilización sería más amplia ya que el N aplicado podría ser retenido con mayor fuerza, lo que aumentaría el aprovechamiento del N por parte del cultivo en una ventana de tiempo más amplia (entre macollaje y gran crecimiento) sincronizando mejor la oferta de N del suelo y la demanda del mismo por el cultivo.

Bibliografía

- Acreche, M.M., Saez, J. y Chalco Vera, J. (2015). Physiological bases of genetic gains in sugarcane yield in Argentina. *Field Crops Research*. 175.
- Acreche, M.M. (2017). Nitrogen-, water- and radiation-use efficiencies affected by sugarcane breeding in Argentina. *Plant Breeding*, 136, 174-181.
- Ahmadi, S. H., Andersen, M. N., Plauborg, F., Poulsen, R. T., Jensen, C. R., y Sepaskhah, A. R. (2010). Effects of irrigation strategies and soils on field grown potatoes: yield and water productivity. *Agricultural Water Management*. 97, 1923–1930. doi:10.1016/j.agwat.2010.07.007
- Ahmadi, S. H., Plauborg, F., Andersen, M. N., Sepaskhah, A. R., Jensen, C. R., y Hansen, S. (2011). Effects of irrigation strategies and soils on field grown potatoes: root distribution. *Agricultural Water Management*. 98, 1280–1290. doi:10.1016/j.agwat.2011.03.013
- Almeida Júnior A.B., Nascimento M.F.S., Silva F.B.V. y Gomes W.A. (2011) Soil fertility and uptake of nutrients by sugarcane fertilized with filter cake. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* . 15(10): 1004-1013.
- Amaral, L.R. y Molin, J.P. (2013). The effectiveness of three vegetation indices obtained from a canopy sensor in identifying sugarcane response to nitrogen. *Agronomy Journal*. 106, 273–280.
- Anderson, D.L. (1997). Nitrogen and sugarcane. *Sugar Journal*, April 1997.: 8-9.
- Andrade, F. (2016). Los desafíos de la agricultura. INTA, FCA UNMP, CONICET, IPNI. Ediciones International Plant Nutrition Institute. 135.
- Andrade, F.H. y Gardiol, J.M. (1994). Sequía y producción de los cultivos de maíz, girasol y soja. Boletín técnico 132. EEA INTA Balcarce.
- Arias, M. y Bianchi A.R. (1996). Estadísticas Climatológicas de la provincia de Salta, Gobierno de Salta – INTA. 172.
- Bayer, L.D., Brodie, H., Tanimoto, T. y Trowse, A.C. (1962). New approaches to the study of cane root systems. *Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technology*. 11, 248–253.
- Bell, M.J. y Garside, A.L. (2014). Growth and yield responses to amending the sugarcane monoculture: interactions between break history and nitrogen fertiliser. *Crop & Pasture Science* 65, 287–299
- Benvenuti, F. A. (2005). Relação de índices espectrais de vegetação com a produtividade da cana-de açúcar e atributos edáficos Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. 120 p.
- Bianchi, A.R. y Yáñez, C.E. (1992). Las precipitaciones en el Noroeste Argentino. 2da edición. INTA, EEA Salta. 384
- Blackburn, F. 1984. Sugar-cane. Longman, New York. 414
- Bologna Campbell I., Franco H.C.J., Vitti A.C., Faroni C.E., Costa M.C.G. y Trivelin P.C.O. (2013) Impact of Nitrogen and Sulphur Fertilizers on Yield and Quality of Sugarcane Plant Crop. *Sugar Tech*. 15(4): 424-428.

- Bongiovanni R., E.C. Mantovani, S. Best y A. Roel. (2006). Agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. PROCISUR/IICA. Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico y Agroindustrial del Cono Sur. Montevideo, Uruguay. ; 244. <http://www.procisur.org.uy/data/documentos/135050.pdf>
- Bongiovanni, M.D. y Lobartini, J.C. (2006). Particulate organic matter, carbohydrate, humic acid contents in soil macro-and microaggregates as affected by cultivation. *Geoderma*: 136, 660-665.
- Bongiovanni, R. (2002). A Spatial Econometric Approach to the Economics of Site-Specific Nitrogen Management in Corn Production. Ph.D. Thesis, Agricultural Economics, Purdue University. 306.
- Bortolini, C. G. (2000). Eficiência do método de adubação nitrogenada em pré-semeadura do milho implantado em semeadura direta após aveia preta. 48f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Burt, C. y Styles S. (1999). Modern Water Control and Management Practices in Irrigation. Impact on performance. *FAO Water Reports* N.º19. FAO, Roma, Italia.
- Calcino, D.V. (1994) Australian Sugarcane Nutritional Manual. SRDC/BSES, Indooroopilly, Queensland.
- Campbell, C.A., McConkey, B.G., Zenter, R.P., Selles, F. y Curtin, D., (1996). Long-term effects of tillage and crop rotations on soil organic C and total N in a clay soil in southwestern Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci.* 76, 395–401.
- Cassman, K.G., Dobermann, A., y Walters, D.T. (2002). Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. 31, 132–140.
- CAA. Centro azucarero argentino, (2017) <http://centroazucarero.com.ar/azucar/>
- Cerri, D.G.P. y Magalhães, P.S.G., (2012). Correlation of physical and chemical attributes of soil with sugarcane yield. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 47, 613-620.
- Chalco Vera, J. (2012). Eficiencias De Absorción y uso del nitrógeno de la caña de azúcar en Tucumán. Informe final Practicando agrónomo optativo. Facultad de Agronomía y Zootecnia. Universidad nacional de Tucumán. 23
- Chalco Vera, J., Valeiro, A., Posse Beaulieu, G. y Acreche, M M. (2017); To burn or not to burn: The question of straw burning and nitrogen fertilization effect on nitrous oxide emissions in sugarcane; Elsevier Science; *Science of the Total Environment*; 587-588; 6-2017; 399-406
- Chuvieco, E. (1996). Fundamentos de teledetección especial. Ediciones RIALP. P 325-336.
- Ciampitti I.A. y Garcia. F.O. (2007). Balance y eficiencia de uso de los nutrientes en sistemas agrícolas. IPNI Cono Sur. International Plant Nutrition Institute. 13

- Cox, M.S., Gerard, P.D., Wardlaw, M.C. y Abshire, M.J. (2003) Variability of selected soil properties and their relationships with soybean yield. *Soil Science Society of America Journal*, 67(4): 1296–1302.
- Das, U.K. (1936) Nitrogen nutrition of sugarcane. *Plant Physiology* 11: 251-317.
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., y Robledo, C. W. (2011). InfoStat. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba.
- Diaz-Zorita, M., Buschiazzo D. E, y N. Peinemann. (1999). Soil organic matter and wheat productivity in the Semiarid Argentine Pampas. *Agronomy Journal*. 91: 276-279.
- Digonzelli, P. (2013). La caña de azúcar y la disponibilidad hídrica. *Avance Agroindustrial*. 34. 14-15.
- Diola, V. y Santos, F. (2010). Cana-de-açúcar: Bioenergia, açúcar e álcool – Tecnologias e perspectivas. 577 p.
- Dobermann, A. (2007) Nitrogen Use Efficiency: Measurement and Management. Fertilizer Best Management Practices. 1-28.
- Doerge, T.A. (1999). Management zone concepts. Information Agriculture Conference. Stewart Center, Purdue, USA.
- Doorenbos J. y Kassam A.H. (1979). Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage paper No. 33
- Durigon, R., Schlosser, J. F., Russini, A., Dornelles, M. E. C. y Pinheiro, E. D. (2009). Correlações entre atributos químicos do solo e atributos da cultura e da produtividade de arroz irrigado determinadas com técnicas de manejo localizado. *Ciência Rural*, 39(9).
- Espíndola C. y M. Paytas, 2015. Rendimiento de tallos y sacarino ante variaciones en la disponibilidad hídrica del suelo en dos variedades de caña de azúcar. *Ciencia y Tecnología de los Cultivos Industriales* 7, 39-47.
- Fang, J., Su, Y. Effects of Soils and Irrigation Volume on Maize Yield, Irrigation Water Productivity, and Nitrogen Uptake. (2019). *Scientific Reports*. 9, 7740 <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41447-z>
- FAO, (2006). Fertilizer use by crop. FAO Fertilizer and plant nutrition bulletin.
- Ferraris, R. and L. S. Chapman. 1991. The dynamics of bud development in ratooning stubble of sugarcane varieties. *Proc. Aust. Soc. Sugarcane Technol.* 13: 164-171
- Ferraro, D.O., D.E. Rivero y Ghersa, C.M. (2009). An analysis of the factors that influence sugarcane yield in northern Argentina using classification and regression trees. *Field Crops Research* 112: 149-157.
- Fogliata F.A. (1995). Agronomía de la Caña de Azúcar. Ediciones El Graduado, Tucumán Argentina. 1453.
- Fontana F; M Partulane; M Sacks y A Quiroga. (2006). Efecto del espesor de suelo sobre propiedades edáficas y rendimiento de trigo en la Región Semiárida Pampeana. En: Aspectos de la evaluación y manejo de los suelos en la región

semiárida pampeana Física de Suelos. Publicación técnica N°66. Ediciones INTA. 51 pp.

- Galbally, I., Meyer, M., Bentley, S., Weeks, I., Leuning, R., Kelly, K., Phillips, F., Barker-Reid, F., Gates, W., Baigent, R., Eckard, R. y Grace, P., (2005). A study of environmental and management drivers of non-CO₂ greenhouse gas emissions in Australian agro-ecosystems. *Environmental Science*. 2
- Garside A.L. y Bell M.J. (2007). The value of legume breaks to the sugarcane cropping system – cumulative yields for the next cycle, potential cash returns from the legume and duration of the break effect. *Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists* 29.
- Gascho, G.J. (1985). Water sugarcane relationships. *Sugar Journal*. 48(6): 11-17.
- Ghani, A., Dexter M. y KW Perrott K.W. (2003). Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilization, grazing and cultivation. *Soil Biology and Biochemistry* . 35, 1231–1243.
- Glass, A.D.M. (2003): Nitrogen use efficiency of crop plants: physiological constraints upon nitrogen absorption. *Critical Reviews of Plant Sciences* 22: 453-470.
- Gleick, P. (2003). Soft path solution to 21st century water needs. *Science* 320:1524-1528.
- Golchin, A., Oades, J.M. Skjemstad J.O., y P. Clarke. (1994). Study of free and occluded particulate organic matter in soil by solid state ¹³C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. *Australian Journal of Soil Research*. 32:285–309.
- Good, A., Shrawat, A. K. y Muench, D. G. (2004). Can less yield more? Is reducing nitrogen input into the environment compatible with maintaining crop production? *Trends in Plant Science*, 9, 597–605.
- Hajaria, E.; Watta, M.P.; Snyman, S. (2013). Towards improved nitrogen use efficiency in sugarcane by overexpression of alanine aminotransferase. *South African Journal of Botany* 86:174.
- Hallberg, G. (1987). Agricultural chemicals in ground water: Extent and implications. *American Journal of Alternative Agriculture* ,2, 3-15.
- Halvorson, A.D., Nielsen D.C., y C.A. Reule. (2004). Nitrogen fertilization and rotation effects on no-tillage dryland wheat production. *Agronomy Journal*, 96, 1196–1201.
- Hatfield, J. (2000). Precision agriculture and environmental quality: Challenges for research and education. National soil tilt laboratory, *Agricultural Research Service*, USDA.
- Hatfield, J.; Prueger, J. (2004). Nitrogen over-use, under-use and efficiency. Published on Web site.
- Herrera, M.S. (2000). Contribución metodológica a la zonificación agroclimática de la caña de azúcar: Caracterización agroclimática de las áreas cañeras de la

provincia La Habana. Tesis presentada en opción al grado de Doctor en Ciencias Agrícolas. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. La Habana.

- Hunsigi G. (2001). Sugarcane in Agriculture and industry. Eastern Press Pvt Ltd., Bangalore India 491 p.
- Inman-Bamber N. G. (1994). Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. *Field Crops Research*, 36: 41-51.
- Inman-Bamber N.G. (2004). Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. *Field Crops Research*, 89, 107-122.
- IPNI. (2007). Consideraciones en el uso eficiente de nutrientes .Informaciones agronómicas n° 67. International Plant Nutrition Institute. 3 p
- Isa D.W., Hofman G., van Cleemput O. (2006). Uptake and balance of fertilizer nitrogen applied to sugarcane. *Field Crops Research*, 95, 348-354.
- Jaynes, D.B.; Colvin, T.S. (1997). Spatial variability of corn and soybean yield. *Agronomy Journal* ,89, 30-37.
- Juma, N.G., (1993). Interrelationships between soil structure/texture, soil biota/soil organic matter and crop production. *Geoderma* ,57, 3-30.
- Keating, B.A, Kingston G, Wood A.W., Berding N y Muchow R.C. (1999). Monitoring nitrogen at the mill to guide N fertilising practice on the farm. *Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists*, 21, 10-19.
- Keeney D.R. y Nelson D.W. (1982). Nitrogen-Inorganic forms. En: Methods of Soil Analysis Part2 Chemical and microbiological properties. Second edition. *American Society of Agronomy*, Soil Science Society of American Publisher. 643-693
- Kemerer, A. (2011). Procedimientos para la delimitación de zonas de manejo mediante imágenes satelitales. Ediciones INTA. p 2-4.
- Kingston, G. (2000). Climate and the management of sugarcane. En: Hogarth, D. M. and P. G. Allsopp (eds.), *Manual of Canegrowing*, BSES, Brisbane, Australia, pp. 7-25
- Kitamura, A.E., Carvalho, M.P. y Lima, C.G.R. (2007). Relação entre a variabilidade espacial das frações granulométricas do solo e a produtividade do feijoeiro sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31(2), 361-369.
- Kravchenko, A.N. y D.G. Bullock. (2000). Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil proprieties. *Agronomy Journal*, 92, 75-83.
- Ladd, J.N., Amato, M., Jackson, R.B., yand Butler, J.H. (1983). Utilization by heat crops of nitrogen from legume residues decomposing in soils in the field. *Soil Biology and Biochemistry*, 15, 231–238.
- Ladha Jagdish K., Pathak H., Krupnik T.J., Six J. y van Kessel C. (2005) Efficiency of Fertiliser Nitrogen in Cereal Production: Retrospects and Prospects *.Advances in Agronomy* ,87, 85 –156

- Landell, M.G.A., Prado, H., Vasconcelos, A.C.M., Perecin, D., Rossetto, R., Bidoia, M.A.P., Silva, M.A.O., Xavier, M.A. (2003). Oxisol subsurface chemical attributes related to sugarcane productivity. *Scientia Agricola* 60: 741-745.
- Lassaletta, L., Billen, G., Grizzetti, B., Anglade, J., y Garnier J. (2014). 50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: the relationship between yield and nitrogen input to cropland. *Environmental Research Letters*, 9, 1-9.
- Lemaire, G. y Gastal, F.F. (2009). Chapter 8: Quantifying crop responses to nitrogen deficiency and avenues to improve nitrogen use efficiency. In: *Crop Physiology*. Sadras, V.O., Calderini, D. (Eds). 171-211.
- Lim, T.J., Park, J.M., Park, Y.E., Lee, S.E., y Kim, K.I. (2015). Effect of Soil Textures on Fruit Yield, Nitrogen and Water Use Efficiencies of Cucumber Plant as Affected by Subsurface Drip Fertigation in the Greenhouse. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 48(5), 372–378. <https://doi.org/10.7745/kjssf.2015.48.5.372>
- Liu, D. L.; G. Kingston and T. A. Bull. (1998). A new technique for determining the thermal parameters of phenological development in sugarcane, including suboptimum and supra-optimum temperature regimes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 90, 119-139.
- Long, S. (1999) Environmental responses. En: *C4 Plant Biology* (eds R.F. Sage y R.K. Monson), 215–249.
- Luchiari, A.Jr., Shanahan, J., Francis, D., Schlemmer, M., Schepers, J., Liebig, M., Schepers, A., Payton, S. (2000). Strategies for establishing management zones for site specific nutrient management. 5th International Conference on Precision Agriculture. *Precision Agriculture Center*. 3
- Marques, M.O., Marques, T.A. y Tasso Júnior, L.C. (2001). Tecnologia do açúcar. Produção e industrialização da cana-de-açúcar. 166 p.
- Medrano, H., Bota, J., Cifre, J., Flexas, A., Ribas-Carbó, M. y J. Gulías (2007) *Investigaciones Geográficas*, nº 43
- Meier, E. A., Thorburn, P. J., Wegener, M. K., y Basford, K. E. (2006). The availability of nitrogen from sugarcane trash on contrasting soils in the wet tropics of North Queensland. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 75, 101–114. doi: 10.1007/s10705-006-9015-0
- Mello, F. A. F. (1987). Uréia fertilizante. Campinas: Fundação Cargil. 192 p.
- Meyer J.H., Schumann A.W., Wood R.A., Nixon D.J. y van den Berg M. (2007) Recent advances to improve nitrogen use efficiency of sugarcane in the South African sugar industry. *Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists*, 26,238–245.
- Meyer, J., Rein, P., Turner, P., Mathias, K. y McGregor, C., (2011). Good Management Practices Manual for the Cane Sugar Industry (Final).
- Montezano, F. Z., Corazza, E. J. y Muraoka, T. (2006). Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada e manejada homogeneamente. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30(5), 839-847.

- Morábito, J., Bos, M., Vos, S. y R. Brouwer. (1998). The quality of service provided by the Irrigation department to the users associations, Tunuyan System. Mendoza, Argentina. *Irrigation and Drainage Systems*, 12,49-65
- Moral, F.J., Terron, J.M. y Marques Da Silva, J.R. (2010). Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. *Soil Tillage Research*, 106, 335-343.
- Mosier, A.; C. Kroeze; C. Nevison; O. Oenema; S. Seitzinger; O. Van Cleemput. (1998). Closing the global N₂O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 52, 225-248.
- Muchow R.C. y Robertson M.J. (1994) Relating crop nitrogen uptake to sugarcane yield. *Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists*, 16, 122-130.
- Mulla, D.J. (1997). The State of Site Specific Management for Agriculture. p. 1-18.
- Mulla, D.J. y Schepers, J.S. (1997). Key processes and properties for site-specific soil and crop management. 1-18.
- Murillo, P.J. y Carbonell-González, J.A. (2012). Principios y aplicaciones de la percepción remota en el cultivo de la caña de azúcar en Colombia. Cenicaña: P. 181.
- Netafim. (2011) Irrigation wáter managment , sitio web con información detallada sobre el manejo del riego en caña de azúcar, verificado el 10 de mayo de 2018. http://www.sugarcane crops.com/agronomic_practices/irrigation_water_management/
- Nielsen S. (1998). Food Analysis Second Edition; Aspen Publication, Gaithersburg, Maryland.
- Oliveira, E.L., Andrade, L.A.B., Faria, M.A., Evangelista, A.W.P. y Morais, A.R. (2009). Uso da vinhaça de alambique e nitrogênio em cana de açúcar irrigada e não irrigada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 44(11),1398 -1403.
- Orcellet, J., Reussi Calvo, N., Echeverria, H., Sainz Rozas, H., Diovisalvi, N. y Berardo, A. (2015). Eficiencia de uso de nitrógeno en cebada en el sudeste bonaerense: efecto de aplicaciones divididas. *Ciencia del Suelo*, 33.
- Otto R., Zavaschi E., Marquesi de Souza Netto G.J., de Almeida Machado B. y Bezerra de Mira A. (2017). Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers applied to sugarcane straw. *Revista Ciência Agronômica*, 48, 413–418.
- Otto, R. , Mulvaney, R.L., Khan, S. A., y Trivelin, P.C.O. (2013). Quantifying soil nitrogen mineralization to improve fertilizer nitrogen management of sugarcane. *Biology and Fertility of Soils*, 49, 893–904.
- Otto, R., Franco, H. C. J., Faroni, C. E., Vitti, A. C., y Trivelin, P. C. O. (2009). Fitomassa de raízes e da parte aérea da cana de açúcar relacionada à adubação nitrogenada de plantio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 44, 398–405.

- Pagani, A. (2015). Manejo sitio-específico de nutrientes. En: Echeverría H.E., García F.O. (ed.). Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina. 839-870.
- Parry, M.A.J., Flexas, J.; Medrano, H. (2005). Prospects for crop production under drought: research priorities and future directions. *Annals of applied biology* 147, 211-226.
- Pene C.B.G. y Edi G.K. (1999). Sugarcane yield response to deficit irrigation at two growth stages. 136-137.
- Perego, A., Basile, A., Bonafente, A., Mascellis, R., Terribile, F., Brenna, S. y Acutis, M. (2012). Nitrate leaching under maize cropping systems in Po Valley (Italy). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 147, 57- 65
- Pereira Leite G.H. (2009). Qualidade tecnológica, produtividade e margem de contribuição agrícola da cana de açúcar em função da aplicação de reguladores vegetais no início da safra. *Ciência Rural*, 39(3) ,726-732.
- Pérez, C. y Muñoz, A. (2006). Teledetección Nociones y Aplicaciones. Universidad de Salamanca. 356 p.
- Pérez, D; Fandos C.; Scandaliaris, J.; Mazzone, L.; Soria, F.; Scandaliaris, P. (2007). Estado actual y evolución de la productividad del cultivo de caña de azúcar en Tucumán y el noroeste argentino en el periodo 1990- 2007. *Publicación Especial N° 34*. EEAOC - Estación Experimental Agroindustrial.
- Pérez, O. (2011). El cultivo de caña de azúcar en Guatemala. Cap. VII Nutrición y fertilización. Cengicaña. 1-28.
- Pierce, F.J; Nowak, P. (1999). Aspects of precision agriculture. *Advances in Agronomy*, 67, 1 -85.
- Prasertak, P., Freeney, J.R., Denmead, O.T., Saffigna, P.G., Prove, G.G. y Reghenzani, J.R. (2002). Effect of fertilizer placement on nitrogen loss from sugarcane in tropical Queensland. *Nutrient Cycling in Agroecosystem*, 62,229-239
- Prieto, D. (2006). Modernization and evolution of irrigation practices in the Rio Dulce Irrigation System, Santiago del Estero, Argentina. Una tarea de todos. Tesis Doctoral, Universidad de Wageningen, Holanda.
- Quintero, D.R. (1997). Fertilización Nitrogenada en Caña de Azúcar. Cali, Colombia. CENICANÑA. Serie técnica 21. p 15.
- Quiroga, A.R., Fernández, D., Ormeño, O. y J. Ventura. (1999). Efectos del manejo (rotación agricultura) sobre los contenidos de Materia Orgánica, Nitrógeno y Fósforo en suelos de la región semiárida pampeana. Boletín de Divulgación Técnica N°61. EEA INTA Anguil. p 13
- Quiroga, A.R., Funaro, D., Noellemeyer E. y N. Peinemann. (2005). Barley yield response to soil organic matter and texture in Pampas of Argentina. *Soil & Tillage Research*, 90,63-68
- Raun, W.R. y Schepers, J.S. (2008). Nitrogen in Agricultural Systems. *Agronomy Monograph n°49* (Eds: Schepers J.S. and W.R. Raun). 675-693.

- Robertson, M.J., Donaldson R.A., (1998). Changes in the components and sucrose yield in response to drying-off of sugarcane before harvesting. *Field Crops Research*, 55, 201-208.
- Robertson M.J., Inman-Bamber, N.G., Muchow, R.C., Wood, A.W. (1999). Physiology and productivity of sugarcane with early and mid-season water deficit. *Field Crops Research*, 64, 211-227.
- Robertson, G.P., Crum, J.R. y Ellis, B.G. (1993). The spatial variability of soil resources following long-term disturbance. *Oecologia*, 96, 451-456.
- Robertson, M.J., Wood, A.W. y R.C. Muchow, (1996). Growth of sugarcane under high input conditions in tropical Australia. I. Radiation use, biomass accumulation and partitioning. *Field Crops Research*, 48, 11-25.
- Rogasik, H., Crawford, J.W., Wendroth, O., Young, I.M., Joschko, M. y Ritz, K., (1999). Discrimination of soil phases by dual energy X-ray tomography. *Soil Science Society of America Journal*, 63, 741 -751.
- Romero E.R., Olea I., Scandaliaris J., Alonso J., Digonzelli P., Tonatto J., y Leggio Neme M.F. (2004). Recomendaciones para la fertilización de la caña de azúcar. Gacetilla Agroindustrial de la EEAOC 61: 1-10.
- Romero, E.R.; Digonzelli, P.A.; Scandaliaris, J. 2009. Manual del cañero. EEAOC, Tucumán, Argentina. 15-18.
- Rouse, J.W., Haas, R.W., Schell, J.A., Deering, D.H. y Harían, J.C. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation.
- Sadler, E.J. (1998). Spatial scale requirements for precision farming: A case study in the southeastern USA. *Agronomy Journal*, 90, 191-197.
- Saez, J.V. (2017). Dinámica de acumulación de sacarosa en tallos de caña de azúcar (*saccharum spp.*) modulada por cambios en la relación fuente-destino. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias Agropecuarias, de la Universidad Nacional de Córdoba. 198 p.
- Sanches, G., Graziano Magalhães, P., Franco, H. (2019). Site-specific assessment of spatial and temporal variability of sugarcane yield related to soil attributes. *Geoderma*. 334.
- Scandaliaris, J., Soria, F.J. y C. Fandos, (2003). Estimación de la superficie cultivada y producción de caña de azúcar para el noroeste de Argentina.
- Schmidt, J.P., Hong, N., Dellinger, A., Beegle, D.B. y Lin, H. (2007). Hillslope Variability in Corn Response to Nitrogen Linked to In-Season Soil Moisture Redistribution. *Agronomy Journal*, 99, 229–237
- Shanahan, J.F., Kitchen, N.R., Raun, W.R. y Schepers, J.S. (2008). Responsive in-season nitrogen management for cereals. *Computers and Electronics in Agriculture*, 61, 51–62.
- Sinclair, T.R., Gilbert R.A., Perdomo, R.E. y Shine, J.M. (2005). Volume of individual internodes of sugarcane stalks. *Field Crops Research*, 91, 207-215.
- Shih, S.F. y Gascho, G.J. (1980). Relationships among stalk length, leaf area, and dry biomass of sugarcane. *Agronomy Journal*, 72, 309-313.

- Singels, A. and C.N. Bezuidenhout, (2002). A new method of simulating dry matter partitioning in the Canegro sugarcane model. *Field Crops Research*, 78, 151-164.
- Singels, A., Smit, M.A., Redshaw, K.A y R.A. Donaldson, (2005). The effect of crop start date, crop class and cultivar on sugarcane canopy development and radiation interception. *Field Crops Research*, 92, 249-260.
- Smith, D.M., Inman-Bamber, N.G., y Thorburn, P.J. (2005). Growth and function of the sugarcane root system. *Field crops research* ,92, 169-183
- Souza, Z.M., Cerri, D.G.P., Colet, M.J., Rodrigues, L.H.A., Magalhães, P.S.G. y Mandoni, R.J.A., (2010). Análise dos atributos do solo e produtividade da cultura de canadeaçúcar com o uso da geoestatística e árvore de decisão. *Ciência Rural*, 40, 840-847.
- Stewart, B.A. y Howell, T.A. Encyclopedia of water science, (2003). 1079 p.
- Sutton, M., Bleeker, A., Howard, C., Bekunda, M., Grizzetti, B., De Vries, M., Van Grinsven, H., Abrol, Y., Adhya, T., Billen, G., Davidson, E., Datta, A., Diaz, R., Erisman, J., Liu, X., Oenema, O., Palm, C., Raghuram, N., Reis, S., Scholz, R., Sims, T., Westhoek, H., y F. Zhang. (2013). Our nutrient world. The challenge to produce more food and energy with less pollution. Global Overview of Nutrient Management. Centre for Ecology and Hydrology.
- Taiz, L. y Zeiger, E. (2004). Fisiologia vegetal 3ra (ed) Editora Artmed. Porto Alegre, Brazil. 719 p.
- Teixeira, E.I., George ,M., Herreman, T., Brown, H., Fletcher, A., Chakwizira, E. y Noble, A. (2014). The impact of water and nitrogen limitation on maize biomass and resourceuse efficiencies for radiation, water and nitrogen. *Field Crops Research*. 168, 109–118.
- Thompson, G.D. y Boyce, J.P. (1967). Daily measurements of potential evapotranspiration from fully canopied sugarcane. *Agricultural Meteorology*, 4,267–279.
- Thorburn P.J., Dart I.K., Biggs I.M., Baillie C.P., Smith M.A. y Keating B.A. (2003). The fate of nitrogen applied to sugarcane by trickle irrigation. *Irrigation Science*, 22, 201-209.
- Thorburn, P.J., Biggs, J.S., Webster, S.J. y Biggs, I.M. (2011). An improved way to determine nitrogen fertiliser requirements of sugarcane crops to meet global environmental challenges. *Plant and Soil*, 339, 51-67.
- Thorburn, P.J. (2017). Prioritizing Crop Management to Increase Nitrogen Use Efficiency in Australian Sugarcane Crops. *Frontiers in Plant Science* ,8, 1-16
- Timlin, D.J., Pachepsky, Y., Snyder, V.A. y Bryant, R.B. (1998). Spatial and temporal variability of corn grain yield on a hillslope. *Soil Science Society of America Journal*, 62(3), 764-773.
- Torres J.S.; Cruz, J.R. y Villegas, F. (2004). Avances técnicos para la programación y el manejo del riego en la caña de azúcar. 2ª ed. Cali: CENICAÑA, (Serie Técnica no. 33), 66 p.

- Trivelin, P.C.O., Vitti, A.C., Oliveira, M.W., Gava, G.J., y Sarries, G.A. (2002) Utilização de nitrogênio e produtividade da cana-de-açúcar (cana-planta) em solo arenoso com incorporação de resíduos da cultura. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 26(3), 636-646.
- Vallis I., Catchpoole V.R., Hughes R.M., Myers R.J.K., Ridge D.R., Weir K.L. (1996). Recovery in plants and soils of 15N applied as subsurface bands of urea to sugarcane. *Australian Journal of Agricultural Research*, 47, 355-370.
- Van Dillewijn, C.V., (1952). Botany of Sugarcane. Chronica Botanica, Waltham.
- Van Ittersum, M.K., Cassman, K.G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P. y Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance A review. *Field Crops Research*, 143, 4-17
- Van Veen J.A. y Kuikman P.J. (1990). Soil structural aspects of decomposition of organic matter by microorganisms. *Biogeochemistry*, 11,213-233.
- Vasantha, S., Gupta, C. y D.E. Shekinah, (2014). Physiological studies on tiller production and its senescence in sugarcane - Response comparison between plant and ratoon crops. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 84, 24-27.
- Vasantha, S., Shekinah, D.E., Gupta C. y P. Rakkiyappan, (2012). Tiller production, regulation and senescence in sugarcane (*Saccharum* species hybrid) genotypes. *Sugar Tech*, 14, 156-160.
- Vicini, L.E. (2007). Determinación de la variación de rendimiento cultural de caña de azúcar en Tucumán, Argentina, posicionada con GPS. Actualización Técnica, 8,1-3.
- Vicini, L.E.; Vicini C.L. (2010). Mecanización del cultivo de caña de azúcar, una mirada desde 1949 al 2050. Informes técnicos del proyecto PRECOP II – INTA EEA Famaillá ,5-25
- Vityakon, P. (2007). Degradation and restoration of sandy soils under different agricultural land uses in northeast Thailand: a review. *Land Degradation & Development*, 18, 567-577.
- Wallace, J. y Gregory, P. (2002). Water resources and their use in food production systems. *Aquatic Sciences*, 64, 1-13.
- Wiedenfeld, R.P. (2000). Water stress during different sugarcane growth periods on yield and response to N fertilization. *Agriculture Water Management*, 43,173-182.
- Woo, K.C., y Osmond, B.C. (1982). Stimulation of ammonia and 2-oxoglutarate dependent O₂ evolution in isolated chloroplasts by dicarboxylates and the role of the chloroplast in photorespiratory nitrogen recycling. *Plant Physiology*, 69,591-596.
- Wood, T. (1992). Nitrogen and Sugarcane. *South African Sugar Journal*, 76 (9), 289-290.
- Ye, Q., Zhang, H., Wei, H., Zhang, Y., Wang, B., Xia, K. y Xu, K. (2007). Effects of nitrogen fertilizer on nitrogen use efficiency and yield of rice under different soil conditions. *Frontiers of Agriculture in China*, 1(1), 30–36

- Zak D., Pregitzer, R. y Kurt, S. (1990). Spatial and Temporal Variability of Nitrogen Cycling in Northern Lower Michigan. *Forest Science*, 36 (2), 367-380.
- Zhao, D., Reddy, K.R., Kakani, V.G. y Reddy, V.R (2005). Nitrogen deficiency effects on plant growth leaf photosynthesis, and hyperspectral reflectance properties of sorghum. *Field Crops Research*, 22, 391-403
- Zhao, D.; Glaz, B., Comstock, J.C. (2014). Physiological and growth responses of sugarcane genotypes to nitrogen rate on a sand soil. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 200, 290-301.