

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

**EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE MATERIA SECA EN ALFALFA CON
PASTOREO, BAJO DIFERENTES MANEJOS DEL RIEGO**

por

Julieta María ARISPE LOZANO

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

MONTEVIDEO

URUGUAY

2024

Trabajo final de grado aprobado por:

Director/a:

Dra. Ing. Agr. Lucía Puppo

Tribunal:

Raquel Hayashi

María Cristina Capurro

Fecha:

29 de agosto de 2024

Estudiante:

Julieta María Arispe Lozano

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Agronomía de la UdelaR por brindarme las herramientas y conocimientos adquiridos en mis años de carrera.

A mi tutora Dra. Ing. Agr. Lucía Puppo Collazo por su tiempo, orientación y dedicación en pos de compartir sus conocimientos en este trabajo final de grado.

A todo el equipo y funcionarios del CRS por su colaboración durante este proyecto.

Un agradecimiento especial a toda mi familia, y en particular a mi madre quien fue sostén a lo largo de toda la carrera, brindando su apoyo incondicional siempre. Este logro es tanto mío como de ella.

A mis amigas que fueron un pilar importantísimo, y que en muchísimas ocasiones su aliento y apoyo fueron necesarios para mí.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	2
AGRADECIMIENTOS.....	3
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	6
RESUMEN.....	7
SUMMARY	8
1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1. HIPÓTESIS	10
1.2. OBJETIVOS	10
1.2.1. OBJETIVOS GENERALES	10
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	11
2.1. GENERALIDADES DE LA ALFALFA	11
2.1.1 Grados de reposo invernal o latencia en alfalfa	14
2.1.2. Manejo del cultivo	14
2.2. CULTIVO DE ALFALFA A NIVEL MUNDIAL	15
2.3. CULTIVO DE ALFALFA EN EL URUGUAY.....	15
2.4. ALFALFA EN SISTEMAS DE SECANO	15
2.5. ALFALFA EN SISTEMAS CON RIEGO.....	16
2.5.1. Antecedentes de rendimientos obtenidos en sistemas con riego	16
2.6. MÉTODO DE RIEGO: ASPERSIÓN.....	17
2.7. EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO.....	17
2.8. BALANCE HÍDRICO.....	18
2.9. AGUA DISPONIBLE TOTAL	19
2.9.1. Agua disponible total, capacidad de campo y punto de marchitez permanente	19
2.10. MÉTODOS PARA MEDIR LA HUMEDAD DEL SUELO	20
2.11. EFECTOS DEL PASTOREO	20
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
3.1. LOCALIZACIÓN Y PERÍODO EXPERIMENTAL	22
3.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES	22
3.2.1. Suelos.....	22
3.2.2. Recurso forrajero	23
3.2.3. Caracterización climática	23
3.3. DISEÑO EXPERIMENTAL	23

3.3.1. Riego	24
3.3.2. Manejo del pastoreo	26
3.3.3. Determinaciones realizadas	26
3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	27
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
4.1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL PERÍODO DE EVALUACIÓN....	28
4.2. PRODUCCIÓN DE FORRAJE	29
4.2.1. Tasa de crecimiento estacional.....	31
4.2.2. Frecuencia de pastoreos.....	31
4.3. EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO	32
4.4. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA.....	35
5. CONCLUSIONES	37
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla No.	Página
Tabla 1 Características del suelo.....	23
Tabla 2 Tasa de crecimiento estacional (kg MS ha ⁻¹ día ⁻¹)	31
Tabla 3 Frecuencia y número de pastoreos por estación	32
Tabla 4 Precipitaciones efectivas por tratamiento y ETc por estación	34
Tabla 5 Número de riegos aplicados, mm de riego y agua total consumida por estación	34
Tabla 6 Productividad del agua total y del agua de riego (kg.MS.ha ⁻¹ .mm ⁻¹)	35

Figura No.	Página
Figura 1 Estructura de una planta de alfalfa	11
Figura 2 Etapas de desarrollo de la alfalfa	13
Figura 3 Ubicación del predio.....	22
Figura 4 Croquis del diseño experimental	24
Figura 5 Precipitaciones período 2022-2023 y media histórica para la serie 1993/2023	28
Figura 6 Producción estacional de forraje de alfalfa (kg MS ha ⁻¹).....	29
Figura 7 Producción de forraje acumulado de alfalfa (kg MS ha ⁻¹)	30
Figura 8 Evolución del contenido de agua en el suelo.....	33

RESUMEN

El presente trabajo se llevó a cabo en el CRS (Centro Regional Sur), de la Facultad de Agronomía y tiene como principal objetivo evaluar un manejo del riego para la especie alfalfa de manera que logre un rendimiento que justifique la inclusión del riego en sistemas pastoriles.

La enorme variabilidad de las precipitaciones en conjunto con la baja capacidad de almacenaje de agua disponible de los suelos en nuestro país, determinan períodos de déficit hídricos frecuentes a lo largo del año. Dichos déficits, se intensifican en la estación estival debido a la alta demanda hídrica por parte de los cultivos y pasturas.

Asimismo, el cambio climático determina eventos extremos, como las sequías, las cuales se desencadenan con mayor frecuencia alterando la producción en sistemas productivos en seco.

El riego suplementario permite dar estabilidad y aumentar la productividad de las pasturas en sistemas ganaderos y lecheros. Es necesario definir un manejo del mismo que desempeñe un óptimo aprovechamiento de las lluvias y permita obtener altos rendimientos cuando se incluye el riego en el sistema. La inclusión de esta práctica de manejo podrá ser sostenible en el tiempo si se realiza un uso racional del agua y la energía.

Sumado a esto, resulta relevante evaluar el efecto del riego en conjunción con el pastoreo.

Los tratamientos que se analizaron fueron: riego frecuente el cual se regó cuando se agotaba el 30% del agua disponible, riego espaciado se regó dejando agotar hasta el 65% del agua disponible y el seco el cual sólo recibía agua de lluvia.

El período de evaluación fue invierno y primavera 2022, verano y otoño 2023. El diseño experimental utilizado fue de bloques completos al azar con cuatro repeticiones.

El rendimiento de forraje acumulado para el período evaluado, no mostró diferencias significativas entre los tratamientos regados, sin embargo, sí hubo diferencias entre los regados (T1 y T2) y el seco (T0). Luego de una sequía límite en el verano, los rendimientos estacionales de forraje de la alfalfa marcan una clara ventaja sobre el tratamiento regado muy por encima del seco.

Palabras clave: pastoreo, productividad del forraje, umbral de riego

SUMMARY

The present work was carried out at the CRS (Southern Regional Center), of the Faculty of Agronomy and its main objective is to estimate irrigation management for the alfalfa species so that it achieves a performance that justifies the inclusion of irrigation in pastoral systems.

The enormous variability of rainfall, together with the low available water storage capacity of the soils in our country, determine periods of frequent water deficit throughout the year. These deficits intensify in the summer season due to the high water demand by crops and pastures.

Likewise, climate change determines extreme events, such as droughts, which are triggered more frequently by altering production in dryland production systems.

Supplementary irrigation provides stability and increases the productivity of pastures in livestock and dairy systems. It is necessary to define its management that ensures optimal use of rainfall and allows high yields to be obtained when irrigation is included in the system. The inclusion of this management practice may be sustainable over time if rational use of water and energy is carried out.

In addition to this, it is relevant to evaluate the effect of irrigation in conjunction with grazing.

The treatments analyzed were: frequent irrigation, which was watered when 30% of the available water was exhausted, spaced irrigation, which was watered leaving up to 65% of the available water exhausted, and dry land, which only received rainwater.

The evaluation period was winter and spring 2022, summer and autumn 2023. The experimental design used was complete randomized blocks with four repetitions.

The accumulated forage yield for the evaluated period did not show significant differences between the irrigated treatments, however, there were differences between the irrigated (T1 and T2) and the dry (T0). After a borderline drought in the summer, the seasonal forage yields of alfalfa mark a clear advantage of irrigated treatments well above the rainfed treatment.

Keywords: forage productivity, grazing, irrigation threshold

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas productivos en nuestro país dependen en gran medida del régimen de precipitaciones que, sumado a la baja capacidad de almacenaje de agua disponible de los suelos, muchas veces no logran satisfacer la demanda por parte de los cultivos y pasturas.

El riego suplementario que es aplicado a cultivos agrícolas y forrajeros podría ser una estrategia para disminuir el impacto negativo en la producción ocasionado en años en los cuales ocurran eventos de sequía y, además, para estabilizar e incrementar la producción por unidad de superficie (Sawchik et al., 2010).

De acuerdo al contexto actual, basado en el cambio climático y la gran variabilidad interanual de las precipitaciones que sostiene marcados déficits hídricos en el verano principalmente, es relevante optimizar los coeficientes técnicos para un manejo eficiente tanto del riego en pasturas como la mejora en la productividad y el incremento de los costos atribuibles al incluir un sistema de riego.

Muchos investigadores sostienen que especies como la alfalfa (*Medicago sativa L.*) requiere más agua en comparación a otros cultivos de sus respectivas regiones, pero que en condiciones de riego puede duplicar sus rendimientos (Doorenbos & Kassam, 1979).

Según Sheaffer et al. (1988) la alfalfa tiene un sistema radicular marcado el cual le permite tener acceso al agua en profundidad y evitar posibles situaciones de sequía, pero su resistencia a la sequía es escasa y su producción se puede ver afectada por la escasez de agua.

Sin embargo, a pesar de tener acceso al agua en profundidad, la alfalfa no tolera suelos saturados o inundados por más de 3 días cuando se dan lluvias excesivas y muchas veces está asociado a impedimentos físicos del suelo que limitan el drenaje (Romero, 2007).

Otras especies forrajeras (gramíneas) son más tolerantes a suelos saturados que la alfalfa. Más de 7-14 días de anaerobiosis pueden provocar la muerte de las raíces y también desarrollar infecciones por enfermedad secundaria de la especie como *Phytophthora* (Steduto et al., 2012).

La alfalfa es una leguminosa que responde al riego y tiene rendimientos que van desde 1 tonelada de MS ha⁻¹ en seco con bajas precipitaciones anuales, hasta 24 toneladas de MS ha⁻¹ año⁻¹ en zonas con suelos profundos y buena disponibilidad de agua (Brown et al., 2005).

Puede producir materia seca a lo largo de todo el año con condiciones ambientales óptimas y favorables para el desarrollo. Su etapa de crecimiento más activa va de primavera a otoño y los valores diarios de evapotranspiración están dados por la interacción del ambiente y la defoliación o corte dado por el pastoreo o el corte de manera mecánica.

Este experimento pone especial énfasis en definir un manejo del riego con el máximo aprovechamiento de las precipitaciones para la especie alfalfa de manera que permita obtener un rendimiento alto en la doble condición de riego y pastoreo.

1.1. HIPÓTESIS

La alfalfa responde al riego con mayor producción de materia seca.

La alfalfa permite manejar umbrales de riego altos en términos de agotamiento del agua disponible sin afectar el rendimiento.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVOS GENERALES

Definir un manejo del riego para alfalfa que permita un rendimiento de materia seca alto que justifique la inclusión del riego en un sistema productivo con pastoreo, con un mayor aprovechamiento de las precipitaciones.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar el rendimiento en materia seca por estación para cada tratamiento de manejo del riego y en secano.

Determinar la tasa de crecimiento por estación para cada tratamiento.

Determinar la productividad del agua para cada tratamiento por estación.

Realizar una valoración de la herramienta del balance hídrico para un manejo racional del riego en alfalfa.

Determinar el mejor manejo del riego en alfalfa para la toma de decisiones en sistemas productivos, lecheros y ganadero-agrícolas.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. GENERALIDADES DE LA ALFALFA

La alfalfa es una leguminosa perenne de crecimiento estival que tiene un alto potencial de rendimiento de forraje. Dicha característica, sumado a su buena persistencia y tolerancia a la sequía despertó interés por parte de los productores lecheros e invernaderos intensivos principalmente (Rebuffo, 2000).

Los orígenes de la alfalfa se dieron en la región del Cáucaso con especies relacionadas diseminadas por Asia Central. Rápidamente se extendió por Europa, México y América del Sur y fue utilizada por los ejércitos invasores para la alimentación de sus caballos. China es un país que ha sembrado alfalfa por muchos años, y en los últimos años volvió a hacerlo ya que esta especie tiene gran potencial de mejorar las condiciones físicas de los suelos y minimizar la erosión de los mismos. En América del Norte, Australia y Nueva Zelanda, es utilizada para apoyar la cría de ganado (Steduto et al., 2012).

Se compone de una raíz principal que, en su parte superior, debajo de la superficie del suelo, tiene una estructura llamada corona. La misma es un órgano ramificado que se ubica por debajo del suelo quedando protegida cuando se pastorea, presenta yemas (yemas basilares) de las cuales se van a originar los tallos (tallos principales o de la corona) que, junto a los tallos secundarios, van a determinar el rebrote de la planta (Formoso, 2000).

Figura 1

Estructura de una planta de alfalfa



Nota. Extraído de Formoso (2000).

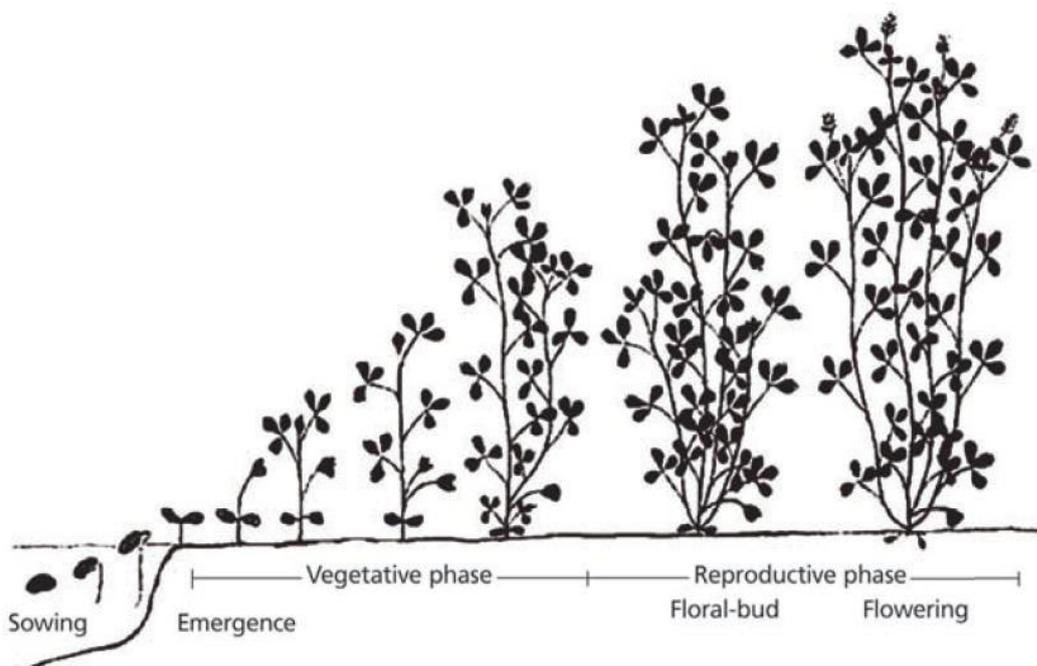
La alfalfa tiene diversos usos, se puede conservar como heno, ensilaje o gránulos. También se puede pastorear en forma pura o en mezcla con gramíneas. En adición, esta especie tiene alto grado de palatabilidad y favorece la fertilidad y la estructura del suelo (Steduto et al., 2012).

Rebuffo (2000) indica que la alfalfa se puede sembrar en otoño e invierno y se podría extender el período de siembra hasta el comienzo de la primavera. Dada su capacidad para germinar entre 5 y 35°C, admite un amplio rango de fechas de siembra. A pesar de esto, las siembras de otoño temprano serían las más adecuadas dándose un rápido desarrollo de plántulas, y permitiendo acumular reservas en raíces y una buena nodulación.

En cuanto a los sistemas de siembra, la alfalfa puede sembrarse tanto al voleo como en línea. Las siembras en línea ubican la semilla a una profundidad uniforme y eso hace que mejore el contacto con el suelo. Este método de siembra puede traer problemas de implantación cuando la siembra es muy profunda. Por otro lado, la siembra al voleo es utilizada cuando el suelo tiene cierta humedad en superficie como ocurre comúnmente, en nuestro país, en los meses de otoño. Sin embargo, este método es menos eficiente y requiere mayores densidades de siembra (mayor costo de semillas) porque es difícil colocar las semillas a una profundidad uniforme (Rebuffo, 2000).

En relación al desarrollo fenológico de la alfalfa, en Steduto et al. (2012) indican que desde emergencia hasta la madurez depende principalmente de la temperatura cuantificada en unidades de temperatura acumulada (tiempo térmico en grados día). En la etapa vegetativa, influye la duración del día lo cual determina también el desarrollo de la planta. Es una planta de días largos, lo que significa que durante el verano que es el momento del año en la cual los días son más largos, pasa a etapa reproductiva (aparición de yemas florales) más rápidamente. Sin embargo, cuando los días son más cortos a fines de verano y otoño, tarda más en pasar a etapa vegetativa. En la etapa de plántula se enlentece el crecimiento y desarrollo con respecto al rebrote.

Figura 2
Etapas de desarrollo de la alfalfa



Nota. Extraído de Steduto et al. (2012).

La alfalfa tiene fácil adaptación a distintos ambientes, se pueden ver praderas hasta altitudes comprendidas entre 700 y 4000 m s. n. m., con temperaturas entre los 15 a 25°C en el día y 10 a 20°C en la noche (Clavijo & Cadena, 2011).

Como expresan Steduto et al. (2012), condiciones como temperaturas superiores a 27 °C, el estrés hídrico y las condiciones de humedad en exceso a nivel del suelo pueden afectar negativamente los rendimientos de las semillas y de materia seca. La alfalfa es afectada por el estrés térmico y su tasa de desarrollo es escasa por debajo de los 5 °C, es nula a temperaturas superiores a 45 °C, y aumenta de forma lineal llegando a su máximo a temperaturas en torno a los 30°C, siendo esta su temperatura óptima.

Según Sánchez (2005), su desarrollo puede verse afectado en ambientes con pH menores a 5.0, y se adapta mejor a suelos profundos, con buen drenaje, alcalinos, y además tolera moderada salinidad. La alfalfa es una leguminosa cuyo pH (agua) óptimo se encuentra entre 6.0 y 6.5 (Morón, 2000).

En eventos extremos que puedan causar una sequía, la alfalfa presenta mayor capacidad de producción de forraje comparado a otras leguminosas (Rebuffo, 2000) dado su desarrollado sistema radicular por el cual obtiene agua de horizontes más profundos.

Sin embargo, cuando la escasez de agua ocurre en un período prolongado la alfalfa puede verse afectada. Cuando la humedad del suelo está cercana a capacidad de campo, el uso del agua por parte de la planta está limitada por una demanda generada por el dosel del cultivo, afectada por condiciones atmosféricas (Steduto et al., 2012).

2.1.1 Grados de reposo invernal o latencia en alfalfa

El grado de reposo invernal o latencia indica el momento o período en el que la alfalfa no produce forraje. Los cultivares de grupos distintos comienzan y terminan el reposo según umbrales de temperatura y longitud del día en el período de otoño/invierno. Existen tipos sin latencia, con latencia intermedia o con latencia, y en nuestro país se utilizan mayormente cultivares sin latencia y de latencia intermedia (Rebuffo, 2000).

Según Rebuffo (2000), una diferencia a destacar entre variedades de distinto grado de reposo es la distribución de forraje a lo largo del año, aunque la producción total anual sea similar. Variedades sin latencia producen forraje en invierno y otoño, mientras que las variedades con reposo largo tienen mayor producción de forraje en la primavera y se utilizan para esquemas de corte o conservación de forraje.

Rebuffo (2000) sostiene que las variedades sin reposo tienen un período de crecimiento más largo y una mayor velocidad de rebrote lo cual se traduce en un mayor número de pastoreos por año, aún cuando el volumen de cada pastoreo sea levemente inferior al obtenido con las variedades con reposo corto. El autor además, afirma que Estanduela Chaná y Crioula que son variedades de reposo corto, tienen producciones anuales altas de 10 a 12 t MS ha⁻¹ y producen aproximadamente el 20% del forraje en otoño/invierno que representa 2 a 2,5 t MS ha⁻¹. Por otro lado, también resalta que para la variedad de reposo corto (Estanduela Chaná) se observa una distribución estacional distinta ya que es una variedad que tiene una alta producción primaveral con cuatro cortes de altos rendimientos de 2,5 a 4 t MS ha⁻¹ desde principio de setiembre hasta fin de diciembre.

2.1.2. Manejo del cultivo

En cuanto al manejo de siembra, según Rebuffo (2000), es difícil recomendar una densidad de siembra para la alfalfa, ya que existe cierta asociación donde se utilizan altas densidades para compensar incidencia de factores como una mala preparación del suelo, siembras tardías o enmalezamiento. En nuestro país es muy común sembrar la alfalfa a 20 kg ha⁻¹, pero es posible bajar dicha densidad si se logra realizar un control a tiempo de los factores nombrados anteriormente los cuales bajan el número inicial de plantas.

Como lo indica Rebuffo (2000), la alfalfa puede sembrarse tanto en siembras puras como en mezcla. En Uruguay, principalmente en predios lecheros comenzó a incrementarse el uso de alfalfas en mezcla, tanto con festuca, dactylis o cebadilla, pero mayoritariamente se siembra pura.

Con respecto a la fertilización, la alfalfa obtiene el nitrógeno en gran medida de la fijación simbiótica desde la atmósfera y de la descomposición de la materia orgánica, lo cual determinará alcanzar o no altas producciones. Los suelos proporcionan cantidades variables de nitrógeno que varían entre 60 y 120 kg N ha⁻¹ año⁻¹. Con respecto al fósforo (P) es el macronutriente que tiene más impacto en la productividad, calidad y persistencia de la alfalfa. Existen estudios realizados en Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) y por la Cátedra de Fertilidad de Suelos de la Facultad de Agronomía, que demuestran la respuesta al agregado de fertilizante fosfatado (superfosfato), que cuantifican importantes incrementos de producción cuando se parte de niveles bajos de disponibilidad de P en el suelo (Rebuffo, 2000).

Para producciones entre 10 y 12 t MS ha⁻¹, se requieren concentraciones de P entorno a 15 ppm, medido en los primeros 7,5 cm de profundidad (Ruz & Rodríguez, 2000).

Con respecto a la salinidad, Steduto et al. (2012) indican que la alfalfa es tolerante a un nivel bastante elevado de salinidad. Otra característica de la alfalfa es su sensibilidad al Na⁺, aún más que al Cl⁻, lo cual demuestra que la acumulación de sodio es el motivo principal por el cual el rendimiento es menor cuando se riega con agua salina.

En relación al manejo del pastoreo, Rebuffo (2000) propone que la entrada a pastorear más adecuada es cuando la planta tiene un 10 % de floración, o a una altura de 30 a 35 centímetros. Según Fariña et al. (2017), el estado fenológico óptimo de la alfalfa para pastoreo es al alcanzar los 8-9 nudos.

2.2. CULTIVO DE ALFALFA A NIVEL MUNDIAL

Actualmente el crecimiento de la población mundial desafía a los sistemas de producción a ser más eficientes produciendo proteína (carne y leche) para abastecer y alimentar a las personas (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 2021).

Los forrajes son una de las principales fuentes de alimentación de los sistemas ganaderos, dentro de ellos, la alfalfa es la especie más utilizada en el mundo como alimento para el ganado, dado que se adapta fácilmente a diversos ambientes y a su calidad nutricional (Flórez Delgado, 2015) específicamente el aporte en proteína y fibra digestible (Ramos-Ulate et al., 2021).

Actualmente, hay más de 30 millones de hectáreas de alfalfa cultivadas en todo el mundo tanto como monocultivos o en mezcla con otras gramíneas (Rebuffo, 2000).

2.3. CULTIVO DE ALFALFA EN EL URUGUAY

Desde el siglo pasado, los cultivos forrajeros se han difundido mucho en nuestro país, pero el cultivo de alfalfa data de referencias más antiguas. En las primeras décadas del siglo pasado el área cultivada de alfalfa era muy restringida, a pesar de esto, era la principal especie cultivada como pastura permanente en Uruguay, reportándose en el Censo Agropecuario de 1937 10.000 hectáreas de este cultivo (Steduto et al., 2012). Según el Censo General Agropecuario de 2011 (Oficina de Estadísticas Agropecuarias [DIEA], 2013), existen 53.209 hectáreas totales sembradas de alfalfa en nuestro país.

En cuanto a las variedades, en las décadas del 60 y 70 muchos de los productores sembraban alfalfas de origen argentino, luego adoptaron la variedad Estanduela Chaná. La misma, se caracteriza por tener plantas de porte erecto y tallos largos, coronas grandes con numerosos tallos, ser de reposo invernal corto y floración intermedia poco abundante. Además, presenta excelente precocidad y vigor de plántulas que determinan alto rendimiento en el primer año, con una fecha de siembra de otoño temprano (Rebuffo, 2000).

2.4. ALFALFA EN SISTEMAS DE SECANO

La inclusión de la alfalfa en sistemas bajo pastoreo en zonas de secano genera una oportunidad de producción de forraje para dichas zonas en las que aún sea difícil

producir, ya que tiene buena sobrevivencia y persistencia en dichas condiciones, bajo costo del cultivo, excelente calidad del forraje y acción mejorante del suelo (Enguita, 1989).

Según Enguita (1989), las variedades más adaptadas a este sistema, se pueden distribuir en dos grupos según su hábito de crecimiento: rastreras y erectas y, además, alfalfas en estado silvestre, que tienen tolerancia a la sequía y al pastoreo también podrían cultivarse.

En los resultados experimentales de la Evaluación Nacional de Cultivares de especies forrajeras del Período 2023 del Instituto Nacional de Semillas (INASE)-INIA La Estanzuela, se presenta la producción de forraje anual y acumulada (kg MS ha^{-1}) de los cultivares de alfalfa del ensayo sembrado en el año 2020. En cuanto a la alfalfa cv. Estanzuela Chaná, en el año 2020, para los cortes 1-4 se obtuvo un rendimiento de $9291 \text{ kg MS ha}^{-1}$, en el año 2021, para los cortes 5-14 el rendimiento fue de $16037 \text{ kg MS ha}^{-1}$ y en el año 2022, para los cortes 15-22 el rendimiento fue de $10864 \text{ kg MS ha}^{-1}$. En el total de los 3 años evaluados, para los cortes de 1-22 (total), la producción de forraje fue de $36114 \text{ kg MS ha}^{-1}$ (INIA & INASE, 2024).

2.5. ALFALFA EN SISTEMAS CON RIEGO

Existen pocos antecedentes en investigación sobre la respuesta al riego en pasturas y son, además, discontinuos en el tiempo. Los trabajos realizados en la década del 70 e inicios de los 80 del siglo XX se dedicaron a revelar potenciales de producción de las especies bajo riego. Así como los criterios de manejo del riego teniendo en cuenta las características de nuestros suelos (Sawchik et al., 2010).

Desde el año 1997 se realizaron varios experimentos para lograr definir umbrales de riego óptimos para diversas leguminosas, sus potenciales de rendimiento de forraje alcanzables y verificar la capacidad de exploración radicular de dichas especies (Sawchik & Formoso, 2000).

Sawchik (2012) indicó que el riego suplementario es una herramienta que reduce el efecto que provoca el déficit hídrico que actúa como limitante del potencial productivo de especies y cultivares utilizados como forrajeras.

Según Sawchik et al. (2010) las conclusiones de trabajos desarrollados en alfalfa mostraron una clara interacción entre la oferta hídrica y su respuesta frente al riego en esta especie. Se determinó que el consumo hídrico de la alfalfa fue más alto que el resto de las especies estudiadas, a pesar de su capacidad de explorar agua en profundidad y debido a las altas tasas de crecimiento de esta especie.

La utilización de riego suplementario puede constituir una herramienta de gran utilidad para que el cultivo satisfaga sus demandas de agua y se acerque a la producción potencial de forraje (Barberis et al., 2019).

2.5.1. Antecedentes de rendimientos obtenidos en sistemas con riego

Según indican Sawchik y Formoso (2000), se realizaron experimentos con el fin de seleccionar umbrales de riego óptimo para diferentes especies forrajeras. Es así que Hofstadter (1983) utilizó umbrales de riego de 60% y 30 % de agotamiento de agua

disponible para el cultivo de alfalfa, y se obtuvieron respuestas superiores al umbral del 60%, los cuales corresponden a riegos más frecuentes. Cardellino (1982) como se cita en Sawchik et al. (2010), reporta que el riego en el promedio de 2 años secos aumentó la producción de forraje de la alfalfa en un 100 % por encima del secano.

Barrenechea et al. (1999) como se cita en Barberis et al. (2019), el riego modifica el modelo de distribución estacional del forraje transformando una curva bimodal en una unimodal (Bertín, 1999), y además se obtiene aproximadamente 47% más de forraje en kg MS ha⁻¹.

Barberis et al. (2019) aplicaron 300 mm de riego suplementario durante la temporada, tratando de acercarse a un aporte anual de 1.100 mm anuales y los rendimientos se estimaron un 50% superiores a los rendimientos en secano, considerando producciones de 18, 22,5, 19,5 y 18 t MS ha⁻¹ año⁻¹ para el primer, segundo, tercer y cuarto año, respectivamente.

2.6. MÉTODO DE RIEGO: ASPERSIÓN

Peralta y Simpfendörfer (2001) señalan que existen distintos sistemas de riego, el utilizado en este trabajo fue riego por aspersión el cual consiste en aplicar el agua al suelo simulando una lluvia. Este efecto se da por la presión en que fluye el agua dentro de un sistema de tuberías, siendo la misma expulsada al exterior a través de las boquillas de un aspersor. Un equipo de riego por aspersión está compuesto por una unidad de bombeo, tuberías, accesorios y aspersores.

Dentro de las características más importantes de los aspersores está la pluviometría o tasa de aplicación, y se mide a través de la altura de la lámina de agua recibida en el terreno para un tiempo determinado. Se expresa en mm/h. Además, la pluviometría de un aspersor debe ser igual o menor a la velocidad de infiltración básica del suelo para evitar posibles escurrimientos (Peralta & Simpfendörfer, 2001).

2.7. EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO

Para programar un sistema de riego es necesario conocer la Evapotranspiración de Referencia (ET_o), la cual toma en cuenta el consumo de agua de una pradera bien abastecida de agua, de 12 cm de altura. También, se le conoce como Evapotranspiración Potencial (ET_p) y normalmente se mide en milímetros por día (mm/d), ya que se trata de una lámina de agua (Uribe & Ruiz, 2019).

De acuerdo a Allen et al. (1998), el concepto de evapotranspiración incluye tres diferentes definiciones: evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c), y evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{c aj}). Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) corresponde a la tasa de evapotranspiración de una pastura de referencia, en óptimas condiciones de crecimiento y sin restricciones de agua. La ET_c indica la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no limitantes y hace referencia a la evapotranspiración de cualquier tipo de cultivo cuando se encuentra exento de enfermedades, con buena fertilización y desarrollado en parcelas amplias. El valor de ET_c es calculado a través del coeficiente del cultivo y los efectos de las condiciones climáticas son incorporados en ET_o.

A su vez, la evapotranspiración potencial es calculada con el método de Penman-Monteith y utiliza una parametrización para el cálculo de la radiación solar terrestre adaptada para Uruguay provista por el INIA, Grupo Agroclima y Sistemas de Información, INIA-GRAS.

La evapotranspiración del cultivo definida como la ET_c se calcula como el producto de la ET_o y el coeficiente del cultivo (K_c). Este coeficiente integra características del cultivo y los efectos promedios de la evaporación en el suelo.

Allen et al. (1998) reportan valores de K_c promedios para la alfalfa de 0,95 que son útiles para la planificación del riego. En cambio, para manejar el riego es necesario considerar la evolución del cultivo entre los cortes sucesivos considerándose un valor de K_c igual a 0,4 inmediato al corte, y de K_c igual a 1,2 para el cultivo desarrollado previo al corte.

2.8. BALANCE HÍDRICO

El balance hídrico del suelo es una herramienta útil para cuantificar ciertas características y aspectos del ciclo del agua en el suelo y para un territorio dado pudiendo relacionarlo con las variables hidrológicas en el corto y mediano plazo.

El balance hídrico permite monitorear la evolución del agua en el suelo e indicar momentos oportunos de riego.

A continuación se presenta la ecuación del balance diario de agua en la zona radicular del suelo, expresado en términos de agotamiento al final del día (Allen et al., 1998):

$$Dr_{,i} = Dr_{,i-1} - (P - RO)_{,i} - li - CR_{,i} + ET_{c,i} + DP_{,i}$$

Donde:

$Dr_{,i}$: agotamiento de humedad en la zona radicular del suelo al final del día i [mm],

$Dr_{,i-1}$: contenido de humedad en la zona radicular al final del día anterior, $i-1$ [mm],

$P_{,i}$: precipitación en el día i [mm],

$RO_{,i}$: escurrimiento superficial en el día i [mm],

li : lámina neta de riego en el día i que infiltra en el suelo [mm],

$CR_{,i}$: ascenso capilar proveniente de la masa de agua subterránea en el día i [mm],

ET_{c,i}: evapotranspiración del cultivo en el día i [mm],

D_{Pi}: pérdidas de agua de la zona radicular por percolación profunda en el día i [mm].

2.9. AGUA DISPONIBLE TOTAL

2.9.1. Agua disponible total, capacidad de campo y punto de marchitez permanente

Según lo expresan Allen et al. (1998), el agua disponible total (ADT) que tiene un suelo hace referencia al agua retenida que va a estar disponible para las plantas. Cuando se da la ocurrencia de una lluvia o después de un riego, el suelo tenderá a drenar agua hasta que se alcance la capacidad de campo (CC). Dicha capacidad se alcanza cuando la cantidad de agua es retenida en oposición a las fuerzas gravitatorias por un suelo bien drenado, es decir, el volumen de agua que queda en el suelo cuando el drenaje descendente se ve disminuido. En cierto momento se alcanza un punto en el cual el cultivo o la pastura no podrá extraer el agua remanente y la extracción va a ser cero, esto significa que se alcanzó el punto de marchitez permanente (PMP), en el cual las plantas se marchitan permanentemente.

En cuanto al agua fácilmente disponible es, en teoría, la cantidad de agua extraída por el cultivo sin que se produzca control estomático. Cuando el suelo tiene una humedad suficiente, es capaz de abastecer agua a una velocidad que alcanza a cubrir la demanda atmosférica del cultivo y, por tanto, la extracción del agua será igual a la ET_c. Cuanto más disminuye la humedad en el suelo, más difícil de extraer el agua, y cuando el contenido de humedad del suelo esté por debajo o no alcance cierto valor umbral, el agua del suelo no va a satisfacer la demanda transpiratoria del cultivo y se van a dar situaciones de estrés en las plantas.

Según lo expresan Allen et al. (1998), el estrés hídrico afecta sobre el valor de ET del cultivo y esto se manifiesta en una reducción del valor del coeficiente del cultivo al multiplicar el valor del coeficiente del cultivo por el coeficiente de estrés hídrico K_s. El mismo está expresado como: $K_s = \frac{ADT - D_r}{(1 - p) ADT}$. Donde: K_s es un factor adimensional de reducción de la transpiración que depende de la cantidad de agua disponible en el suelo [0 - 1], D_r es el agotamiento de humedad en la zona radicular [mm], ADT es el agua disponible total en la zona radicular del suelo [mm], p es una fracción de la ADT que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin sufrir estrés hídrico [-]. El factor p es distinto para todos los cultivos y su rango está normalmente entre 0,30 para plantas de raíces poco profundas, a tasas altas de ET_c (> 8 mm d⁻¹), hasta 0,70 para plantas de raíces profundas y tasas bajas de ET_c (< 3 mm d⁻¹). Un p que ronda los 0,50 es utilizado para una gran variedad de cultivos.

Para el caso de la alfalfa, para valores de ETC mayores a 5 mm día⁻¹, el valor de p debería ajustarse de acuerdo a la siguiente expresión:

$$p = p + 0,04 (5 - ETC)$$

Cuando el agua disponible desciende por debajo de ese valor umbral, se produce un control estomático y la ETc, pasa a ser la ETc aj.

Allen et al. (1998) definen el contenido de humedad en la zona radicular expresado como función del agotamiento de humedad en la zona radicular, nombrado como Dr, el cual indica la cantidad de agua que falta en relación a la capacidad de campo (CC). En CC, dicho agotamiento en la zona radicular corresponde a cero ($Dr= 0$). Luego de que el contenido de agua es menor al valor umbral, el agotamiento del agua va a limitar la evapotranspiración a menores valores que el potencial, va a bajar la evapotranspiración del cultivo según la cantidad remanente de agua en la zona radicular.

Con respecto a la humedad del suelo, Tenelanda-Patiño et al. (2018) lo definen como el factor clave que vincula las fluctuaciones climáticas y la dinámica de la vegetación en el espacio y el tiempo.

2.10. MÉTODOS PARA MEDIR LA HUMEDAD DEL SUELO

Radulovich (2009) señala que el método directo para medir humedad en el suelo, es el método gravimétrico donde se toma una muestra de peso absoluto. Por diferencia de peso, se puede conocer el contenido volumétrico de agua del suelo absoluto de una muestra, cuando este es multiplicado por Dap. Para determinar el peso seco/volumen (Dap) se muestrea y pesan cilindros con volumen conocido de suelo sin perturbar, con un cilindro de referencia, que debe ser predeterminado para secar la muestra a peso constante o durante 48 horas a 105°C.

Existen, además, otros métodos indirectos, como la sonda de neutrones, y las sondas de capacitancia que relacionan la constante dieléctrica del suelo con el contenido de agua: sondas que miden la frecuencia de resonancia, Reflectometría en el dominio de la Frecuencia (FDR, siglas del inglés) y sondas que miden el tiempo de retorno de una onda de energía eléctrica reflejada a lo largo de una línea de transmisión Reflectometría en el dominio del tiempo (TDR, siglas del inglés). La sonda FDR fue la utilizada en este trabajo, y actúa en base a la respuesta a cambios en la constante dieléctrica del medio (ϵ), utiliza una técnica de reflectometría de dominio de frecuencias mediante capacitores y osciladores de frecuencia variable. Su utilización es sencilla, requiere poco mantenimiento, y es sencilla para manejar sus datos (Marano et al., 2012). En adición, la sonda FDR permite un monitoreo con facilidad de la evolución del agua en el suelo, así como el chequeo del cumplimiento de un manejo determinado respetando los umbrales previamente fijados.

2.11. EFECTOS DEL PASTOREO

El pastoreo es un proceso dinámico, que relaciona el clima, el animal, plantas y suelo. El vínculo entre el animal y la pastura funciona de forma recíproca; el forraje disponible influye sobre el consumo del animal, y a su vez, el mismo influye en la composición y producción de la pastura. Por ende, las pasturas son causa y efecto del pastoreo (Chilibroste et al., 2005).

Existe una fuerte relación entre intensidad de pastoreo y la producción de forraje (Chilibroste, 2003 como se cita en Mattiauda et al., 2009) y la persistencia del recurso forrajero (Cullen et al., 2006).

Según Ganche et al. (2015), sucesivos pastoreos intensos con bajos remanentes desembocan en una baja producción anual de forraje, siendo afectada la persistencia de la pastura.

Por otro lado, el tránsito y el pisoteo de los animales tienen efecto directo tanto sobre la pastura como sobre la estructura y calidad del suelo. El pisoteo modifica el ordenamiento espacial de las partículas del suelo y su porosidad, generando compactación de los primeros centímetros del suelo, lo que desemboca en la pérdida de macroporos, en particular para suelos secos (Taboada, 2007).

Sumado a esto, las deyecciones de los animales en pastoreo afectan indirectamente el desarrollo de las plantas al ser depositadas sobre las mismas, lo que puede provocar una disminución de su capacidad fotosintética.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN Y PERÍODO EXPERIMENTAL

El experimento fue llevado a cabo en el Centro Regional Sur (CRS), una de las estaciones experimentales de la Facultad de Agronomía ($34^{\circ} 36'$ latitud, $S 56^{\circ} 13'$ longitud O), ubicada en el Departamento de Canelones sobre el camino Folle km 35.500, al este de la localidad de Juanicó.

Dicho experimento fue estudiado en el período que comprende desde el invierno del año 2022 hasta otoño del año 2023.

Figura 3

Ubicación del predio



Nota. Elaborado a partir de imágenes satelitales de Google (2024).

3.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES

3.2.1. Suelos

El CRS se encuentra sobre la unidad de suelo Tala-Rodríguez correspondiente a la Formación Geológica Libertad, en referencia a la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay escala 1:1.000.000 (Durán, 1976). El suelo del sitio del experimento fue un Brunosol Éutrico Típico, correspondiente a un Argiudol Típico, según la clasificación de United States Department of Agriculture (USDA, 2021).

Tabla 1
Características del suelo

Profundidad cm	CC vol%	PMP vol%	DAP gr cm ⁻³	AD mm/horiz
0-19	44.9	27.4	1.15	33.0
20-36	45.6	27.7	1.20	28.6
37-80	43.2	25.9	1.20	74.1

Nota. CC: Capacidad de Campo, PMP: Punto de Marchitez Permanente, DAP: Densidad Aparente, AD: Agua disponible, Vol%: Porcentaje expresado en volumen.

3.2.2. Recurso forrajero

La especie forrajera utilizada para el experimento fue el cultivar de alfalfa (*Medicago sativa* L.) “Estanzuela Chaná”. Se sembró el 21 de abril de 2020 realizada con inoculación de la semilla previamente, con una densidad de 20 kg ha⁻¹ y con una distancia entre hileras de 0,17 metros. El cultivo antecesor para dichos tratamientos fue una pradera de achicoria (*Cichorium intybus*).

Se le realizó una fertilización a la siembra de 150 kg por hectárea de fosfato diamónico (18-48-0).

Posteriormente en cada otoño se refertilizó según análisis de suelo para saber el nivel de fósforo, y se ajustó mediante fertilizaciones hasta alcanzar el nivel crítico (20-25 ppm P para la alfalfa de 0-20 cm de profundidad), en caso que fuera necesario.

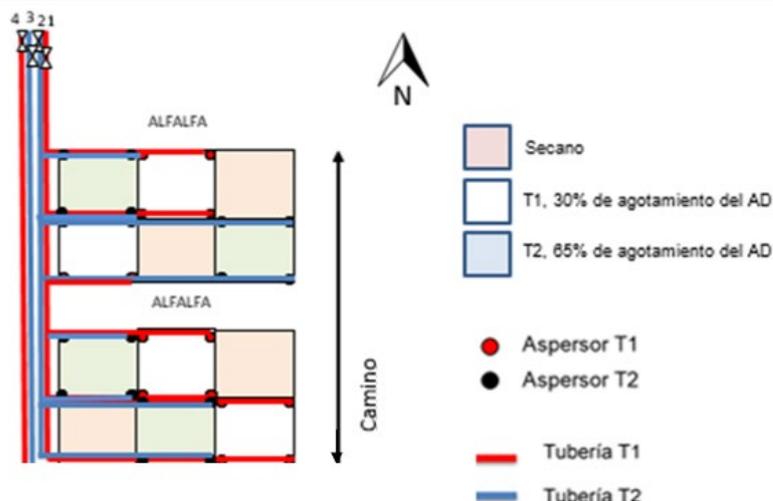
3.2.3. Caracterización climática

Para la caracterización del clima, se analizó la ETo (demanda atmosférica) y las precipitaciones para el año en estudio del experimento (2022-2023) y el promedio histórico desde el año 1993 hasta el 2023 (30 años), utilizando para dicha comparación los datos de la estación agrometeorológica de INIA Las Brujas (INIA, s.f.), (34° 40' S., longitud: 56° 20' W., altura: 32 m. s.n.m).

3.3. DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental fue de bloques completos con parcelas al azar, con tres tratamientos y cuatro repeticiones (como se muestra en el croquis de la Figura 4). Los tratamientos evaluados fueron: riego frecuente (T1) el cual se riega cada vez que se agota el 30 % del agua disponible; riego espaciado (T2) el cual se riega cada vez que se agota el 65 % del agua disponible y; (T0) secano el cual recibe solo el agua de lluvia. Cada uno de dichos tratamientos tuvo cuatro repeticiones, siendo un total de doce parcelas en cada experimento.

Figura 4
Croquis del diseño experimental



El tamaño de cada parcela fue de 11 metros por 11 metros, posibilitando así una mejor disposición de los caminos los cuales eran necesarios para el acceso y salida de los animales a cada parcela del experimento. El área experimental total fue de 1452 m².

En cuanto a los tratamientos, en el de riego frecuente (T1) se dejó agotar hasta el 30% del agua disponible en la profundidad radical efectiva y en el riego espaciado (T2) hasta 65% del agua disponible en la profundidad radical efectiva. Considerando el agua disponible (AD) del suelo hasta 40 cm de profundidad radical (que es hasta donde encontramos un gran porcentaje de raíces absorbentes), el T1 (30% de agotamiento de AD) se regó cada vez que el déficit acumulado fue de 21,4 mm y se repuso una lámina de 10,7 mm y el T2 (65% de agotamiento de AD) se dejó acumular un déficit de 46,3 mm y se repuso una lámina de 35,6 mm.

Con el riego el agua se devolvió a un 85% del ADT, con el objetivo de mantener un espacio poros del suelo “vacío” que permitiera captar mayor cantidad de precipitaciones, en el caso de que las mismas ocurrieran posterior al riego. Así mismo, ante una precipitación como la mencionada anteriormente, esta forma de manejar el riego, permite mantener el contenido de humedad del suelo alejada de la condición de saturación (anegamiento), lo cual en el caso de la alfalfa puede resultar con efectos perjudiciales a nivel de la corona.

3.3.1. Riego

Para los tratamientos con riego, se utilizó un equipo de aspersión fija, instalado bajo tierra (para no ser dañados por el pisoteo de los animales), con aspersores de turbina emergentes (marca K-Rain, modelo RPS 75), sectorizados a 90 grados y colocados en cada esquina de las parcelas y se utilizaron cuatro aspersores por parcela. Los aspersores sectorizados permiten el riego independiente de cada parcela, sin interferir con el balance hídrico de los tratamientos adyacentes.

Estos aspersores se elevan sobre el nivel del suelo cuando el equipo se presuriza. La tasa de aplicación del equipo a la presión operativa fue $5,5 \text{ mm h}^{-1}$.

La fuente de agua para las aplicaciones de riego, era un tajamar ubicado a metros del lugar del experimento.

Para medir el contenido de humedad, se colocaron tubos de acceso para una sonda FDR en cada una de las parcelas y se calibró mediante estudios previos de (Hayashi & Dogliotti, 2021) con el método gravimétrico por horizonte.

Las medidas de humedad se realizaron antes de cada riego para verificar el cumplimiento de los umbrales evaluados.

En cuanto al manejo del riego, se determinó el momento oportuno del mismo para cada tratamiento efectuando un balance hídrico de paso diario y verificando previamente la humedad del suelo mediante la sonda FDR. Así se confirmó el umbral de cada tratamiento.

Para definir el momento de riego se tuvo en cuenta el déficit acumulado para cada tratamiento, medido como agua disponible en milímetros por el umbral de cada tratamiento. Dicho cálculo se definió en función del umbral de agotamiento de cada tratamiento y el agua disponible en la profundidad radical.

Además, se tuvo en cuenta datos diarios de la evapotranspiración de referencia Penman-Monteith (ET_o), publicados en la página web de INIA (s.f.), más precisamente para la localidad de Las Brujas, ubicada a 13 kilómetros en línea recta del CRS, lugar del experimento. Las precipitaciones fueron registradas mediante un pluviómetro ubicado cercano al sitio del experimento.

Los valores de K_c que se usaron fue de 0,4 (inmediatamente después de cada pastoreo) el cual coincide con el presentado por Allen et al. (1998), y un valor de 1,1 para antes de cada pastoreo. Este último valor de K_c (1.1) es casi un 10% menor al de 1,2 propuesto también por Allen et al. (1998). Este ajuste fue realizado considerando que, en este experimento, el pastoreo se realizó con una altura de cultivo de 0,43 -0,50 m, la cual es inferior a la mencionada por los mismos autores de 0,70 m para su valor K_c de 1.2. Se asumió que hubo una evolución lineal del K_c para los días sucesivos entre un pastoreo y otro.

Por otra parte, las pérdidas por escurrimiento se consideraron despreciables, siendo los milímetros necesarios para llevar el suelo a CC, el valor máximo de precipitación efectiva. Cuando las lluvias superaron por más de 23 mm al déficit acumulado se consideró que el suelo llegó a su condición de saturación, momento a partir del cual el cultivo deja de consumir agua y el balance se mantiene en 0 por 48 horas, tiempo en el cual el suelo vuelve a su CC por drenaje natural.

A continuación, se presentan las dos ecuaciones:

Déficit acumulado = Agua disponible total (mm) x umbral de cada tratamiento.

Déficit acumulado = $D_{i-1} + ET_c - R_i - P_{pef}$.

D_{i-1} = déficit acumulado correspondiente al día anterior,

ET_c = evapotranspiración de la alfalfa,

R_i = riego correspondiente al día anterior,

P_{pef} = precipitación que equivale hasta alcanzar CC.

3.3.2. Manejo del pastoreo

Los animales utilizados para el pastoreo eran dos vacas por parcela, de 600-700 kg, raza Holando, Jersey y sus cruzas.

El pastoreo se realizaba hasta que el forraje alcanzaba una altura igual o superior a 5 centímetros. Posterior a cada pastoreo se efectuó un corte para homogeneizar, a 5 centímetros de altura del remanente, empleando un tractor de jardín.

El momento de entrada a cada pastoreo se definió según la fenología de la alfalfa entrando a pastorear en 8-9 nudos (o 10 % de floración en primavera).

3.3.3. Determinaciones realizadas

Evaluación de la materia seca disponible

Previo a cada pastoreo se definieron tres niveles de producción en kg MS ha^{-1} , en función del volumen visual de biomasa disponible (zonas altas, medias y bajas de producción) y se cosecharon tres repeticiones de cada nivel. La definición de los tres niveles de producción y el muestreo para cada nivel, se realizó recorriendo la totalidad de parcelas a pastorear ese día. Posteriormente se realizaron 15 mediciones (visualizaciones) realizando un recorrido en zigzag en la totalidad de cada una de las parcelas, indicando en cada visualización el nivel de producción correspondiente preestablecido (Haydock & Shaw, 1975). Las muestras fueron pesadas y luego se llevaron a estufa a 60°C hasta un peso constante (peso seco), y así se determinó el porcentaje de materia seca de las muestras. El tamaño de muestra utilizado para dicho procedimiento fueron cuadros de 0,30 metros x 0,30 metros.

Por último, se determinó el rendimiento en kg MS ha^{-1} tomando en cuenta los días y las tasas de crecimiento (TC) entre cada pastoreo, y por estación, identificando invierno como los meses de junio a agosto; primavera de setiembre a noviembre; verano de diciembre a febrero; y otoño los meses de marzo a mayo. Para la suma final (producto de los kg MS ha^{-1} de la TC por los días entre cada pastoreo) se tuvo en cuenta los días totales de cada estación.

Productividad del agua

Otra de las determinaciones realizadas fue la productividad del agua, medida como el cociente entre el rendimiento en kg MS ha⁻¹ para cada uno de los tratamientos por estación en el período evaluado, y el agua utilizada total por parte del cultivo.

El agua utilizada se cuantificó en milímetros siendo la suma de tres componentes: precipitación efectiva la cual fue determinada mediante el balance hídrico, el riego neto aplicado, y la variación de la humedad en el suelo, medida como la diferencia entre el déficit acumulado al inicio y al final de cada estación.

En la medida que el déficit acumulado se veía incrementado, se estimó como agua aprovechada por el cultivo.

3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El efecto de los tratamientos en: producción de materia seca (kg MS ha⁻¹) de cada estación de crecimiento; tasa de crecimiento (Kg MS ha⁻¹ día⁻¹); productividad del agua total (kg MS mm⁻¹); y productividad del agua de riego (kg MS mm⁻¹); se evaluó a través de un modelo lineal donde se consideró el efecto tratamiento y bloque, dentro de cada estación de crecimiento. El efecto del tratamiento en la producción de materia seca acumulada total en el periodo del experimento también se analizó con el mismo modelo lineal, pero sin realizar el análisis dentro de cada estación. En todos los casos las medias se compararon por test de Fisher con p-valor < 0,05.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

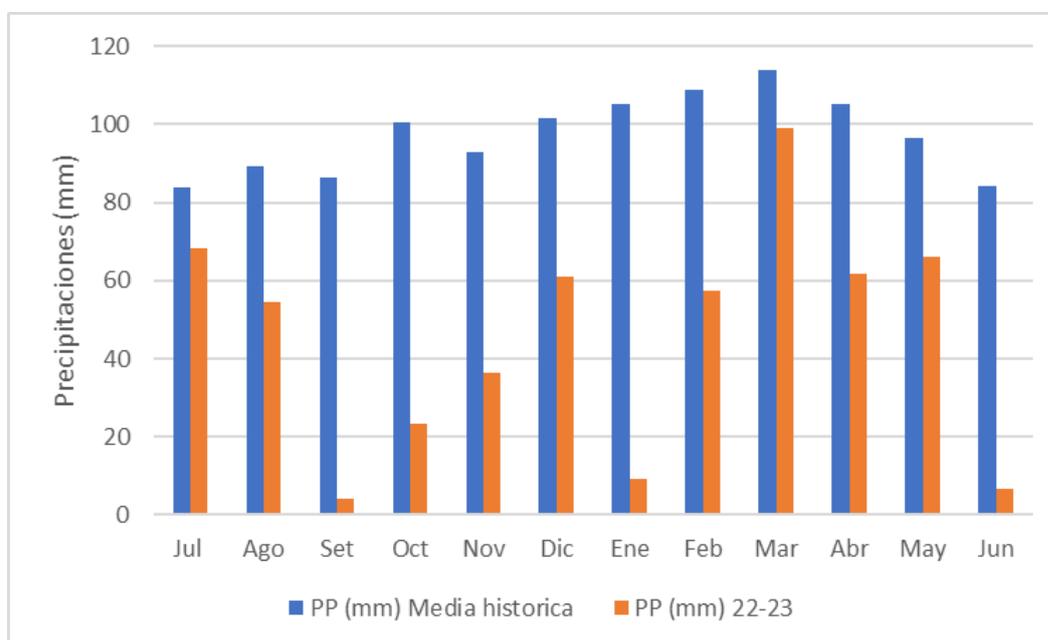
4.1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL PERÍODO DE EVALUACIÓN

La demanda atmosférica (ETo) para el período evaluado (invierno 2022-otoño 2023) fue de 1084 mm, siendo un valor medio en la serie ETo con respecto a la media histórica del período analizado (1993-2023). En cuanto a las temperaturas máximas, existieron 16 días con temperaturas dentro del rango de 35°C a 41°C.

En referencia a las precipitaciones ocurridas, el año de la evaluación fue el más bajo de la serie, resaltando las bajas precipitaciones ocurridas en los meses de primavera-verano 22-23. Se comparó las precipitaciones mensuales registradas en el año 2022-2023 en el CRS, con el promedio histórico del año 1993 al 2023, seleccionando para dicha comparación la estación INIA Las Brujas. A continuación se presentan en la figura Nro. 5, los datos de la caracterización para dichos años (INIA, s.f.).

Figura 5

Precipitaciones período 2022-2023 y media histórica para la serie 1993/2023



Nota. Elaborado a partir de datos meteorológicos de INIA (s.f.).

Como se observa en la figura Nro. 5, para todo el período de evaluación del experimento se dieron precipitaciones por debajo de la media histórica. Además, el mes de enero 2023 estuvo significativamente por debajo de la media histórica, al igual que todo el verano 2023, el cual marcó un récord en materia de bajas precipitaciones. En el mes de marzo, ocurrieron precipitaciones, pero éstas no fueron suficientes para poder compensar el déficit hídrico de los meses anteriores. Las precipitaciones de todo el período evaluado estuvieron muy por debajo de la media histórica que, sumado a las altas temperaturas del verano, podrían haber afectado de forma negativa la persistencia y producción de la alfalfa en el experimento.

En cuanto a las temperaturas máximas, si bien sobrepasaron los 40°C en alguno de los meses del periodo evaluado, nunca estuvieron por encima de 45°C. En el verano 23, la temperatura máxima fue superior a 35°C durante 16 días y esto pudo haber perjudicado la productividad de la alfalfa.

De acuerdo a Flórez Delgado (2015), la alfalfa es una especie que se adapta a una gran diversidad de climas, a excepción de algunos lugares en los que el estrés térmico (como altas temperaturas) afecta negativamente limitando su producción.

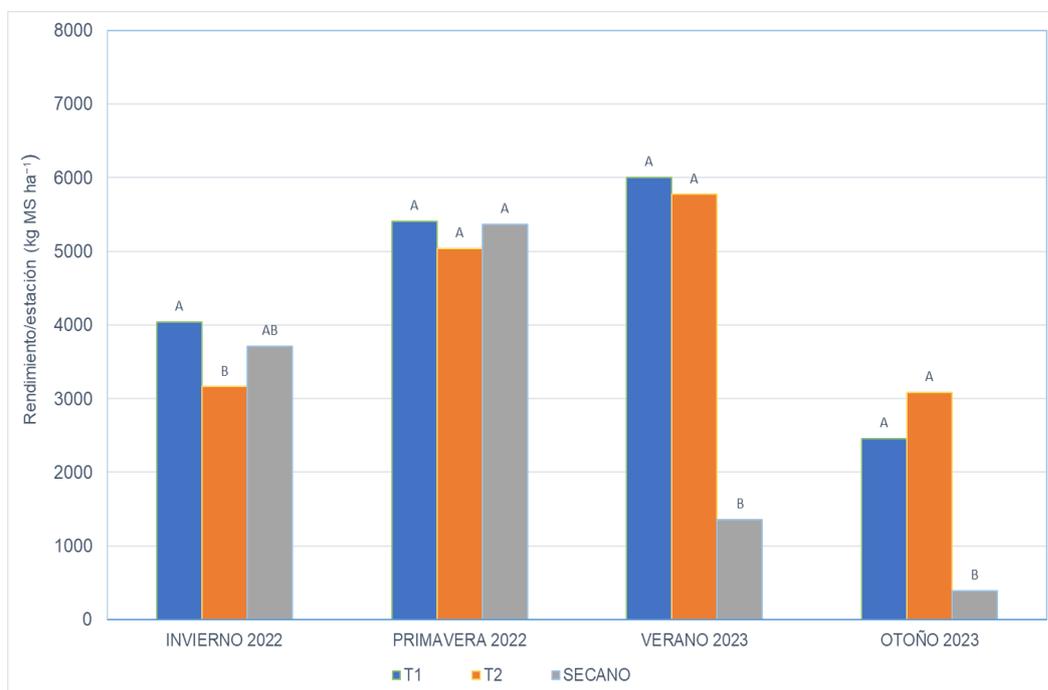
Cabe destacar que, si bien las temperaturas máximas sobrepasaron los 40°C en alguno de los meses del período evaluado, en ninguno la temperatura máxima fue superior a 45°C.

4.2. PRODUCCIÓN DE FORRAJE

En las Figuras 6 y 7 se presenta la producción de forraje en $kg MS ha^{-1}$ por estación y el rendimiento acumulado anual en $kg MS ha^{-1}$ para el T1, el T2 y el T0 (secano).

Figura 6

Producción estacional de forraje de alfalfa ($kg MS ha^{-1}$)



Nota. Elaborado en base a análisis de datos. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre medias de los tratamientos. Se realizaron por test de Fisher y se utilizó la corrección de Bonferroni.

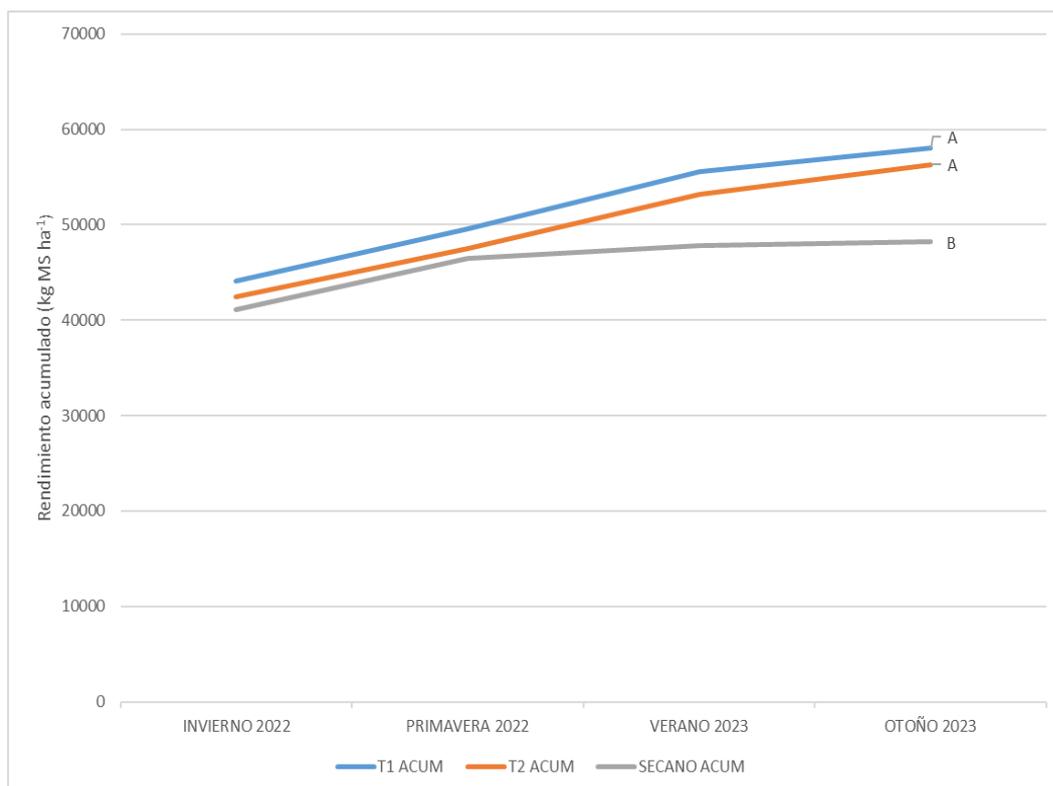
En cuanto a la producción de forraje ($kg MS ha^{-1}$) por estación, como resultado del análisis estadístico se desprende que en la estación de invierno el secano podría rendir lo mismo que los tratamientos regados (T1 y T2). A su vez, en primavera se muestra que no hay diferencias significativas entre tratamientos, por lo que no resulta conveniente regar la alfalfa en dicha estación, para este año en particular.

En cambio, hubo diferencias entre los tratamientos regados y el secano en el verano, rindiendo 4,3 veces más y 7 veces más en el otoño de 2023. En relación a lo anterior, cabe destacar, que en otoño se restablecieron las lluvias con un registro de 181 mm distribuidos en 16 eventos. No existió diferencias entre los tratamientos bajo riego para las mismas estaciones. Demin y Aguilera (2012) obtuvieron rendimientos similares a los de este experimento bajo riego, en un ensayo en Catamarca (Argentina).

En el verano 2023 del presente experimento, la temperatura máxima fue superior a 35° durante 16 días, y esto pudo haber perjudicado la productividad de la alfalfa.

Figura 7

Producción de forraje acumulado de alfalfa (kg MS ha⁻¹)



Nota. Elaborado en base a análisis de datos. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre medias de los tratamientos. Se realizaron por test de Fisher y se utilizó la corrección de Bonferroni.

En relación a la producción de forraje acumulado (kg MS ha⁻¹), se observa que no hubo diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos regados (T1 y T2), pero sí hubo diferencias entre los regados y secano (T0), para todo el período estudiado.

Dicho resultado está explicado por las bajas precipitaciones ocurridas en el verano (2022-2023), totalizando 56 mm en los 3 meses de dicha estación, por lo que las escasas precipitaciones determinaron que la producción de forraje en las parcelas del T0 se vieran comprometidas tanto en el verano como en el otoño de ese año. Para el T0, las producciones de forraje más altas se obtuvieron en la primavera. Carámbula (1991) indica que la alfalfa entrega la mitad de su producción anual en los meses de primavera, siendo una época en que normalmente las temperaturas y disponibilidad de agua favorecen el buen desarrollo de la planta. En cambio, en este experimento, las

producciones más altas se obtuvieron para los tratamientos con riego en la estación estival.

4.2.1. Tasa de crecimiento estacional

En la tabla Nro. 2, se muestra la tasa de crecimiento estacional ($\text{kg MS ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$) para cada tratamiento.

Tabla 2

Tasa de crecimiento estacional ($\text{kg MS ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$)

	T1		T2		Secano	
Invierno 2022	44	A	34,3	B	40,3	AB
Primavera 2022	56,3	A	50,3	A	56,6	A
Verano 2023	71,8	A	74,6	A	33,8	B
Otoño 2023	36,3	A	35,3	A	4,3	B

Nota. Elaborado en base a análisis de datos. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre medias de los tratamientos. Se realizaron por test de Fisher y se utilizó la corrección de Bonferroni.

Los resultados obtenidos muestran diferencias significativas entre los tratamientos regados y el secano en el verano y otoño del año 2023, resultando en una mayor tasa de crecimiento para los regados ya que el déficit hídrico severo en verano afectó la producción del secano. Sin embargo, no existió diferencias en $\text{kg MS ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ entre los tratamientos regados. En verano se obtuvieron las tasas de crecimiento más altas, seguido por la primavera, mientras que en invierno se dieron las tasas más bajas.

Cabe destacar que, según Rebuffo (2000), la alfalfa empieza a crecer a comienzo de los meses de primavera y alcanza un pico máximo de producción de forraje al final de dicha estación. A partir de ahí, la tasa de crecimiento se va a ver disminuida cuando se presentan veranos secos, y en otoño se da un segundo pico de producción de forraje pero no llega a alcanzar las producciones de primavera. Por último, se enlentece el crecimiento en invierno.

Sin embargo, en una publicación presentada por Otero y Castro (2019), muestran tasas de crecimiento en $\text{kg MS ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ para alfalfa de 39 en otoño, 18 en invierno, 40 en primavera y 53 en verano, siendo éstas menores comparadas con las del presente experimento, pero con un patrón similar.

4.2.2. Frecuencia de pastoreos

En la tabla que se muestra a continuación, se observan los días entre pastoreos sucesivos y el número de pastoreos tanto para T1 y T2 como para el tratamiento de secano. Para el período analizado, se realizaron 10 pastoreos totales tanto en el T1 como en el T2, y 6 en el secano. En las estaciones de primavera y verano, se llevaron a cabo hasta 3 pastoreos en T1 y T2.

Tabla 3
Frecuencia y número de pastoreos por estación

	Frecuencia de pastoreo			Número de pastoreos		
	T1	T2	Secano	T1	T2	Secano
Invierno 2022	69	68	75	1	1	1
Primavera 2022	55 / 49 / 28	56 / 48 / 28	57 / 47 / 35	3	3	3
Verano 2023	21 / 28 / 28	22 / 27 / 35	35	3	3	1
Otoño 2023	30/21/42	28/44/35	149	3	3	1
Total				10	10	6

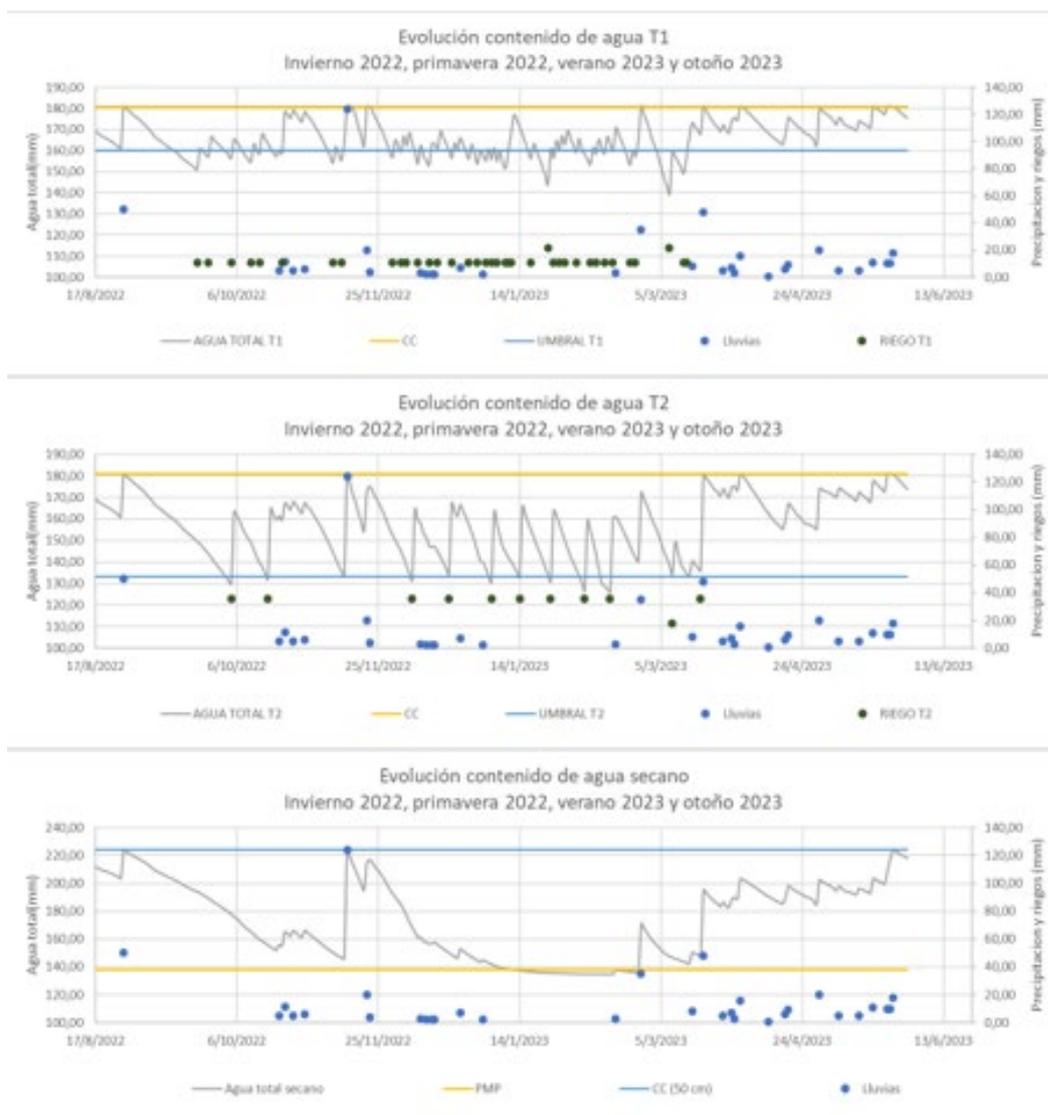
Nota. Elaborado en base a análisis de datos.

Para el tratamiento de secano, dada la baja producción de materia seca del verano y el otoño del año 2023, se realizó un único pastoreo.

4.3. EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO

En la figura Nro. 8, se muestra la evolución del contenido de agua para cada tratamiento de riego y para el secano, para todo el período evaluado (invierno 22-otoño 23). Cabe destacar que, la estación estival 2022-23, fue la más seca de los últimos años.

Figura 8
Evolución del contenido de agua en el suelo



Nota. Evolución del contenido de agua total en el suelo. Lluvias (puntos azules), riegos (puntos verdes), capacidad de campo (CC), umbral de riego (T1 y T2), punto de marchitez permanente en seco (PMP) en seco.

Como se puede observar en la evolución del contenido de agua en el suelo para el T1, los riegos mantuvieron la humedad del mismo entorno a su umbral (30 % de agotamiento) alcanzando en pocas ocasiones la condición de capacidad de campo (CC), consecuencia de la ocurrencia de precipitaciones. Cabe recordar, que el manejo del riego en los dos tratamientos (T1 y T2) consistió en llevar el agua desde el umbral hasta una condición de humedad por debajo de CC. Se produjo un retraso por temas operativos en dos fechas en el riego aplicado, uno en la segunda quincena de enero de 2023 y otro en marzo del mismo año, lo cual fue rápidamente solucionado.

La humedad para el T2 se mantuvo por debajo de CC excepto en el caso de ocurrencia de precipitaciones como fue la del 14/11/2022 de 124 mm. Los riegos aplicados permitieron mantener la humedad entorno al umbral (65 % de agotamiento).

Para el tratamiento T0 (secano), se evidencia una condición de punto de marchitez permanente (PMP) a los 50 cm de profundidad. Como se muestra en la gráfica, a partir del día 3/01/2023 y hasta el 26/2/2023 (día en el cual se registró un evento de lluvia de 35 mm) se mantuvo en dicha condición. A pesar de esto, las plantas lograron sobrevivir, lo cual estaría indicando que hubo absorción de agua por debajo de esa profundidad. De todas formas, el rendimiento de MS se vió comprometido seriamente en ese verano y un poco más aún en el otoño, a pesar de la ocurrencia de precipitaciones (como se muestra en la Figura Nro. 5).

Tabla 4
Precipitaciones efectivas por tratamiento y ETc por estación

	PP efectiva (mm)			ETc (mm d-1)		ETc aj. (mm d-1)	
	T1	T2	SECANO	T1	T2	SECANO	
Invierno 2022	44	44	43	47	47	47	
Primavera 2022	68	101	130	182	195	156	
Verano 2023	40	56	56	323	291	84	
Otoño 2023	106	96	170	150	158	117	
Total	258	297	399	702	691	404	

Tabla 5
Número de riegos aplicados, mm de riego y agua total consumida por estación

	N° de riegos por estación		Riego (mm)		Agua total consumida (mm)		
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	Secano
Invierno 2022	0	0	0	0	47	42	46
Primavera 2022	9	2	96	71	182	194	155
Verano 2023	27	7	289	249	321	289	82
Otoño 2023	3	2	43	54	143	139	113
Total	39	11	428	374	693	664	396

Nota. Elaborado en base a análisis de datos.

Al observar en conjunto la columna de número de riegos por estación para el T2, así como los milímetros aplicados, se concluye que el manejo con este umbral determinó un menor número de riegos aplicados de forma espaciada. Esto trae aparejado un

manejo más sencillo en cuanto a la operativa del riego y del pastoreo, con un mejor aprovechamiento de las precipitaciones.

Además, en la tabla Nro. 5 se muestra el agua total consumida (mm) por cada tratamiento en cada estación del período evaluado. El consumo total de agua (mm) para la alfalfa en todo el período evaluado fue de 678 mm en promedio para T1 y T2, y 396 mm para secano. Se puede ver un mayor consumo de agua total por parte del T1 apenas por encima del T2, mientras que en el T0 (secano) su consumo total fue la mitad si se compara con los regados, dado que, el agua consumida proviene únicamente de las precipitaciones (Pp efectiva) y del agua que proviene del almacenamiento del suelo (variación de humedad del suelo). Los distintos consumos de agua en T1 y el T2 están dados por el control de la apertura estomática que sufrieron las plantas en el T2 en días anteriores al riego, donde el agotamiento del contenido de agua en el suelo por debajo del agua fácilmente disponible, determina que se cierren estomas y las plantas consuman menos agua.

El verano 2023, el cual se caracterizó por ser el más seco en muchos años, el consumo total de agua significó casi el 50% del total de agua consumida en todo el período. Los valores de agua total consumido de este trabajo, se encuentran comprendidos en el rango reportado por Sheaffer et al. (1988) entre 400 hasta 1800 mm año⁻¹, considerando distintos climas.

4.4. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA

En la tabla Nro. 6 se presenta la productividad del agua total en kg MS ha⁻¹ mm⁻¹ para cada tratamiento y cada estación, y la productividad del agua de riego para T1 y T2. No se evidencian diferencias claras hacia ningún tratamiento.

Tabla 6

Productividad del agua total y del agua de riego (kg.MS.ha-1.mm-1)

	Productividad del agua total			Productividad del agua de riego	
	T1	T2	Secano	T1	T2
Invierno 2022	86.0 A	75.1 A	80.0 A		
Primavera 2022	29.7 B	25.9 C	34.6 A	56.2 B	70.7 A
Verano 2023	18.7 A	20.0 A	16.6 A	20.8 A	23.2 A
Otoño 2023	17.2 A	22.2 A	3.5 B	57.2 A	57.1 A

Nota. Elaborado en base a análisis de datos. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre medias de los tratamientos. Se realizaron por test de Fisher y se utilizó la corrección de Bonferroni.

En el invierno 2022 no se evidencian diferencias entre los tratamientos para la productividad del agua total como en la primavera del mismo año en donde sí se marcó una diferencia a favor del secano. En el verano de 2023 no hubo diferencias significativas entre tratamientos regados y el secano, es destacable el rendimiento del secano el cual alcanzó 1361 kg MS ha⁻¹ y los regados un rendimiento de 5889 kg MS ha⁻¹ (Figura Nro. 6). Esto permitió realizar más pastoreos en los regados mientras que en el secano se realizó un único pastoreo. Cabe destacar la baja productividad del agua del secano en el otoño del año 2023, en la cual se registraron algunas precipitaciones que no fueron suficientes para que la producción de alfalfa se vea favorecida

nuevamente. El marcado déficit hídrico del verano no sólo afectó a dicha estación, sino también a la siguiente.

En cuanto a la productividad del agua de riego, no hubo diferencias para verano y otoño. Lo anterior estaría indicando que en condiciones de extrema sequía como la del verano 2023, la mayor cantidad de mm aplicados por riego en el T1 en comparación al T2, se tradujo en un mayor rendimiento de MS. Sin embargo, en la primavera de 2022 hubo diferencias en la productividad del agua de riego a favor del T2, debido al mayor aprovechamiento de las precipitaciones en el T2 respecto al T1.

5. CONCLUSIONES

La alfalfa responde al riego de forma significativa en los meses de verano con un mayor rendimiento de forraje en kg MS ha^{-1} . Sin embargo, el rendimiento de la misma no fue sensible a los umbrales de riego manejados en este experimento. En años normales en cuanto al registro de precipitaciones, los resultados se traducirían en un ahorro de agua de riego y de costo energético por bombeo.

A nivel de manejo del riego, un riego espaciado (T2), permite un menor gasto de agua de riego, mayor aprovechamiento de las precipitaciones y una operación del riego más sencilla para el productor.

En momentos donde las precipitaciones son escasas o nulas, el rendimiento en kg MS ha^{-1} en el tratamiento seco disminuye de manera significativa y se compromete notoriamente la productividad de la pastura en la estación entrante, aún cuando vuelven a registrarse eventos de lluvia.

En la primavera, y para el período evaluado (año muy particular en cuanto a bajas precipitaciones), la alfalfa en seco hace un uso más eficiente del agua. Cabe considerar que el suelo del sitio experimental presenta características como el nivel de materia orgánica y su profundidad que lo hacen un suelo de muy buenas condiciones.

El rendimiento de MS anual fue mayor para los tratamientos regados, posiblemente asociado a las condiciones de bajas precipitaciones del año evaluado.

Las tasas de crecimiento en $\text{kg MS ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ más altas se evidenciaron en los tratamientos regados para la estación estival.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO.
- Barberis, N., Odorizzi, A., Arolfo, V., Urrets Zavalía, G., & Basigalup, D. (2019). *Comparación entre resultados económicos en secano y con riego suplementario del cultivo de alfalfa (Medicago sativa L.) para henificación en el centro de la provincia de Córdoba*. INTA.
https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/bitstream/handle/20.500.12123/4885/INTA_CR%20Cordoba_EEA%20Manfredi_Barberis_N_Comparaci%3%b3n_entre_resultados_econ%3%b3micos_en_secano_y_con_riego.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Bertín, O. (1999). Producción de alfalfa con y sin riego. *Revista Agromercado*, (33), 52.
- Brown, H. E., Moot, D. J., & Pollock, K. M. (2005). Herbage production, persistence, nutritive characteristics and water use of perennial forages grown over 6 years on a Wakanui silt loam. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 48(4), 423-439. <https://doi.org/10.1080/00288233.2005.9513677>
- Carámbula, M. (1991). *Aspectos relevantes para la producción forrajera*. INIA.
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2921/1/111219220807114541.pdf>
- Chilibroste, P., Gibb, M., & Tamminga, S. (2005). Pasture characteristics and animal performance. En J. Dijkstra, J. M. Forbes, & J. France (Eds.), *Quantitative aspects of ruminant digestion and metabolism* (2nd ed.). CAB International.
- Clavijo, E., & Cadena, P. (2011). *Producción y calidad nutricional de la alfalfa (Medicago sativa) sembrada en dos ambientes diferentes y cosechada en distintos estadios fenológicos* [Tesis de maestría]. Universidad de la Salle.
- Cullen, B. R., Chapman, D. F., & Quigley, P. E. (2006). Comparative defoliation tolerance of temperate perennial grasses. *Grass and Forage Science*, 61(4), 405-412.
- Demin, P. E., & Aguilera, J. J. (2012). Efecto del régimen de riego en el rendimiento de alfalfa para corte en el Valle Central de Catamarca, Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad de Cuyo*, 44(1), 173-181.
- Doorenbos, J., & Kassam, A. (1979). *Yield response to water*. FAO.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-025675-7.50021-2>
- Durán, A. (Coord.). (1976). *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay*. MAP.
https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-02/Carta%20de%20Reconocimiento%20de%20Suelos%20del%20Uruguay%201.1.000.000_0.pdf
- Enguita, I. D. (1989). *Alfalfas de secano para pastoreo*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1989_06.pdf

- Fariña, S., Tuñon, G., Pla, M., & Martínez, R. (2017). *Sistema de manejo de pastoreo La Estanzuela: Guía práctica para la implementación de un sistema de pastoreo*. INIA.
- Flórez Delgado, D. F. (2015). La alfalfa (*Medicago sativa*): Origen, manejo y producción. *Conexión Agropecuaria JDC*, 5(1), 27-43.
<https://revista.jdc.edu.co/index.php/conexagro/article/view/520>
- Formoso, F. (2000). Manejo de alfalfa para producción de forraje. En M. Rebuffo, D. F. Risso, & E. Restaino (Eds.), *Tecnología en alfalfa* (pp. 53-74). INIA.
- Ganche, E., O'Donovan, M., Delaby, L., Boland, T. M., & Kennedy, E. (2015). Does post-grazing sward height influence sward characteristics, seasonal herbage dry-matter production and herbage quality? *Grass and Forage Science*, 70(1), 130-143. <https://doi.org/10.1111/gfs.12113>
- Google. (2024). [Centro Regional Sur, Progreso, Canelones, Uruguay. Mapa]. Recuperado el 15 de marzo de 2024, de [https://www.google.com.uy/maps/place/Centro+Regional+Sur+\(CRS\),+Facultad+de+Agronom%C3%ADa/@-34.6305221,-56.2219551,23559m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x95a1cb3baf51fd0f:0x892ce43193f5f9a1!8m2!3d-34.6133106!4d-56.2175821!16s%2Fq%2F1hc2h77tr!5m2!1e4!1e2?hl=es-419&coh=208015&entry=tt](https://www.google.com.uy/maps/place/Centro+Regional+Sur+(CRS),+Facultad+de+Agronom%C3%ADa/@-34.6305221,-56.2219551,23559m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x95a1cb3baf51fd0f:0x892ce43193f5f9a1!8m2!3d-34.6133106!4d-56.2175821!16s%2Fq%2F1hc2h77tr!5m2!1e4!1e2?hl=es-419&coh=208015&entry=tt)
- Hayashi, R. M., & Dogliotti, S. (2021). Water productivity in maize, at different levels of deficit irrigation in humid climate. *Agrociencia Uruguay*, 25(1), Artículo e390.
<https://doi.org/10.31285/AGRO.25.390>
- Haydock, K. P., & Shaw, N. H. (1975). The comparative yield method for estimating dry matter yield of pasture. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 15, 663-670. <https://doi.org/10.1071/EA9750663>
- Hofstadter, R. (1983). Producción de maíz, alfalfa y trébol blanco en condiciones de riego. *Agua en la Agricultura*, 1, 7-13.
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. (s.f.). *Banco datos agroclimático*. <http://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria & Instituto Nacional de Semillas. (2024). *Resultados experimentales de la evaluación nacional de cultivares de especies forrajeras: Anuales, bianuales y perennes: Período 2023*. http://www.inia.org.uy/convenio_inase_inia/Evaluacion_EF/Ano2023/PubForraierasPeriodo2023.pdf
- Marano, R. P., Ledesma, F., & Camussi, G. (2012). *Uso de sondas FDR para balance de agua en suelo: Calibración y aplicación*. INTA.
<https://www.ina.gob.ar/cra/riego/fertirriego/pdf/Marano%2034.pdf>

- Mattiauda, D., Chilibroste, P., Bentancur, O., & Soca, P. (2009). Intensidad de pastoreo y utilización de pasturas perennes en sistemas de producción de leche: ¿Qué niveles de producción permite y qué problemas contribuye a solucionar? En Centro Médico Veterinario de Paysandú (Ed.), *XXXVII Jornadas Uruguayas de Buiatría* (pp. 96-110).
https://bibliotecadigital.fvet.edu.uy/bitstream/handle/123456789/55/JB2009_96-103.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Morón, A. (2000). Alfalfa: Fertilidad de suelos y estado nutricional en sistemas agropecuarios de Uruguay. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, (8), 1-6.
<http://www.inia.org.uy/sitios/tesis/fertilizacion/IPNIAalfalfaUruguayMoron.pdf>
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2013). *Censo General Agropecuario 2011*. MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/estadisticas/censo-general-agropecuario-2011>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2021). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2000*.
<https://www.fao.org/4/x4400s/x4400s.pdf>
- Otero, A., & Castro, M. (2019). Variability of alfalfa (*Medicago sativa* L.) seasonal forage production in the southwest of Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*, 23(1), Artículo e65. <https://doi.org/10.31285/agro.23.1.9>
- Peralta, J. M., & Simpfendorfer, C. (2001). *Riego por aspersión*. Ministerio de Agricultura; INIA.
- Radulovich, R. (2009). Método gravimétrico para determinar in situ la humedad volumétrica del suelo. *Agronomía Costarricense*, 33(1), 121-124.
- Ramos-Ulate, C. M., Pérez-Álvarez, S., Guerrero-Morales, S., & Palacios-Monarez, A. (2021). Biofertilización y nanotecnología en la alfalfa (*Medicago sativa* L.) como alternativas para un cultivo sustentable. *Cultivos Tropicales*, 42(2), Artículo e2.
<http://ref.scielo.org/hcvpgc>
- Rebuffo, M. (2000). Adopción de variedades en Uruguay. En M. Rebuffo, D. F. Risso, & E. Restaino (Eds.), *Tecnología en alfalfa* (pp. 5-13). INIA.
<http://inia.uy/en/Publicaciones/Documentos%20compartidos/111219240807160703.pdf>
- Romero, N. (2007). *Alfalfa: Limitantes productivas en la región pampeana*. Sitio Argentino de Producción Animal. https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pasturas_cultivadas_alfalfa/03-alfalfa_limitantes_productivas.pdf
- Ruz, J. E., & Rodríguez, N. S. (2000). *Fertilización en alfalfa*. INIA.
<https://hdl.handle.net/20.500.14001/3700>
- Sánchez, J. E. H. (2005). *Rendimiento y calidad de la alfalfa mediante la aplicación de fósforo y riego por goteo subsuperficial* [Trabajo final de grado]. Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro".

- Sawchik, J. (2012). Necesidades de riego en cultivos y pasturas. En Grupo de desarrollo de riego (Eds.), *2° Seminario Internacional: Riego en cultivos y pasturas* (pp. 57-68). INIA.
<http://inia.uy/en/Publicaciones/Documentos%20compartidos/18429080413094411.pdf>
- Sawchik, J., & Formoso, F. (2000). *Inserción del riego en rotaciones de cultivos y pasturas*. INIA.
- Sawchik, J., Mas, C., Pérez Gomar, E., Bermúdez, R., Pravia, V., Giorello, D., & Ayala, W. (2010). Riego suplementario en pasturas: Antecedentes de investigación nacional. En L. Giménez, B. Böcking, M. G. Petillo, & C. García (Eds.), *Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas* (pp. 141-153). INIA.
- Sheaffer, C. C., Tanner, C. B., & Kirkham, M. B. (1988). Alfalfa water relations and irrigation. En A. A. Hanson, D. K. Barnes, & R. R. Hill Jr. (Eds.), *Alfalfa and alfalfa improvement* (Vol. 29, pp. 373-409). American Society of Agronomy; Crop Science Society of America; Soil Science Society of America.
- Steduto, P., Hsiao, T., Fereres, E., & Raes, D. (2012). *Crop yield response to water*. FAO.
- Taboada, M. (2007). *Efectos del pisoteo y pastoreo animal sobre suelos en siembra directa*. Sitio Argentino de Producción Animal. https://www.produccion-animal.com.ar/suelos_ganaderos/49-efectos_pisoteo.pdf
- Tenelanda-Patiño, D., Crespo-Sánchez, P., & Mosquera-Rojas, G. (2018). Umbrales en la respuesta de humedad del suelo a condiciones meteorológicas en una ladera Altoandina. *Maskana*, 9(2), 53-65.
<https://doi.org/10.18537/mskn.09.02.07>
- United States Department of Agriculture. (2021). *The importance of pollinators*. <https://www.usda.gov/peoples-garden/pollinators>
- Uribe, H., & Ruiz, R. (2019). Riego y evapotranspiración. En G. Chacón (Ed.), *Descripción y usos de la Red de Agrometeorología* (pp. 56-62). INIA.
<https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/6836/Boletín%20INIA%20Nº%20415?sequence=1&isAllowed=y>