



**UNCUYO**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE CUYO

**EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA DE PASTURAS  
CONSOCIADAS DOMINADAS POR FESTUCA ALTA (*FESTUCA  
ARUNDINACEA* SCHREB) BAJO DOS SISTEMAS  
CONTRASTANTES DE PASTOREO OVINO EN EL VALLE  
INFERIOR DEL RÍO CHUBUT.**

Autor

LUCAS DAMIÁN DÍAZ

Directora

Dra. MARÍA VICTORIA RODRIGUEZ

Co-directores

Ing. (Ms. Sc.) JORGE L. LUQUE

Ing. (Ms. Sc.) VÍCTOR M. LIPINSKI

Para optar al grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN RIEGO Y DRENAJE**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

DICIEMBRE, 2018



## AGRADECIMIENTOS

Al estado argentino, representado a través del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), por la oportunidad del desarrollo y perfeccionamiento profesional mediante las becas de formación. Por más derechos para los becarios y becarias, por más presupuesto para los organismos de Ciencia y Técnica.

A todas las personas que se involucraron con esta tesis, desde mi directora hasta aquellos y aquellas que colaboraron en la labor de campo o enriquecieron este trabajo con un consejo u opinión.

Al Instituto Patagónico para el Estudio de los Ecosistemas Continentales del CCT-CONICET-CENPAT por el préstamo del infiltrómetro de mini disco y por la colaboración brindada por el Laboratorio de Suelos de Ecosistemas Patagónicos (LASUEP).

## RESUMEN

Uno de los cultivos más importantes en el Valle Inferior del Río Chubut (VIRCh, Patagonia Argentina) son las pasturas irrigadas, sin embargo, presentan una baja producción atribuible al manejo deficiente del pastoreo y del agua de riego. Ante el escenario futuro de escasez de agua, modificar las prácticas agrícolas surge como un camino factible para gestionar exitosamente este recurso. Los sistemas de pastoreo pueden determinar la eficiencia en el uso del agua del cultivo (EUA, oferta forrajera/evapotranspiración del cultivo) debido a los efectos sobre la vegetación y el suelo. En este trabajo se comparó la EUA de una pastura representativa del VIRCh bajo dos sistemas de pastoreo ovino contrastantes, con diferente tiempo de permanencia y carga animal instantánea. Además se evaluaron variables físico-químicas del suelo, con el fin de explicar eventuales diferencias entre sistemas, y las condiciones climáticas, para conocer el grado de incidencia en el cultivo.

La EUA de las pasturas sometidas al pastoreo con alta carga instantánea y corto tiempo de permanencia (pastoreo frontal=PF) no se diferenciaron de la EUA de las pasturas sometidas al pastoreo con menor carga instantánea y mayor tiempo de permanencia (pastoreo rotativo=PR). Tampoco se encontraron diferencias en la oferta forrajera (OF) ni en la mayoría de las características fisicoquímicas del suelo. Sin embargo, se constató una mayor biomasa de raíces en las pasturas bajo PF y una disminución de la densidad aparente del suelo en las sometidas al PR. Ambos sistemas propiciaron efectos positivos en la vegetación y el suelo, expresados a partir de una mayor OF en la segunda temporada. La radiación solar y la temperatura ambiente, condujeron el crecimiento de la pastura y su relación con la evapotranspiración, exponiendo la importancia de una rápida y densa cobertura del suelo a través de remanentes forrajeros adecuados, independientemente del sistema de pastoreo utilizado.

Palabras clave: Eficiencia en el uso del agua, riego, pasturas, sistemas de pastoreo.

## ABSTRACT

In the Lower Valley of Chubut River (VIRCh, Argentine Patagonia), the irrigated pastures are one of the most important crops. However, their low productivity can be attributed to inadequate water and grazing management. One feasible way to face a future scene of water scarcity is to change the agricultural practices to manage this resource successfully.

Water-Use Efficiency of pastures (WUE; forage mass/crop evapotranspiration) can be affected by grazing systems, because they have effect on vegetation and soil.

In the present work, WUE of VIRCh representative pasture was compared under two different sheep grazing systems. Each of these systems had different stocking period and stocking density. In addition, soil physicochemical and climatic variables were evaluated to explain possible differences between grazing systems and to know the degree of incidence in the crop, respectively.

There were no differences between WUE of pastures under grazing system with high stocking density and short stocking period (frontal system) and WUE of pastures under grazing system with less stocking density and longer stocking period (rotational grazing). There were no differences in the forage mass neither in soil physicochemical variables. Nevertheless, greater root biomass and decrease in soil bulk density were found in the pastures under frontal grazing and under rotational grazing, respectively. Both grazing systems produced positive effects in the vegetation and soil. This was based on the bigger forage mass in the second growing season. Solar radiation and temperature led the pasture growth and their relationship with the evapotranspiration. This fact shows the importance of a fast and dense ground cover through suitable residual forage, regardless of the grazing system implemented.

Keywords: Water-Use Efficiency, irrigation, pasture, grazing systems.

## ÍNDICE

1. Introducción	16
1.1. El agua y la agricultura. Eficiencia en el uso del agua.	16
1.2. Factores que afectan la EUA.	17
1.2.1. Clima.	17
1.2.2. Manejo del suelo y del cultivo.	19
1.3. Sistemas de pastoreo y su relación con la EUA.	21
1.4. Situación regional.	25
1.5. Objetivos.	27
1.5.1. Objetivo general.	27
1.5.2. Objetivos específicos.	27
1.6. Hipótesis.	27
2. Materiales y métodos.	29
2.1. Caracterización de la zona.	29
2.1.1. Ubicación geográfica.	29
2.1.2. Características de los suelos.	29
2.1.3. Clima.	29
2.2. Ensayo.	30
2.2.1. Ubicación del ensayo.	30
2.2.2. Diseño experimental.	30
2.2.3. Frecuencia de pastoreo y esquema de muestreo.	34
2.2.4. Asignación de la superficie de pastoreo.	35
2.2.5. Determinación de los parámetros de riego.	35
2.2.5.1. Determinación de la profundidad de humedecimiento necesaria.	36
2.2.5.2. Retención hídrica del suelo.	36
2.2.5.3. Humedad utilizable y humedad fácilmente utilizable.	37
2.2.5.4. Momento de riego.	38
2.2.5.5. Método de riego.	39

2.2.5.6 Calidad del agua de riego	40
2.3. Variables.	40
2.3.1. Variables climáticas.	40
2.3.2. Eficiencia en el uso del agua.	41
2.3.2.1. Oferta forrajera.	41
2.3.2.2. Evapotranspiración del cultivo.	42
2.3.3. Biomasa de raíces.	44
2.3.4. Variables físicas del suelo.	44
2.3.4.1. Densidad aparente.	44
2.3.4.2. Conductividad hidráulica saturada del suelo.	45
2.3.5. Variables químicas del suelo.	47
2.3.6. Resumen de momentos de muestreo para las variables.	47
2.4. Análisis estadísticos.	48
3. Resultados.	51
3.1. Caracterización de los períodos.	51
3.2. Eficiencia en el uso del agua.	51
3.2.1. Oferta forrajera.	55
3.2.2. Evapotranspiración del cultivo.	57
3.3. Biomasa de raíces.	58
3.4. Variables físicas del suelo.	59
3.4.1. Densidad aparente.	59
3.4.2. Conductividad hidráulica saturada del suelo	61
3.5. Variables químicas del suelo.	61
3.5.1. Materia orgánica del suelo.	61
3.5.2. Nitrógeno total del suelo.	63
3.5.3. pH del suelo.	65
3.5.4. Salinidad del suelo.	66
3.6. Relaciones entre variables.	68
3.6.1. Entre la EUA y las variables que la componen.	68
3.6.2. Entre las variables ambientales y la EUA, OF y Etc.	69
4. Discusión.	72

5. Conclusiones.	80
6. Bibliografía	82
7. Anexo 1: Conductividad hidráulica saturada del suelo.	94
Dificultades en su estimación	
7.1. Introducción.	94
7.2. Materiales y métodos.	95
7.3. Análisis de los resultados obtenidos.	95
7.3.1. Representación y análisis de los casos.	95
7.3.2. Clasificación de los casos.	96
7.4. Discusión.	97
7.5. Conclusiones.	98
7.6 Bibliografía.	99

## LISTA DE TABLAS

## Materiales y métodos:

Tabla 2.1: Valores de variables climáticas para la EEA INTA Chubut para la serie 1972-2015.	30
Tabla 2.2: Distribución de las raíces en el perfil del suelo.	37
Tabla 2.3: Resumen de los momentos de muestreo para cada variable. OF: oferta forrajera; Etc: evapotranspiración del cultivo; BR: biomasa de raíces; Dap: densidad aparente del suelo; Ksat: conductividad hidráulica saturada del suelo.	48

## Resultados:

Tabla 3.1: Caracterización de los períodos en función del manejo del riego y de los animales para las pasturas bajo los distintos sistemas de pastoreo. PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo.	52
Tabla 3.2: Caracterización climática de los períodos para las pasturas bajo los distintos sistemas de pastoreo. PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo	53
Tabla 3.3: Parámetros de las regresiones por pasos significativas entre las variables ambientales y las variables medidas sobre las pasturas (EUA: eficiencia en el uso del agua; OF: oferta forrajera; Etc: evapotranspiración del cultivo; RS media: radiación solar diaria promedio; suma RS: radiación solar acumulada; VV: velocidad del viento media diaria promedio; TM: temperatura media diaria promedio).	71

## Anexo: Estimación de la conductividad hidráulica saturada del suelo

Tabla 7.1: Tabla de contingencia para la clasificación de los casos “normales” y “extraños” según la humedad previa a la determinación.	97
Tabla 7.2: Valores de la conductividad hidráulica saturada (Ksat) en los casos que fue posible ajustar una curva y estimar el parámetro de infiltración en un tiempo infinito (Ii(h)).	97

## LISTA DE FIGURAS

Materiales y métodos	
Figura 2.1: Distribución de melgas y tratamientos. PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo. Las líneas negras indican divisiones entre unidades experimentales con estructuras fijas (alambrados)	31
Figura 2.2: Sectores de muestreo previamente definidos para cada unidad experimental (cuadros grises). Los números contenidos en los cuadros indican la proporción de pastura útil.	32
Figura 2.3: Esquema de las parcelas de pastoreo en las unidades experimentales. Las áreas sombreadas en verde indican, a modo de ejemplo, la superficie de pastoreo asignada.	33
Figura 2.4: Ajuste de las unidades experimentales con redes plásticas.	34
Figura 2.5: Fechas aproximadas de pastoreo para cada sistema de pastoreo. La línea de puntos entre el pastoreo 2 y 3 representa, a modo de ejemplo, al período 3 del PR.	35
Figura 2.6: Metodología utilizada para el conteo de raíces.	36
Figura 2.7: Sifón de PVC de 110 mm de diámetro.	40
Figura 2.8: Marco de 0,125 m <sup>2</sup> utilizado para delimitar las parcelas de corte para el muestreo de oferta forrajera.	42
Figura 2.9: Esquema de muestreo para la construcción de la variable Etc para un período.	43
Figura 2.10: Porción de las raíces extraídas de una muestra (izquierda) e instrumental utilizado para la separación del suelo (derecha).	44
Figura 2.11: Infiltrómetro de mini disco.	45
Resultados	
Figura 3.1: Valores medios de eficiencia en el uso del agua (EUA) para las pasturas bajo diferentes sistemas de pastoreo en	5
	4

los distintos períodos. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre períodos. PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo.

Figura 3.2: Valores medios de eficiencia en el uso del agua total (EUA total) para las pasturas bajo distintos sistemas de pastoreo. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas. PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo. 54

Figura 3.3: Valores medios de eficiencia en el uso del agua de cada temporada (EUA temporada) para las pasturas bajo distintos sistema de pastoreo. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre las pasturas sometidas a los distintos sistemas de pastoreo dentro de cada temporada. PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo. 55

Figura 3.4: Valores medios de eficiencia en el uso del agua parcial (EUA parcial) de las pasturas bajo: A) pastoreo frontal (PF) y B) pastoreo rotativo (PR). Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas. 55

Figura 3.5: Valores medios de la oferta forrajera (OF) para las pasturas sometidas a los distintos sistemas de pastoreo en los distintos períodos. Las líneas verticales indican el error estándar. El asterisco indica el período donde se encontró una diferencia estadísticamente significativa entre sistemas de pastoreo. PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo. 56

Figura 3.6: Valores medios de oferta forrajera total (OF total) para las pasturas bajo distintos sistemas de pastoreo. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas. PF: pastoreo frontal; 57

PR: pastoreo rotativo.

Figura 3.7: Valores medios de oferta forrajera del cultivo para cada temporada (OF temporada) en: A) pastoreo frontal (PF) y B) pastoreo rotativo (PR). Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas. 57

Figura 3.8: Valores medios de evapotranspiración del cultivo para la primera temporada (Etc temporada) para las pasturas bajo distintos sistemas de pastoreo. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas. PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo. 58

Figura 3.9: A- Valores medios de biomasa de raíces (BR) para las pasturas bajo diferentes sistemas de pastoreo promediando todos los períodos; B- Valores medios de biomasa de raíces para las pasturas sometidas a los distintos sistemas de pastoreo en los distintos períodos, las líneas verticales indican el error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre períodos. PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo. 59

Figura 3.10: Evolución de la densidad aparente del suelo (Dap) para las pasturas sometidas a diferentes sistemas de pastoreo. Las líneas verticales indican el error estándar. El asterisco indica diferencias significativas del factor sistema de pastoreo en el período marcado. PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo. 60

Figura 3.11: Evolución de la densidad aparente del suelo (Dap) entre el período inicial (1) y final (5) de la primera temporada para las pasturas sometidas a: A) pastoreo frontal y B) pastoreo rotativo. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas. 60

Figura 3.12: Valores medios de conductividad hidráulica saturada del suelo (Ksat) para las pasturas sometidas a los 61

distintos sistemas de pastoreo. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas. PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo.

Figura 3.13: Evolución de la materia orgánica (MO) para las pasturas bajo diferentes sistemas de pastoreo. Las líneas verticales indican el error estándar. PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo. 62

Figura 3.14: Evolución de la materia orgánica del suelo (MO) entre los períodos inicial (1) y final (5) para las pasturas bajo los distintos sistemas de pastoreo. En A) pastoreo frontal y en B) pastoreo rotativo. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas. 62

Figura 3.15: Evolución de la materia orgánica del suelo (MO) entre los períodos finales de cada temporada (5 y 9) para las pasturas bajo los distintos sistemas de pastoreo; en A) pastoreo frontal y en B) pastoreo rotativo. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas. 63

Figura 3.16: Evolución del Nitrógeno total del suelo (N) para las pasturas bajo distintos sistemas de pastoreo. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas entre períodos. PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo. 63

Figura 3.17: Evolución del Nitrógeno total del suelo (N) entre el período inicial (1) y final (5) para las pasturas bajo distintos sistemas de pastoreo, en A) pastoreo frontal y en B) pastoreo rotativo. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas. 64

Figura 3.18: Evolución del nitrógeno total del suelo (N) entre los períodos finales de cada temporada (5 y 9) para las pasturas bajo los distintos sistemas de pastoreo, en A) pastoreo frontal y en B) 64

pastoreo rotativo. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas.

Figura 3.19: Evolución del pH del suelo (pH) en la primera temporada para las pasturas bajo los distintos sistemas de pastoreo. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas entre períodos. PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo. 65

Figura 3.20: Evolución del pH del suelo (pH) entre el períodos inicial (1) y final (5) para las pasturas bajo distintos sistemas de pastoreo, en A) pastoreo frontal (PF) y en B) pastoreo rotativo (PR). Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas. 66

Figura 3.21: Evolución de pH del suelo (pH) entre los períodos finales de cada temporada (5 y 9) para las pasturas bajo los distintos sistemas de pastoreo, en A) pastoreo frontal (PF) y en B) pastoreo rotativo (PR). Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas. 66

Figura 3.22: Evolución de la salinidad del suelo (CE) en las pasturas bajo cada sistema de pastoreo en la primer temporada. Las líneas verticales indican el error estándar. Períodos con asterisco indican diferencias significativas entre sistemas de pastoreo. PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo. 67

Figura 3.23: Valores medios de la salinidad del suelo (CE) entre el período inicial (1) y final (5) para las pasturas bajo distintos sistemas de pastoreo, en A) pastoreo frontal y en B) pastoreo rotativo. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas. 68

Figura 3.24: Valores medios de la salinidad del suelo (CE) entre los períodos finales de cada temporada (5 y 9) para las pasturas bajo los distintos sistemas de pastoreo, en A) pastoreo frontal y en B) pastoreo rotativo. Las líneas verticales indican el error 68

estándar. Letras distintas indican diferencias significativas entre períodos.

Figura 3.25: Relación entre la eficiencia en el uso del agua (EUA) y la oferta forrajera (OF). PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo. 69

Figura 3.26: Relación entre la eficiencia en el uso del agua (EUA) y A) radiación solar diaria promedio (RS media) y B) radiación solar acumulada (suma RS). PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo. 69

Figura 3.27: Relación entre la oferta forrajera (OF) y A) radiación solar diaria promedio (RS media) y B) radiación solar acumulada (suma RS). PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo 70

Figura 3.28: Valores observados de evapotranspiración del cultivo (Etc) en función de A- la temperatura media diaria promedio (TM), B- la radiación solar acumulada (suma RS) y C- la velocidad del viento media diaria promedio (VV). PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo. 70

Anexo 1: Conductividad hidráulica saturada del suelo.

Dificultades en su estimación.

Figura 7.1: Representación de dos determinaciones contrastantes representativas para la variable velocidad de infiltración (I), en A) velocidad de infiltración constante y en B) velocidad de infiltración ascendente. 96

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. El agua y la agricultura. Concepto de eficiencia en el uso del agua.

El uso global del agua ha aumentado a más del doble de la tasa de crecimiento de la población (FAO 2013); el crecimiento demográfico, la urbanización, la industrialización, el aumento de la producción en general y los cambios en los patrones de consumo, generan una demanda de agua cada vez mayor (WWAP 2015). En este contexto, la agricultura asume un rol preponderante sobre las otras actividades, debido a que representa aproximadamente el 70 % de todas las extracciones de agua dulce a nivel mundial, incrementando este porcentaje en los países menos desarrollados (WWAP 2015). Esta misma fuente advierte sobre la insostenibilidad del incremento en la demanda de agua de esta actividad, mientras que FAO (2013) informa que en muchas cuencas fluviales la demanda del recurso se ha disparado por encima de la capacidad de captación, generando escasez de agua.

El manejo del agua en la agricultura irrigada es uno de los mayores problemas que enfrenta la humanidad (Toledo 2002). Modificar las prácticas agrícolas y las tecnologías de riego surgen como caminos factibles para realizar un uso racional de este recurso (FAO 2013). Últimamente, el énfasis se ha puesto en producir una mayor cantidad de producto con relativamente menos agua (Sharma *et al.* 2015), y es en este contexto donde el concepto “productividad del agua” comienza a adquirir relevancia.

La productividad del agua (PA) es definida por Molden *et al.* (2007) como la relación entre los beneficios netos de un cultivo, forestación u otros productos agropecuarios y la cantidad de agua requerida para producirlo. Los componentes de este indicador deben definirse en función de los objetivos de su evaluación y pueden variar dependiendo de la escala, el contexto y el período de la estimación (Cook *et al.* 2006). Mejorar la PA en la agricultura es crítico para responder al incremento de la escasez del recurso hídrico, reducir los costos de producción, atenuar la inclusión de nuevas áreas de

cultivos y disminuir relativamente el consumo energético por extracción de agua (Sharma *et al.* 2015).

La “productividad física del agua” (PFA) es la relación entre la cantidad (masa) de producto obtenido y el volumen de agua utilizado (Molden *et al.* 2007), y cuando el denominador de esta ecuación es definido en términos de transpiración o evapotranspiración, coincide con el concepto de eficiencia en el uso del agua (EUA; Molden 2006).

## 1.2. Factores que afectan la EUA.

### 1.2.1. Clima.

La evapotranspiración es la combinación de dos procesos separados por los que el agua del sistema suelo-vegetación se pierde por evaporación desde la superficie del suelo y por transpiración desde el cultivo (Allen *et al.* 2006). La incidencia de cada uno de estos procesos varía en función de la cobertura vegetal del suelo y es controlada principalmente por la radiación solar, quien provee toda la energía para vaporizar el agua (Jensen y Allen 1990). Al igual que la transpiración, la asimilación de CO<sub>2</sub> encuentra en la radiación solar la mayor fuente de energía, sin embargo, el primer proceso es también afectado por el flujo de calor sensible en el canopeo (Steduto *et al.* 2007).

Los valores de transpiración y producción de materia seca de un cultivo tienden a incrementar de forma proporcional y están relacionadas en forma variable según la especie vegetal, las condiciones climáticas en donde se desarrolla y el grado de nutrición edáfica (Arkley 1963; Medrano *et al.* 2007; Steduto *et al.* 2007; Perry *et al.* 2009).

Cuando no existen restricciones hídricas edáficas, la tasa de transpiración de las plantas está regulada principalmente por la demanda atmosférica de humedad (Keller y Seckler 2005; Steduto *et al.* 2007), asociada con la temperatura del aire, la radiación solar y la velocidad del viento, entre otras variables climáticas. Sin embargo, el comportamiento de las distintas especies vegetales puede variar aún en las mismas condiciones atmosféricas (Allen *et al.* 2006). En el caso de las gramíneas, a temperaturas consideradas

óptimas para el crecimiento, la demanda atmosférica parecería influenciar de forma determinante el funcionamiento de los mecanismos de regulación de la transpiración, afectando negativamente la relación entre producción de biomasa aérea y agua transpirada a medida que aumenta el déficit de humedad en el ambiente (Sinclair *et al.* 2007).

La evaporación es el otro componente que afecta la evapotranspiración de un cultivo, y ocurre en al menos dos etapas. En la primera, que comienza siguiendo a un evento de humedecimiento de gran magnitud, la tasa de evaporación es limitada por la energía disponible que llega a la superficie del suelo y está en función del poder desecante de la atmósfera. La segunda etapa ocurre con suelo superficialmente seco y es controlada fundamentalmente por las características hidráulicas de este (Ritchie 1972; Jensen y Allen 1990). La frecuencia y la magnitud de los eventos de humedecimiento del suelo definen la importancia relativa de cada una de estas etapas por lo que son componentes decisivos en la cantidad de agua evaporada (Allen *et al.* 2006) e influyen de forma significativa en la evapotranspiración.

Algunos autores (Arkley 1963; Cooper *et al.* 1983; Perry *et al.* 2009; Sharma *et al.* 2015) sostienen que una de las formas más plausibles de aumentar la eficiencia en el uso del agua evapotranspirada (EUA) es aumentando la relación transpiración/evapotranspiración ( $T/E_t$ ) a través de una disminución en el componente evaporación. Esto se debe a que la eficiencia en el uso del agua transpirada se mantiene constante para una especie en particular y clima determinado (Steduto *et al.* 2007) y a que la evaporación es el componente que introduce la mayor variabilidad en la EUA (Keller y Seckler 2005). Sin embargo, la reducción de la evaporación desde el suelo no resultaría en una equivalente reducción de la evapotranspiración, debido a que este proceso (reducción de la evaporación) contribuye a disminuir la humedad ambiental dentro del canopy, con la consecuente mayor tasa de transpiración (Arkley 1963; Villalobos y Fereres 1990; Keller y Seckler 2005). Así mismo, cuando el suelo está húmedo, una fracción de la energía

de la radiación solar que alcanza esta superficie es utilizada para vaporizar el agua, mientras que con suelo superficialmente seco, una parte considerable de ésta se convierte en calor sensible, que aumenta la temperatura en el canopeo y la tasa de transpiración (Ritchie 1972). La velocidad del crecimiento foliar afecta los procesos descritos anteriormente, debido a que una rápida cobertura disminuye el tiempo en que el suelo está expuesto a la radiación y en consecuencia la cantidad de agua evaporada (Sinclair *et al.* 1984; Perry *et al.* 2009), aún con demandas evaporativas crecientes (Villalobos y Fereres 1990).

Si bien las demandas atmosféricas reducidas están asociadas con valores más altos de EUA, cuando estas condiciones son producto de una baja intensidad de la radiación solar y temperatura, el crecimiento del cultivo se puede ver comprometido (Perry *et al.* 2009), debido a que la producción vegetal está asociada de forma lineal con la energía lumínica absorbida por el canopeo cuando no existe otro tipo de restricción para su desarrollo (Monteith 1972).

### 1.2.2. Manejo del suelo y del cultivo.

La fertilidad del suelo juega un rol importante en la EUA. La mayoría de los autores sostienen que adecuados niveles de nitrógeno (N) en el suelo propician mayores valores de este parámetro (Stout *et al.* 1988; Stout 1992; Gajri *et al.* 1993; Stout y Schnabel 1997; Schmidhalter y Studer 1998; Brueck 2008), lográndose incrementos más significativos en los casos en que los niveles de N en el suelo previo a su adición son severamente bajos (Stout 1992; Tanner y Sinclair 1983, citado por Keller y Seckler 2005). Esta relación se debe principalmente a la función de este nutriente en el crecimiento del cultivo lo que determina un aumento en la transpiración y reducción de la evaporación por mayor cobertura del suelo (Gajri *et al.* 1993; Keller y Seckler 2005).

Así mismo, Fan *et al.* (2005) encontraron que la combinación de fertilizantes sintéticos y orgánicos propició mayores niveles de EUA debido a un aumento en la materia orgánica del suelo. En esta línea, Viets (1962)

sostiene que la EUA aumentaría si la fertilización o cualquier otro factor de manejo incrementaran el rendimiento del cultivo; y el grado de variación dependerá de la interacción entre los cambios en las características morfológicas y fisiológicas del canopeo, inducidas por la optimización del manejo, y de los factores ambientales.

De acuerdo a lo expuesto, Sadras *et al.* (2005) encontraron que en suelos menos compactados aumentó la EUA por el efecto de una mayor cobertura vegetal sobre la evaporación del suelo, producto de la capacidad de las plantas de obtener más recursos para su crecimiento (nutrientes, agua y radiación). Similares resultados fueron descriptos por Passioura (2002), en relación al efecto negativo que pueden tener los grandes poros o grietas del suelo sobre el crecimiento vegetal, como resultado de la concentración de las raíces en estos espacios en detrimento de la exploración integral de la zona radicular.

Otro factor importante en los niveles de producción del cultivo es la salinidad del suelo (Allen *et al.* 2006), debido a que afecta el crecimiento, área foliar y los procesos de fotosíntesis y de evapotranspiración a través de cambios en el estado hídrico de la planta (Katerji *et al.* 2003). Sin embargo, solo se han reportado variaciones en la EUA en los cultivos más sensibles a la salinidad, producto de una disminución más marcada en el rendimiento que en el agua evapotranspirada (Katerji *et al.* 2003). Las relaciones descriptas pueden ser explicadas a partir de lo postulado por Shalhevet (1994), respecto a que la evaporación directa del suelo es salino-dependiente por su relación con el área foliar y la cobertura del suelo, resultando que los cultivos sensibles son los que están más expuestos a este fenómeno.

Las condiciones atmosféricas y el contenido de humedad del suelo también pueden incidir en el efecto de la salinidad del suelo en el cultivo. Altas temperaturas y baja humedad relativa pueden disminuir el umbral salino en el cual las plantas de una especie determinada comienzan a reducir su rendimiento y también la intensidad en que estas reducen su producción ante aumentos en la concentración de sales edáficas (Shalhevet 1994), mientras

que suelos con contenidos hídricos elevados potencian el efecto de la salinidad, disminuyendo la biomasa aérea producida y la EUA (Khataar *et al.* 2018).

Otras estrategias de manejo para aumentar la EUA son la incorporación de materia orgánica para mejorar la capacidad de retención de agua y aumentar las tasas de infiltración de agua en el suelo, procurar una densa cobertura a través de material sintético o vegetal y realizar prácticas tendientes a obtener sistemas radicales densos y profundos (Keller y Seckler 2005; Molden *et al.* 2007; Rivera Peña 2008).

### 1.3. Sistemas de pastoreo y su relación con la EUA.

En el caso particular de los cultivos forrajeros para aprovechamiento directo por el ganado (pasturas), el sistema de pastoreo implementado puede ser determinante sobre la EUA debido a los efectos sobre la vegetación y la estructura y fertilidad del suelo en el horizonte superficial (Peden *et al.* 2007). Por este motivo, estrategias de pastoreo adecuadas a los sistemas productivos bajo riego pueden ser consideradas herramientas para mejorar la eficiencia en el uso de los recursos hídricos.

Los sistemas de pastoreo son caracterizados básicamente por el tiempo de permanencia de los animales pastoreando la parcela, por la intensidad de defoliación (entendida como la biomasa vegetal remanente a la salida de los animales) y momento de ésta, y por el tiempo transcurrido entre la finalización de un evento de pastoreo y el comienzo de otro (tiempo de descanso; Ortiz Reinoso y Soto Silva 2006). Estas características (y/o la combinación entre ellas) inciden en la estructura y funcionamiento de la vegetación y el suelo de la pastura (Pinheiro Machado 2004; Ortiz Reinoso y Soto Silva 2006; Agnusdei 2012).

La velocidad de rebrote de las plantas defoliadas (Beguet y Bavera 2001) y el crecimiento de las raíces pueden ser afectados por el tipo de pastoreo (Evans 1973; Vallentine 1990). El tiempo de permanencia en una parcela define la oportunidad que los animales tienen de comer el rebrote de las

plantas consumidas al principio de la ocupación (Hernández *et al.* 1985). Después de un pastoreo el vegetal rebrota principalmente a partir del remanente de biomasa fotosintética (Agnusdei 2012) y, cuando su capacidad fotosintética es limitada, inicia este proceso a partir de sus reservas (Briske 1991; Beguet y Bavera 2001; Cangiano y Brizuela 2011). Sin embargo, en los pastos, estas últimas estructuras están débilmente relacionadas con la capacidad de rebrote debido a la reducida cantidad (Briske y Richards 1995). De esta forma, si el rebrote o el remanente fotosintético son repetidamente consumidos la planta agota sus recursos para rebrotar y eventualmente muere. Los trabajos de Hernández *et al.* (1985), Jung *et al.* (1985), vanHeerden y Tainton (1988), Volesky *et al.* (1994) y Feria *et al.* (2002) sostienen que, para similares intensidades de defoliación, a medida que el tiempo de permanencia de los animales en la pastura disminuye, el crecimiento, uniformidad y calidad del forraje se verían beneficiados. En este sentido, un canopeo más denso, con mayor proporción de área foliar, mayor velocidad de rebrote y mayor desarrollo radicular se traduciría en una mayor relación T/Et y consecuentemente mayor EUA.

El sistema radical luego del pastoreo experimenta una disminución cuantitativa y funcional, y esta respuesta varía según la magnitud y frecuencia de estos eventos (Cridler 1955; Evans 1971; Evans 1973). Sin embargo, puesto que las raíces continúan siendo un destino de fotoasimilados aun inmediatamente después de la defoliación (Briske y Richards 1995), la respuesta al pastoreo puede variar a lo largo del año como consecuencia de la dependencia del proceso fotosintético a la intensidad lumínica y a las temperaturas (Evans 1973).

En resumen, el remanente fotosintético es particularmente importante en las pasturas dominadas por gramíneas debido a que determinan la posibilidad y velocidad de rebrote de las plantas sin comprometer y promoviendo un buen desarrollo de raíces (Vallentine 1990). Por otro lado, el tiempo de descanso debe ser lo suficientemente largo para permitir a la planta desarrollar

nuevamente su biomasa y acumular reservas antes de ser nuevamente pastoreada (Cangiano y Brizuela 2011).

Factores como las características edáficas, la dinámica de la biomasa de raíces (Dubeux Jr. *et al.* 2006) y microbiana del suelo (Jarvis 2000), estado y estructura de la pastura (Hoglund 1985) y distribución de las excreciones de animales (Bell *et al.* 2012), entre otras, inciden en las complejas interacciones que determinan el balance de los nutrientes en el sistema suelo-planta, y pueden estar influenciados en mayor o menor grado por los sistemas de pastoreo.

El pastoreo de los animales puede afectar en gran medida la tasa a la cual los nutrientes son ciclados (Floate 1981, citado por Williams y Haynes 1990; Schuman, *et al.* 1999). Los animales en pastoreo retornan en formas de excreciones entre el 85% y el 95% de los nutrientes consumidos (Shewmaker *et al.* 2009). Sin embargo, no todos ellos son aprovechados por la vegetación, debido a que la distribución de las deyecciones puede ser espacialmente heterogénea (Jarvis 2000) y en los sitios donde son depositadas se generan grandes concentraciones de nutrientes, particularmente de N, que exceden a la tasa de consumo por las plantas (Williams y Haynes 1990), favoreciendo las pérdidas a través de la lixiviación y volatilización. El pH del suelo puede verse afectado por la liberación de iones  $H^+$  en estos sitios, producto del proceso de nitrificación (Williams y Haynes 1990), lo que resultaría en una acidificación de la superficie con eventuales consecuencias en la disponibilidad de nutrientes en el suelo y la absorción por el cultivo (González *et al.* 1998).

En sistemas de pastoreo intensivos evaluados con intensidades de defoliación similares, menores tiempos de permanencia promovieron una distribución más uniforme del estiércol y orina (Morton y Baird 1990), lo que sería determinante para disminuir la proporción de N perdido (Bell *et al.* 2012). Esto coincide con el mayor incremento del contenido de N y materia orgánica en el suelo registrado en el trabajo de Feria *et al.* (2002), a partir de la implementación de un sistema de pastoreo con tiempos de permanencia

reducidos en una pastura tropical, en contraste con un sistema rotativo tradicional.

A través del pastoreo, el reciclaje del carbono se ve favorecido por la mayor velocidad de la descomposición del carbono vegetal, que de otra forma quedarían inmovilizados sobre la superficie del suelo en forma de mantillo (Schuman *et al.* 1999). En esta línea, Dubeux Jr. *et al.* (2006) registraron valores más altos de carbono en la fracción lábil de la materia orgánica del suelo (la parte más sensible a cambios en el manejo) a medida que se intensificó el pastoreo.

En los sistemas con bajos tiempos de permanencia, la posibilidad de riego inmediato a la salida de los animales permite una rápida y mejor incorporación de materia orgánica de restos vegetales, heces y orina al suelo antes de que ocurran pérdidas por exposición al sol y a la atmósfera (Agustinho *et al.* 1983; Drake y Oltjen 1994; Pinheiro Machado 2004). En este caso, el principal desafío del sistema pastoreo-riego reside en entregar la lámina de agua adecuada para el cultivo en el momento indicado, sincronizando los eventos de riego con la salida de los animales del potrero (Vallentine 1990; Kugler y Barbarossa 1997; Miñón *et al.* 2015).

La tasa de infiltración y retención del agua en el suelo está relacionada principalmente con la calidad y cantidad de poros que posee (Conti 1998) y pueden ser modificados por el pastoreo animal. La mayoría de los trabajos encontrados coinciden en que el pastoreo influye en al menos algunas propiedades físicas del suelo, tales como densidad aparente, velocidad de infiltración, estabilidad de agregados y distribución del tamaño de poros principalmente a través del pisoteo ejercido (Lobry de Bruyn y Kingston 1997; Drewry *et al.* 1999; Rodd *et al.* 1999). Sin embargo, existen discrepancias respecto a las características del pastoreo que alteran estas propiedades. De esta forma Pozzolo *et al.* (2006) atribuyeron menor impacto en la densidad aparente y resistencia a la penetración del suelo, a tiempos de permanencia reducidos y cargas instantáneas (número de animales por unidad de superficie) más altas, en contraposición a Donkor *et al.* (2002).

Sin embargo, existe cierto grado de consenso en que las propiedades físicas del suelo se ven más perjudicadas con altas intensidades de defoliación (Mapfumo *et al.* 1999; Denoia *et al.* 2000; da Silva *et al.* 2003), aunque la presencia y/o magnitud de los cambios dependerían de las características del ambiente (Warren *et al.* 1986; Alarcón V. *et al.* 2010).

En resumen, el tiempo de permanencia de los animales, la intensidad de defoliación del pastoreo y el pisoteo animal tienen efectos sobre la estructura y funcionamiento de la vegetación y en las características fisicoquímicas de los suelos, pudiendo afectar la dinámica del agua en este. Sin embargo, la forma en que se conjugan estos factores puede variar de acuerdo al ambiente y al manejo, determinando el comportamiento del agua y la pastura.

#### 1.4. Situación regional.

Los valles irrigados en la Patagonia ocupan menos del 1% del territorio de esta región y son considerados las zonas de mayor potencial productivo (Miñón *et al.* 2015). El Valle Inferior del Río Chubut (VIRCh), ubicado al noreste de la provincia homónima, es uno de los principales valles bajo riego de esta región y se caracteriza por contar con una amplia extensión de suelos con gran proporción de arcillas y altos tenores de sodio intercambiable y salinidad, produciendo pérdida de estructura y afectando la penetración del agua (Luque 1992). El cultivo más importante son las pasturas, que ocupan más de la mitad de la superficie productiva (MINAGRI 2014) y generalmente están asociadas a suelos clase 4 (Bureau of Reclamation 1963), haciendo de este valle una zona principalmente ganadera. Además de las limitaciones impuestas por estas condiciones, se observa una baja producción de este cultivo atribuible al deficiente manejo del pastoreo, el mal aprovechamiento del forraje (INTA 2012) y la aplicación de grandes láminas de agua pero muy espaciadas en el tiempo, con la consecuente presencia de pasturas degradadas. La producción media de materia seca en pasturas dominadas por gramíneas en esta región está en el orden de los 7.500 a 9000 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> (INTA 2014), mientras que valores superiores o

inferiores se pueden considerar producciones de alto y bajo rendimiento, respectivamente. En este sentido, la Estación Experimental Agropecuaria Chubut del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (EEA INTA Chubut), que es el organismo técnico referente en la zona, realizó un diagnóstico en el año 2015 donde identificó como necesario que la producción de forraje en base a pasturas en el VIRCh incorpore nuevas tecnologías para producir carne a bajo costo. En este documento se propone como alternativa la implementación de sistemas de pastoreo intensificados con tiempos cortos de permanencia del rodeo en la misma parcela y altas cargas instantáneas, con sistemas de riego acordes al movimiento de los animales en el potrero (Agustinho *et al.* 1983).

Adicionalmente, si bien en la actualidad este valle no cuenta con grandes problemas de abastecimiento de agua, la proyección de nuevas áreas bajo riego, la ocurrencia de años secos y el efecto del cambio climático con la consecuente disminución de la producción de agua en la cuenca del Río Chubut (Serra *et al.* 2000; Flaherty *et al.* 2015) y de la de los ríos de zonas áridas y semiáridas en general (FAO 2013; IPCC 2014), hace necesario un análisis prospectivo y la generación de acciones y líneas de investigación con el objetivo de gestionar exitosamente un escenario futuro de escasez de agua.

Por la relevancia que reviste el cultivo de pasturas en la región, implementar técnicas de manejo que permitan aumentar la producción de forraje, y en consecuencia la EUA, puede tener un impacto significativo tanto en la disponibilidad de agua para otros usos como para la economía regional. En este contexto, el manejo del pastoreo surge como una alternativa que puede tener efectos concretos en la producción de pasturas y en la conservación del agua y los suelos (Peden *et al.* 2007).

En este trabajo se comparó la EUA de una pastura representativa de la región bajo dos sistemas de pastoreo contrastantes, con diferente tiempo de permanencia y carga instantánea, desde un enfoque que tuvo en cuenta la evapotranspiración del cultivo y la productividad de la pastura evaluada. Así

mismo, también fueron evaluadas variables físico-químicas del suelo con el fin de explicar eventuales diferencias entre sistemas, y las condiciones climáticas para conocer el grado de incidencia en el cultivo.

## 1.5. Objetivos.

### 1.5.1. Objetivo general.

Generar información en relación a la eficiencia de uso del agua en pasturas bajo sistemas de pastoreo contrastantes, que pueda ser incorporada a procesos de desarrollos tecnológicos del riego aplicables a sistemas de producción ganaderos.

### 1.5.2 Objetivos específicos.

Objetivo específico 1: Comparar la eficiencia en el uso del agua de pasturas bajo dos sistemas de pastoreo que difieren en la carga ganadera instantánea y el tiempo de permanencia de los animales.

Objetivo específico 2: Establecer relaciones entre lo observado en el uso del agua por las pasturas con eventuales cambios en algunas propiedades fisicoquímicas del suelo, densidad de raíces y biomasa aérea de la pastura producidos bajo los distintos sistemas de pastoreo evaluados.

Objetivo específico 3: Evaluar la variación en el contenido de humedad del suelo y comparar el comportamiento hídrico del cultivo de pasturas bajo los dos sistemas de pastoreo evaluados.

## 1.6 Hipótesis.

Hipótesis 1: Las pasturas sometidas a pastoreo con alta carga instantánea y corto tiempo de permanencia realizan un uso más eficiente del agua que las sometidas a pastoreo con baja carga instantánea y mayor tiempo de permanencia.

Hipótesis 2: El pastoreo con mayor carga instantánea y corto tiempo de permanencia produce una mayor biomasa aérea y subterránea de la pastura y

modifica las propiedades fisicoquímicas del suelo, con respecto al pastoreo con baja carga instantánea y mayor tiempo de permanencia.

Hipótesis 3: Los eventuales cambios en las propiedades del suelo y la pastura descritos en la hipótesis 2 se relacionan con un aumento en la eficiencia en el uso del agua.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Caracterización de la zona.

#### 2.1.1. Ubicación geográfica.

El estudio se llevó a cabo en el Valle Inferior del Río Chubut (VIRCh). Este valle está ubicado en el noreste de la provincia homónima entre los paralelos 43° y 44° de latitud sur. En sentido este-oeste cuenta con una extensión longitudinal media de 90 km, mientras que el ancho varía de 5 a 8 km (Luque 1992). Los límites septentrionales y meridionales del valle están indicados por las bardas norte y sur (Laya 1981), que lo limitan de la meseta circundante.

#### 2.1.2. Características de los suelos.

Si bien este valle tiene una superficie de 48000 ha irrigables, las limitaciones fisicoquímicas de los suelos (Luque 1992) y las bajas eficiencias en la aplicación de agua (INTA 2012) reducen esta área a aproximadamente el 48%.

La distribución textural de los suelos es bastante heterogénea debido al origen aluvial y a los antiguos cursos irregulares del río (meandros), predominando los arcillosos y franco arcillosos con fuertes expresiones vérticas.

#### 2.1.3. Clima.

Según la clasificación de Köppen – Geiger (Strahler 1989) el clima en el VIRCh es árido-frío. El régimen pluviométrico no presenta una estacionalidad marcada, la dirección prevalente del viento es del sector O – SO con mayor intensidad y frecuencia en los meses de primavera y verano (Arbuniés de Mac Karthy 1994). El mes de enero, con una evapotranspiración media diaria de 6,26 mm/día es el que presenta mayores tasas de este parámetro. En la Tabla 2.1 se presentan datos climáticos para la serie 1972-2015, de la EEA INTA Chubut, predio ubicado en el VIRCh y en el que se desarrolló el ensayo para esta tesis (<http://anterior.inta.gov.ar/region/pas/sipas2/cmp/agromet/index.html?ShowListado=1&destaca=chubut#>). En esta tabla también se muestran los

datos climáticos correspondientes a la temporada de crecimiento de las pasturas perennes en la región (desde octubre hasta abril, inclusive).

Tabla 2.1: Valores de variables climáticas para la EEA INTA Chubut para la serie 1972-2015.

Variable	Media anual	Media Oct-Abr
Temperatura (°C)	13,3	17,2
Precipitación (mm)	189,1	114,8
Humedad relativa (%)	57	51,6
Evapotranspiración de referencia (mm/año; serie 1972-1990)	1247,2	999,7

## 2.2. Ensayo.

### 2.2.1. Ubicación del ensayo.

El estudio fue emplazado en un cuadro de la EEA INTA Chubut, ubicada en la localidad de Trelew (43° 16' 29.21"S - 65° 21' 34.97"O), sobre una pastura consociada dominada por festuca alta (*Festuca arundinacea* Schreb), con presencia de trébol blanco (*Trifolium repens*) y *Lotus tenuis*. Este cultivo se implantó en el año 2009 y fue destinado a pastoreo ovino con eventuales cortes mecánicos del forraje. Previo a la implementación de este ensayo el manejo del pastoreo y el riego fue errático, utilizando cargas animales y tiempos de permanencia variables y aplicando riegos de forma no planificada. El suelo es un Entisol Torrifuvent típico (Laya 1981), clase 3 std (Bureau of Reclamation 1963), franco arcilloso en su horizonte mas superficial (A1, 0-20 cm) y franco arcillo limoso en el horizonte II (20-50 cm; Godagnone *et al.* 1989). Este sitio fue sistematizado con fines de riego superficial en doce melgas sin desagüe, y transversalmente a estas y en la parte más alta se encuentra un canal que las provee de agua.

### 2.2.2. Diseño experimental.

El ensayo tiene una superficie aproximada de 9300 m<sup>2</sup>, y abarca 12 melgas iguales. Sobre esta superficie se instalaron dos tratamientos de pastoreo ubicados de forma completamente aleatorizada y adyacentes unos de otros, con tres repeticiones cada uno. Las unidades

experimentales se separaron longitudinalmente con alambrados de 3 hilos (Fig. 2.1). Los tratamientos se definieron en función del tiempo de permanencia de los animales en la parcela y con una misma intensidad de defoliación. Para el sistema de pastoreo frontal (PF) cada unidad experimental abarcó una única melga dentro de la cual se definió una parcela. En esta parcela, el tiempo de permanencia de los animales fue de 1 ó 2 días y el tamaño de la misma se ajustó mediante redes plásticas de forma tal que los animales consumieran el forraje disponible en ese período. En el sistema de pastoreo rotativo (PR), cada unidad experimental abarcó tres melgas y también se definieron parcelas. El tiempo de permanencia en la parcela fue de 6 a 8 días y el tamaño de la misma se ajustó de forma tal que los animales consumieran el forraje disponible en ese período (Fig. 2.1).



Figura 2.1: Distribución de melgas y tratamientos. PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo. Las líneas negras indican divisiones entre unidades experimentales con estructuras fijas (alambrados).

Fuente: Google Earth, editada con QGIS

Previo al inicio del ensayo y para evitar fuentes de variación debidas a eventuales diferencias en la estructura de las pasturas, se identificaron y definieron sectores de muestreo dentro de cada unidad experimental con similar composición y cobertura vegetal (Fig. 2.2). Para esto, se dividió el área de cada melga en rectángulos de aproximadamente 10 m x 8 m y

se realizó una estimación visual del porcentaje de cobertura vegetal total y específica. Una vez caracterizados todos los sectores se eligieron los de mayor cobertura y valor forrajero.

N° de melga											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Tratamientos y número de repetición											
PF 1	PR 1			PR 2			PF 2	PF 3	PR 3		
0,65	0,75	0,26	0,14	0,46	0,33	0,42	0,24	0,68	0,29	0,56	0
0,70	0,85	0,47	0,28	0,47	0,50	0,78	0,66	0,97	0,84	0,95	0
0,60	0,88	0,26	0,85	0,64	0,60	0,68	0,68	0,93	0,82	0,92	0
0,75	0,93	0,48	0,77	0,58	0,66	0,82	0,95	0,95	0,76	0,95	0
0,90	0,95	0,85	0,71	0,79	0,84	0,66	0,99	0,99	0,68	0,90	0
0,35	0,85	0,85	0,62	0,90	0,84	0,77	0,98	0,97	0,86	0,80	0
0,90	0,85	0,72	0,64	0,83	0,95	0,73	0,86	0,71	0,35	0,50	0
0,47	0,74	0,34	0,15	0,57	0,82	0,27	0,05	0,05	0,09	0	0
CANAL											

Figura 2.2: Sectores de muestreo previamente definidos para cada unidad experimental (cuadros grises). Los números contenidos en los cuadros indican la proporción de pastura útil.

Las parcelas se instalaron dentro de las unidades experimentales de forma tal de abarcar los sectores de muestreo previamente definidos (Fig. 2.3). El tamaño longitudinal de las parcelas se ajustó con redes plásticas móviles en función de la cantidad de animales (y su consumo diario estimado), tiempo de permanencia estipulado para cada sistema de pastoreo y de la oferta forrajera de cada una al momento del ingreso de los animales (Fig. 2.4). Para los dos sistemas de pastoreo se consideró forraje disponible (u oferta forrajera) a la biomasa cosechable dejando un remanente de 4 cm de altura (Defossé *et al.* 2015). En los sectores de muestreo de cada unidad experimental se evaluó: oferta forrajera, biomasa de raíces, humedad del suelo, densidad aparente, conductividad hidráulica saturada, materia orgánica, nitrógeno total, pH y salinidad del suelo. Estas variables fueron determinadas a partir de la toma de muestras en los sectores de muestreo seleccionados, en puntos de extracción elegidos aleatoriamente y descartados para los siguientes muestreos de la misma temporada.

N° de melga											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Tratamientos y número de repetición											
PF 1	PR 1			PR 2			PF 2	PF 3	PR 3		
0,65	0,75	0,26	0,14	0,46	0,33	0,42	0,24	0,68	0,29	0,56	0
0,70	0,85	0,47	0,28	0,47	0,50	0,78	0,66	0,97	0,84	0,95	0
0,60	0,88	0,26	0,85	0,64	0,60	0,68	0,68	0,93	0,82	0,92	0
0,75	0,93	0,48	0,77	0,58	0,66	0,82	0,95	0,95	0,76	0,95	0
0,90	0,95	0,85	0,71	0,79	0,84	0,66	0,99	0,99	0,68	0,90	0
0,35	0,85	0,85	0,62	0,90	0,84	0,77	0,98	0,97	0,86	0,80	0
0,90	0,85	0,72	0,64	0,83	0,95	0,73	0,86	0,71	0,35	0,50	0
0,47	0,74	0,34	0,15	0,57	0,82	0,27	0,05	0,05	0,09	0	0
CANAL											

Figura 2.3: Esquema de las parcelas de pastoreo en las unidades experimentales. Las áreas sombreadas en verde indican, a modo de ejemplo, la superficie de pastoreo asignada.

Las diferencias en el tiempo de permanencia característica de los sistemas de pastoreo evaluados, sumado a que se utilizó el mismo rodeo de animales para pastorear ambos tratamientos determinaron que exista un desfase entre los momentos de riego, fechas de pastoreo y de muestreo de las variables. En todos los casos se tomaron las medidas necesarias para minimizar este desfase. En los dos tratamientos se implementó el riego inmediato a la salida de los animales y no hubo ocurrencia de precipitaciones mientras los animales estuvieron pastoreando las parcelas.

Los animales utilizados fueron ovinos adultos, con un peso promedio de 59 kg cada uno. El ensayo se llevó a cabo durante la temporada de crecimiento y producción de las pasturas en la región (octubre-abril) en los años 2015-2016 y 2016-2017.



Figura 2.4: Ajuste de las unidades experimentales con redes plásticas.

### 2.2.3. Frecuencia de pastoreo y esquema de muestreo.

Para definir las fechas de pastoreo óptimo para ambos tratamientos se utilizó como criterio orientativo el momento de aparición de la cuarta hoja de la gramínea dominante (*Festuca alta*), el cual es coincidente con el comienzo de la senescencia de la primera hoja. Este momento se determinó usando el concepto de vida media foliar (VMF; Colabelli *et al.* 1998), y calculado mediante la sumatoria térmica (ST; Ec. 2.1). En el caso particular de la pastura utilizada predominaron variedades de festuca alta de hojas rústicas (obs. pers.), por lo que se consideró como momento óptimo para el pastoreo cuando la ST, calculada a partir del último aprovechamiento, alcanzó valores de 600-700 °C aproximadamente (Insúa *et al.* 2012).

$$ST = \sum(TMD - Tb) \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde:

ST: Sumatoria térmica (°C)

TMD: Temperatura media diaria

Tb: Temperatura base de crecimiento (4°C)

Si bien la base para determinar el ingreso de los animales a la pastura fue el definido anteriormente, hubo que conciliar este criterio con la disponibilidad de animales y con la humedad adecuada del suelo, tanto para no ingresar con excesiva humedad edáfica como para que a la salida de los animales se pudiera realizar un riego. Por otro lado, en los casos en

que se observó que el cultivo comenzaba a iniciar su fase reproductiva, se adelantó la fecha de pastoreo.

A los fines de describir la estructura temporal del muestreo realizado, en la figura 2.5 se indican las fechas aproximadas de los eventos de pastoreo para los tratamientos (las fechas exactas se muestran en la sección 3.1). Los períodos entre pastoreos son definidos como el lapso que ocurre entre pastoreos sucesivos. Las temporadas fueron definidas en función del inicio y final de cada ciclo de crecimiento del cultivo.

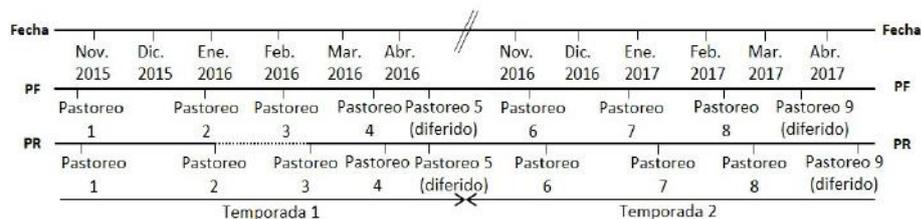


Figura 2.5: Fechas aproximadas de pastoreo para cada sistema de pastoreo. La línea de puntos entre el pastoreo 2 y 3 representa, a modo de ejemplo, al período 3 del PR. PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo

#### 2.2.4. Asignación de la superficie de pastoreo.

La cantidad de materia seca de forraje diario asignado a cada animal fue el 3% de su peso vivo, ajustando la superficie de pastoreo para cumplir con los tiempos de permanencia requeridos para cada tratamiento y buscando que los animales dejen un remanente de 4 cm de altura. En los casos en que fue necesario, la superficie asignada inicialmente se ajustó en el transcurso del pastoreo para que el forraje sea consumido adecuadamente. Ya que las unidades experimentales no fueron consumidas en forma completa (solo se pastorean las parcelas), luego del pastoreo se realizó un corte de forraje con maquinaria agrícola para homogeneizar toda la superficie.

#### 2.2.5. Determinación de los parámetros de riego.

A fin de poder implementar un riego apropiado para la pastura bajo ensayo se evaluaron los parámetros de: profundidad de humedecimiento necesaria (2.2.5.1), retención hídrica del suelo (2.2.5.2), humedad utilizable y humedad fácilmente utilizable (2.2.5.3), momento oportuno

de riego (2.2.5.4) y las características del método de riego seleccionado (2.2.5.5).

#### 2.2.5.1. Determinación de la profundidad de humedecimiento necesaria.

Se realizaron tres mediciones de densidad de raíces en función de la profundidad del suelo en dos sectores distintos del cultivo, a través del conteo *in situ* de las mismas. Esta medición se realizó en las paredes verticales de dos calicatas, dividiendo el perfil en franjas de 5 cm de alto por 14,5 cm de ancho y contabilizando las raíces emergentes de las paredes en esa área (Böhm 1979; Fig. 2.6).



Figura 2.6: Metodología utilizada para el conteo de raíces.

La profundidad de humedecimiento se definió como aquella que acumulara un porcentaje mayor o igual al 90% de las raíces observadas en todas las muestras, siendo 40 cm la profundidad que cumplió con esta condición (Tabla 2.2).

#### 2.2.5.2 Retención hídrica del suelo.

Se determinaron los puntos de retención hídrica correspondiente a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) por el método de Richards (Richards 1948) a -33 kPa y a -1500 kPa respectivamente. Se realizó una muestra compuesta de cada unidad experimental, a una profundidad equivalente a la de humedecimiento necesaria (40 cm). Los valores medios de contenido gravimétrico de agua fueron de 49,7% para CC y de 28,3% para PMP.

Tabla 2.2: Distribución de las raíces en el perfil del suelo.

Profundidad (cm)	% acumulado de raíces					
	Melga 5 muestra 1	Melga 5 muestra 2	Melga 5 muestra 3	Melga 11 muestra 1	Melga 11 muestra 2	Melga 11 muestra 3
5	26,6	23,9	43,5	21,8	24,4	32,7
10	44,1	43,8	65,2	41,5	43,2	51,6
15	55,8	60,1	75,5	56,2	55,7	62,2
20	65,8	72,9	80,4	71,3	66,2	73,5
25	75,3	80,1	85,9	77,7	76,0	79,3
30	81,1	87,3	88,6	83,1	82,2	87,3
35	86,4	93,1	91,8	88,3	89,2	92,7
40	91,1	97,4	95,1	94,0	94,4	97,1
45	94,7	98,4	97,8	95,4	98,6	98,9
50	96,8	100,0	98,4	98,3	100,0	100,0
55	99,5	100,0	99,5	99,1	100,0	100,0
60	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

### 2.2.5.3 Humedad utilizable y humedad fácilmente utilizable.

Para calcular el contenido de humedad como lámina de agua entre los puntos de CC y PMP se utilizó la siguiente ecuación (Ferreira E. y Sellés Van Sch. 2013; Ec. 2.2).

$$HU = \left( \frac{WCC - WPM}{100} \right) * \frac{Dap}{Da} * Profundidad \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde:

HU = Humedad utilizable (mm)

WCC = Contenido gravimétrico de agua a CC (%) = 49,7%

WPMP = Contenido gravimétrico de agua a PMP (%) = 28,3 %

Dap = Densidad aparente del suelo ( $\text{g/cm}^3$ ) = 1,17  $\text{g/cm}^3$

Da = Densidad del agua = 1  $\text{g/cm}^3$

Profundidad = Profundidad efectiva de raíces o de humedecimiento (mm)  
= 400 mm

La densidad aparente se estimó a partir de tres muestras en dos sitios distintos del cultivo entre los 0-20 cm y 20-40 cm de profundidad por el método del cilindro (Blake y Hartge 1986). Los valores medios fueron 1,19  $\text{g/cm}^3$  para el horizonte superficial y 1,14  $\text{g/cm}^3$  para el más

profundo, para la ecuación 2.2 se utilizó el promedio de ambos horizontes.

La humedad utilizable tuvo un valor de 100,1 mm.

Para determinar la humedad fácilmente utilizable (HFU), definida como la parte de la humedad utilizable que puede ser fácilmente extraída por la vegetación (Israelsen y Hansen 1965) o sin llegar al estrés hídrico (Allen *et al.* 2006), se utilizó la ecuación 2.3.

$$HFU = HU * p \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde HFU es la humedad fácilmente utilizable y “p” es la fracción del total de la humedad utilizable que puede ser agotada en la zona radicular antes de que la vegetación presente estrés hídrico. Para este cultivo se utilizó el valor de 0,6 (Greenwood *et al.* 2009), resultando en una HFU de 60,1 mm.

#### 2.2.5.4. Momento de riego.

En ambos tratamientos, para incorporar lo antes posible las deyecciones del ganado al suelo y promover una rápida recuperación de la pastura, se adoptó como criterio regar al finalizar el pastoreo de cada tratamiento (Agustinho *et al.* 1983 y Crespi *et al.* 2001). Para la determinación de los demás momentos de riego, se estimó la HFU remanente a partir del descuento de la evapotranspiración de referencia (Allen *et al.* 2006) al valor de humedad alcanzado después del riego correspondiente, realizando el humedecimiento siguiente cuando la HFU remanente estimada se acercó a cero.

Sin embargo, en algunas ocasiones la realización del riego en el momento oportuno presentó inconvenientes debido a que hubo que conciliarla con el pastoreo de los animales y con la disponibilidad de agua en la red. En algunos casos (fines de noviembre de 2015 y mediados de enero de 2016), por estas razones no fue posible realizar el riego antes de que el contenido de humedad del suelo estuviera por debajo del límite establecido.

### 2.2.5.5 Método de riego

El riego se realizó con sifones de 110 mm de diámetro de polipropileno (Figura 2.7) y se estimó el caudal erogado por los mismos con la ecuación 2.4 (Departamento de agricultura de los Estados Unidos de América 1972).

$$Q = C * A * \sqrt{2gh} \quad \text{Ec. 2.4}$$

Donde:

Q = descarga (m<sup>3</sup>/s)

C = coeficiente de descarga para el tubo. Valor calculado 0,83 (Ec. 2.5)

A = área del tubo (m<sup>2</sup>)

g = aceleración de la gravedad = 9,81 m/s<sup>2</sup>

h = carga de operación (m)

El coeficiente de descarga para el tubo (C), se estimó a partir de la ecuación 2.5 (Departamento de agricultura de los Estados Unidos de América 1972).

$$C = C_o \sqrt{\frac{d^{4/3}}{5,087 n^2 * C_o^2 L + d^{4/3}}} \quad \text{Ec. 2.5}$$

Donde:

C<sub>o</sub> = coeficiente de descarga para el tubo de entrada = 0,83 aproximadamente (Departamento de agricultura de los Estados Unidos de América 1972).

d = diámetro interior del tubo en pulgadas = 4,06 pulgadas.

n = coeficiente de rugosidad = 0,007 (Tarjuelo Martín Benito 2005).

L = longitud del tubo en pies = 5,9 pies.

Con una h de 0,35 m, el caudal entregado fue de 18 l/s aproximadamente. Para reducir la descarga y lograr una distribución más uniforme del agua de riego se utilizó una tapa de plástico de PVC perforada y encastrada en

el final del sifón, midiéndose el caudal entregado través de un aforador sin cuello. Este fue de 8,75 l/s por sifón.

La lámina bruta promedio aplicada por riego fue de 94 mm, siendo el tiempo de riego de 140 minutos aproximadamente para el caudal más reducido.



Figura 2.7: Sifón de PVC de 110 mm de diámetro.

#### 2.2.5.6 Calidad del agua de riego

La conductividad eléctrica del agua del Río Chubut es 0,43 dS/m, la relación de adsorción de sodio (R.A.S) es 1,47 (Luque 1992) y el pH es 7,5.

### 2.3. Variables.

#### 2.3.1 Variables climáticas.

Se registraron los valores de las variables climáticas a partir de los datos suministrados por la estación meteorológica automática ubicada en la EEA INTA Chubut, de marca comercial Davies y modelo Vantage Pro 2. Se obtuvieron los valores diarios de temperatura media, evapotranspiración de referencia, radiación solar, velocidad media del viento y de la humedad relativa media. A partir de estos datos se calcularon para cada período: temperatura media diaria promedio (TM), evapotranspiración de referencia diaria promedio (Eto), radiación solar diaria promedio (Rs media), radiación solar acumulada (suma RS), velocidad media del viento diaria promedio (VV) y humedad relativa media diaria promedio (HR). Para el cálculo de estas se contabilizaron

sólo los días de cada período libre de pastoreo (sin animales consumiendo el forraje).

### 2.3.2. Eficiencia en el uso del agua.

La eficiencia en el uso del agua (EUA) se definió como el cociente entre la oferta forrajera (OF) y la evapotranspiración del cultivo (Etc) entre dos eventos de pastoreo (Ec. 2.6). Cuando se realizó esta relación con la sumatoria de la OF y de la Etc de toda la temporada, se denominó eficiencia en el uso del agua en la temporada (EUA temporada), cuando se calculó con la sumatoria de las dos temporadas se denominó eficiencia en el uso del agua total (EUA total), mientras que cuando se calculó solamente con los tres períodos iniciales de cada temporada, se denominó eficiencia en el uso del agua parcial (EUA parcial).

$$EUA = \frac{OF}{Etc} \quad \text{Ec. 2.6}$$

En donde:

EUA: Eficiencia en el uso del agua (kg/ha.mm)

OF: Oferta Forrajera (kg/ha)

Etc: Evapotranspiración del cultivo (mm)

Las variables componentes de esta relación se explican a continuación:

#### 2.3.2.1 Oferta Forrajera

La oferta forrajera (OF) estima el forraje disponible para los animales en un momento determinado y refleja la productividad de la pastura entre dos pastoreos sucesivos. Para la estimación, se realizaron 6 cortes con marco en parcelas de 0,125 m<sup>2</sup> por cada unidad experimental hasta una altura de 4 cm con respecto al suelo (Figura 2.8). La biomasa colectada en cada caso fue secada en estufa a 70°C hasta peso constante y utilizada para el cálculo de kilos de materia seca por hectárea (kg/ha).

La oferta forrajera de cada temporada (OF temporada) se calculó como la sumatoria de la OF en toda la temporada, mientras que la oferta forrajera total (OF total) representa la sumatoria del forraje producido en las dos temporadas.



Figura 2.8: Marco de 0,125 m<sup>2</sup> utilizado para delimitar las parcelas de corte para el muestreo de oferta forrajera.

### 2.3.2.2. Evapotranspiración del cultivo.

Para estimar la humedad del suelo se tomaron 3 muestras de suelo por unidad experimental a una profundidad de 40 cm desde la superficie con un barreno tipo helicoidal de 4 cm de diámetro. Estos datos se transformaron a porcentaje de humedad según el método gravimétrico (ecuación 2.7; Grassi 1998) y luego a lámina de agua según la ecuación 2.8.

$$W = \left( \frac{(Psh - Pss)}{Pss} \right) * 100 \quad \text{Ec. 2.7}$$

Donde:

W= contenido gravimétrico de agua en el suelo (%)

Psh= Peso de suelo húmedo (g)

Pss= Peso de suelo seco (g)

$$H = \left( \frac{W - WPM}{100} \right) * \frac{Dap}{Da} * Profundidad \quad \text{Ec. 2.8}$$

Donde

H = Lámina de agua en el suelo al momento del muestreo (mm)

W = Contenido gravimétrico de agua al momento del muestreo (%)

WPM = Contenido gravimétrico de agua a PMP = 28,3 %

Dap = Densidad aparente del suelo = 1,17 g/cm<sup>3</sup>

Da = Densidad del agua = 1 g/cm<sup>3</sup>

Profundidad = Profundidad efectiva de raíces o de humedecimiento = 400 mm

La evapotranspiración se calculó como la diferencia de lámina de agua almacenada en el suelo entre muestreos sucesivos.

Luego, para estimar la evapotranspiración del cultivo (Etc) en los distintos períodos, se realizó la sumatoria de tres subperíodos: lámina evapotranspirada desde el ingreso de los animales a la unidad experimental hasta el muestreo anterior al riego post pastoreo (a), lámina consumida entre eventos de riego dentro del período (b) y lámina consumida entre el último evento de riego y el reingreso de los animales al ensayo (c) (Fig. 2.9).

Para estimar la Etc los días comprendidos entre un riego y el muestreo de humedad posterior (las líneas punteada en la figura 2.9 representan estos períodos), se realizó un promedio diario de la Etc para el período comprendido entre el riego citado y el siguiente, asignándole este valor a cada uno de estos días. La contabilización de la precipitación se calculó sumando al período la precipitación efectiva, es decir, el 80% de la precipitación registrada, exceptuando los casos en los cuales la precipitación fue menor al 50% de la evapotranspiración en el día que se produjo la lluvia o cuando la precipitación ocurrió con suelo saturado (FAO 1978).

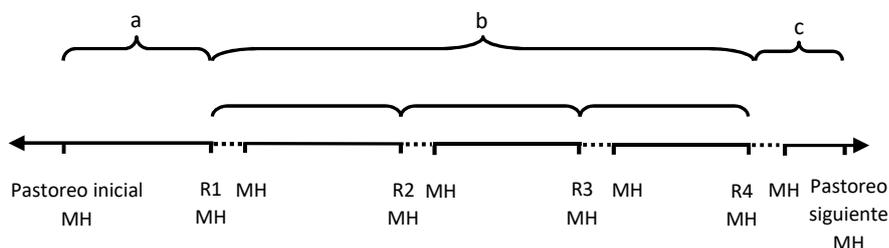


Figura 2.9: Esquema de muestreo para la construcción de la variable Etc para un período. Se indican los tres subperíodos que componen esta variable (a: ETC desde el ingreso de los animales a la unidad experimental hasta el muestreo anterior al riego post pastoreo, b: Etc entre eventos de riego dentro del período y c: Etc entre el último evento de riego y el reingreso de los animales al ensayo), los eventos de riego (R) y los muestreos de humedad edáfica (MH).

Para calcular la Etc del período 1 se siguió también la misma metodología de cálculo de Etc media diaria, debido a que no se cerró el ciclo con un muestreo de humedad en la fecha de pastoreo.

La evapotranspiración del cultivo de cada temporada (Etc temporada) se calculó como la sumatoria de la Etc en toda la temporada, mientras que la evapotranspiración del cultivo total (Etc total) representa la sumatoria de la lámina evapotranspirada por el cultivo en las dos temporadas.

### 2.3.3 Biomasa de raíces.

Para la estimación de biomasa de raíces (BR) se tomaron 3 muestras desde la superficie del suelo por unidad experimental con un cilindro de 6 cm de diámetro interno y 17 cm de altura. Las muestras fueron llevadas a laboratorio donde se separaron las raíces del suelo de forma manual (Figura 2.10). Luego, fueron secadas en estufa a 70 °C hasta peso constante y se registró este valor para cada muestra. Esta variable se expresó en kg/ha para los primeros 17 cm del suelo.



Figura 2.10: Porción de las raíces extraídas de una muestra (izquierda) e instrumental utilizado para la separación del suelo (derecha).

### 2.3.4. Variables físicas del suelo

#### 2.3.4.1. Densidad aparente.

Se tomaron 3 muestras por unidad experimental de la capa superficial de suelo (0-5 cm) por el método del cilindro (Blake y Hartge 1986), de 6 cm de diámetro interno y 5 cm de altura. Las muestras obtenidas se secaron en estufa a 105°C hasta peso constante, se pesaron y se calculó el cociente entre el peso y el volumen de la muestra seca.

### 2.3.4.2. Conductividad hidráulica saturada del suelo.

Para este estudio se utilizó un infiltrómetro de minidisco (IMD) de marca comercial Decagon Devices Inc., Pullman, Washington (Fig. 2.11).



Figura 2.11: Infiltrómetro de mini disco.

Se realizaron 3 determinaciones de la infiltración por unidad experimental, registrando cada 30 segundos los valores de volumen de agua remanente en la cámara graduada. Para asegurar un correcto contacto hidráulico entre el suelo y el disco, se agregó en esta zona una fina capa de arena de tamaño de partícula menor a 0,5 mm.

Se realizaron una serie de mediciones durante el ensayo de pastoreo, pero estas debieron ser descartadas por presentar un comportamiento anómalo. Luego de un análisis de estos datos y de las condiciones en las que se colectaron pudo identificarse el origen de las anomalías (Ver Anexo 1). Los datos colectados durante ese periodo debieron ser descartados y se procedió a repetir el muestreo por única vez en septiembre de 2017.

La ecuación utilizada para definir la velocidad de infiltración ( $I$ ) ocurrida entre lecturas fue la 2.9.

$$I = \frac{\left(\frac{V_i - V_f}{t_f - t_i}\right)}{\frac{\pi d^2}{4}} \quad \text{Ec. 2.9}$$

En donde:

$I$ : Velocidad de infiltración en un período determinado (cm/s)

$t_f$ : tiempo final del período (s)

$t_i$ : tiempo inicial del período (s)

$V_i$ : Volumen de agua en la probeta graduada en el  $t_i$  (cm<sup>3</sup>)

$V_f$ : Volumen de la probeta graduada en el  $t_f$  (cm<sup>3</sup>)

$d$ : Diámetro del disco del IMD (cm)

Para el cálculo de la  $K_{sat}$  se siguió el procedimiento efectuado por Rossi (2013). A partir de los datos de  $I$  registrados, se ajustó una curva exponencial (TableCurve 2D v.5.01, Systat Software Inc., San José, California) para estimar la velocidad de infiltración en un tiempo infinito para una tensión específica del IMD ( $I_i(h)$ ), con el fin de cumplir con el supuesto de estacionariedad que el modelo exige para el cálculo de la  $K_{sat}$ .  $I_i(h)$  es representado por el parámetro de la curva ajustada cuando el tiempo tiende a infinito, y se adoptó cuando el valor “p” del parámetro fue menor al nivel de significancia ( $\alpha=0.05$ ). Una vez obtenido este valor, se aplicó la ecuación de Wooding (Ec. 2.10; Wooding 1968) que determina la tasa de infiltración en flujo estacionario que ocurre debajo de una fuente circular somera. A partir de la ecuación 2.11 se obtuvo la  $K_{sat}$ .

$$I_i(h) = K_{sat} \left[ \left( 1 + \frac{4}{\alpha \pi r} \right) e^{(\alpha h)} \right] \quad \text{Ec. 2.10}$$

Donde:

$I_i(h)$ : Infiltración estimada en un tiempo infinito, en función de la tensión de la cámara del IMD (cm/s).

$K_{sat}$ : Conductividad hidráulica saturada del suelo (cm/s)

$\alpha$ : índice de distribución del tamaño de poros de van Genuchten (van Genuchten 1980, citado por Rossi 2013), se utilizó el coeficiente 0,01 para suelos arcillosos.

$r$ : radio del disco del IMD (cm)

$h$ : tensión específica de la cámara del IMD (cm)

$$Ksat = \left( \frac{Ii(h)}{\left[ \left( 1 + \frac{4}{\alpha r r} \right) e^{(\alpha h)} \right]} \right) * 3600 \quad \text{Ec. 2.11}$$

En donde el coeficiente 3600 es para adaptar unidades y Ksat queda expresado en (mm/h).

### 2.3.5. Variables químicas del suelo.

A continuación se muestran los parámetros de suelo analizados y el método de laboratorio realizado en cada caso. Para los análisis se tomó una muestra compuesta por tres submuestras de suelo por unidad experimental a una profundidad entre 0-17 cm. Previo al análisis de laboratorio, se les extrajeron las raíces y restos vegetales.

Materia orgánica (MO; %): En primer lugar se determinó el carbono oxidable por el método Walkley & Black. Para la estimación de MO se multiplicó el valor de carbono oxidable por el factor 1,724 (Carreira 2011).

Nitrógeno total (N; %): Se determinó según el método Kjeldahl (Carreira 2011)

Potencial Hidrógeno (pH): Se determinó según el método potenciométrico o electrométrico (Thompson y Troeh 1988).

Salinidad (CE): Se determinó mediante conductividad eléctrica por el método de extracción de sales solubles (Pérez y Kloster 2017). En el caso de esta variable el esquema de muestreo está incompleto debido a errores en la estimación original, por lo que los resultados incluyen solo las fechas para las que hubo material muestreado disponible.

### 2.3.6. Resumen de los momentos de muestreo para las variables.

La Tabla 2.3 indica, para cada variable, cuáles fueron los momentos en que se realizó el muestreo.

Tabla 2.3: Resumen de los momentos de muestreo para cada variable. OF: oferta forrajera; Etc: evapotranspiración del cultivo; BR: biomasa de raíces; Dap: densidad aparente del suelo; Ksat: conductividad hidráulica saturada del suelo.

Variable	Momento de muestreo
OF	Final de los períodos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9.
Etc	Antes y después (24-48 hs) de cada riego y antes del ingreso de los animales a la unidad experimental.
BR	Final de los períodos 1, 2, 3, 4 y 5.
Dap	Final de los períodos 1, 2, 3, 4 y 5.
Ksat	Final del período 3,4, 5 y el 28/9/2017 (ver Anexo 1).
Variables químicas	Final de los períodos 1, 2, 3, 4, 5 y 9.

#### 2.4. Análisis estadísticos

Para evaluar la significancia de las diferencias en la EUA, OF y BR entre las pasturas sometidas a diferentes sistemas de pastoreo (tratamientos), se realizaron análisis de la covarianza (ANCOVA) de medidas repetidas (Sokal y Rohlf 1984), donde se incluyó al sistema de pastoreo como factor principal y los períodos como el factor con medidas repetidas. La radiación solar acumulada (suma RS), sumatoria térmica (ST) y temperatura media (TM) fueron incluidas en este análisis como covariables para dar cuenta de eventuales diferencias entre tratamientos debido al desfase temporal descrito en la sección 2.2.2, bajo el supuesto de que pueden afectar el crecimiento y la evapotranspiración del cultivo. Dado que en estos análisis ninguna de las covariables resultó significativa, posteriormente se realizó un ANAVA de medidas repetidas con el mismo diseño de factores excluyendo las covariables. En el caso de las variables químicas del suelo y la densidad aparente, se realizaron ANAVA de medidas repetidas con los períodos de la primera temporada. Para estos análisis, se realizaron pruebas T para las comparaciones múltiples por pares con el fin de evaluar diferencias entre los períodos. En todos los casos se comprobaron los supuestos de homogeneidad de varianzas (prueba de Levene), normalidad y esfericidad (prueba de esfericidad de Mauchly). En los casos en que las comparaciones múltiples por pares no detectaron diferencias significativas entre pares de períodos siendo que el ANAVA para este factor si dio significativo, se utilizó el criterio gráfico de superposición de las barras de error estándar para determinar a qué periodo correspondían (Feisinger 2004). Cuando

no se cumplió con el supuesto de esfericidad se utilizó el estadístico de Huynh-Feldt (Norusis 1997). En todos los casos se evaluó la significancia de la interacción entre factores. Cuando el resultado de la interacción fue significativo se realizaron comparaciones múltiples en cada período con el fin de evaluar la significancia de las diferencias entre los niveles del factor principal (con el procedimiento de corrección de Bonferroni). Estos análisis se realizaron con el software estadístico SPSS. En el caso de la variable salinidad de suelo, debido al esquema de datos incompletos explicado en la sección 2.3.5., se ajustó un modelo lineal mixto con los sistemas de pastoreo, períodos y la interacción entre ambos como factores de efectos fijos y las unidades experimentales como factor de efecto aleatorio, con correlación constante entre los errores de la misma unidad experimental y una estructura exponencial de la varianza de los errores con los períodos como criterio de agrupamiento (Di Rienzo *et al.* 2011). Para determinar la significancia de las diferencias entre los sistemas de pastoreo y entre períodos y la significancia de la interacción se realizaron pruebas de Wald. Cuando el resultado de la interacción fue significativo se realizaron comparaciones múltiples en cada período con el fin de evaluar la significancia de las diferencias entre los niveles del factor sistema de pastoreo (con el procedimiento de corrección de Bonferroni). Estos análisis se realizaron con el software estadístico InfoStat con la interfase del programa “R”.

Con el fin de evaluar la significancia estadística de cambios en escalas temporales más amplias entre las pasturas sometidas a los diferentes sistemas de pastoreo, se realizaron Pruebas T para muestras independientes (Balzarini *et al.* 2012) para las variables resumen EUA total, EUA temporada, OF total, OF temporada y Etc temporada, con el software estadístico InfoStat. Previamente, se verificaron los supuestos de esta prueba. Este mismo análisis se realizó para la Etc temporada sólo en la primer temporada porque fue la única que tuvo la misma duración, y para Ksat debido a que los datos fueron tomados en una única fecha.

Para evaluar la significancia de posibles cambios netos (al inicio y al final del tratamiento) en las variables químicas del suelo y la Dap en las pasturas sometidas a cada sistema de pastoreo se realizaron Pruebas T

para observaciones pareadas (Balzarini *et al.* 2012) entre el período inicial (1) y final (5) de la primera temporada, y para el primer grupo de variables también se realizó entre los periodos finales de cada temporada (periodos 5 y 9), con el software estadístico InfoStat. Las mismas pruebas se realizaron para la EUA parcial y OF temporada con el objetivo de evaluar las diferencias entre temporadas para las pasturas sometidas a un mismo sistema de pastoreo.

Se realizaron análisis de correlación con el software Infostat, donde se utilizó el Coeficiente de Correlación de Pearson para evaluar el grado de incidencia en la EUA de las variables que la componen (OF y Etc). Adicionalmente, y con el objetivo de identificar las variables ambientales incidentes en las respuestas del sistema estudiado, se llevaron a cabo regresiones por pasos con el software SPSS para evaluar la significación de las relaciones entre las variables respuesta EUA, OF y Etc y las variables regresoras BR, Dap, N, CE, pH, MO, TM, HR, VV, Eto, RS media y suma de RS (Norusis 1997). Para la OF se excluyó a la Eto y para la Etc se incluyó también a la OF.

Para las pruebas de correlación y regresión por pasos se utilizó todo el conjunto de datos disponible (ambos sistemas de pastoreo y los períodos de ambas temporadas para la correlación y de la primera temporada, para la regresión).

En todos los análisis, el nivel de significancia utilizado fue del 5% ( $\alpha=0,05$ ).

### 3. RESULTADOS.

#### 3.1 Caracterización de los períodos.

Se observaron discrepancias entre tratamientos en algunas variables de manejo (duración de los periodos entre pastoreos, cantidad de riegos; Tabla 3.1) y de algunos valores medios o acumulados de variables climáticas (RS media, suma de RS, TM, ST; Tabla 3.2). Por este motivo, y como se describió en la sección 2.4, las variables climáticas identificadas previamente con una incidencia biológica potencialmente importante en las variables respuesta evaluadas en este trabajo fueron incluidas en los análisis estadísticos como covariables. Ninguna de estas covariables resultó estadísticamente significativa.

#### 3.2 Eficiencia en el uso del agua.

No se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la eficiencia en el uso del agua (EUA) entre las pasturas sometidas a diferentes sistemas de pastoreo ( $F=3,72$ ;  $p=0,13$ ). Sin embargo, difirió entre períodos ( $F=17,08$ ;  $p<0,01$ ). Esta variable mostró una tendencia descendente en la primer temporada, reflejado en los valores significativamente más bajos del período 5 respecto de los períodos 1 ( $p=0,03$ ), 3 ( $p=0,04$ ) y 4 ( $p=0,05$ ). En la segunda temporada, la tendencia fue similar (decreciente), aunque no se encontraron diferencias significativas entre los períodos de ésta. Difirieron también los períodos 3 y 8 ( $p=0,03$ ), y 5 y 7 ( $p=0,02$ ). No se encontró interacción significativa entre los factores período y sistema de pastoreo ( $F=2,09$ ;  $p=0,13$ ; Fig. 3.1).

Tabla 3.1: Caracterización de los períodos en función del manejo del riego y de los animales para las pasturas bajo los distintos sistemas de pastoreo PF: pastoreo frontal; PR pastoreo rotativo.

Tratamiento	PF									PR								
Temporada	1					2				1					2			
Período	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fecha de pastoreo o corte	21/11/15	29/12/15	2/2/16	14/3/16	20/4/16	9/11/16	29/12/16	7/2/17	20/3/17	23/11/15	4/1/16	12/2/16	24/3/16	20/4/16	17/11/16	9/1/17	27/2/17	20/4/17
Días entre pastoreos	22	38	35	41	37	19	49	41	41	24	42	39	41	27	27	53	49	52
Días de la temporada	173					150				173					181			
Evapotranspiración del cultivo (mm)	81	175	152	150	70	85	253	224	-	94	148	170	134	55	153	251	246	-
	626					561				601					650			
	1187									1250								
Humedad de suelo a la entrada de los animales (%)	35,5	34,4	38,7	37,6	39,7	39,7	39,7	41,2	-	33,1	35,79	42,4	42,5	39,6	38,8	40,8	42,2	-
Cantidad de riegos	1	3	3	3	2	2	5	5	-	1	3	3	3	1	3	5	5	-
Lámina aprox. por riego (mm)	94																	
Carga instantánea (animales.Ha <sup>-1</sup> )	1167	2417	2417	1500	-	2500	2042	2042	-	144	315	188	216	-	410	340	354	-
Sumatoria térmica (°C)	273	552	568	616	424	320	716	665	644	310	566	527	490	210	412	731	754	548
	2433					2345				2103					2445			
	4778									4548								

Tabla 3.2: Caracterización climática de los períodos para las pasturas bajo los distintos sistemas de pastoreo. PF: pastoreo frontal; PR pastoreo rotativo.

Tratamiento	PF									PR								
Temporada	1					2				1					2			
Período	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T° media diaria promedio (°C)	16,7	18,9	20,7	19,1	15,6	15,8	18,8	21	20,1	16,5,	19,8	20,8	18	14	15,6	19,9	22	15,9
	18,2					18,9				18,2					18,4			
	18,5									18,3								
Evapotranspiración de referencia diaria promedio (mm)	6,6	6,9	6,9	5,2	3,8	4,9	6,4	6,8	5,4	6,4	7,1	6,1	4,8	3,3	5	6,5	6,2	3,1
	5,9					5,9				5,5					5,2			
	5,9									5,4								
Radiación solar acumulada (W.m <sup>-2</sup> )	161059	276964	254386	232431	131448	152612	330436	274880	221597	173644	263468	208428	182553	66522	171120	312059	274904	162878
	1056289					979524				894615					920961			
	2035813									1815576								
Radiación solar diaria promedio (W.m <sup>-2</sup> )	7325	7486	7481	5669	3650	5450	6836	7048	5540	7235	7528	6723	5216	3168	5520	6784	6545	3541
	6322					6219				5974					5598			
	6276									5807								
Velocidad media del viento diaria promedio (km.h <sup>-1</sup> )	9	9,6	8,8	7,4	7,1	8,8	9,9	9,5	8,6	8,7	10	7,9	7	6,9	8,8	9,9	8,1	6,3
	8,4					9,2				8,1					8,3			
	8,7									8,2								
Humedad relativa media diaria promedio (%)	42,8	41,7	50	55,2	53,4	56,1	50	45,4	52,9	43,6	41,9	53,1	57,7	54	56,1	49,1	50,8	69,4
	48,6					51,1				50,1					56,4			
	49,7									52,9								

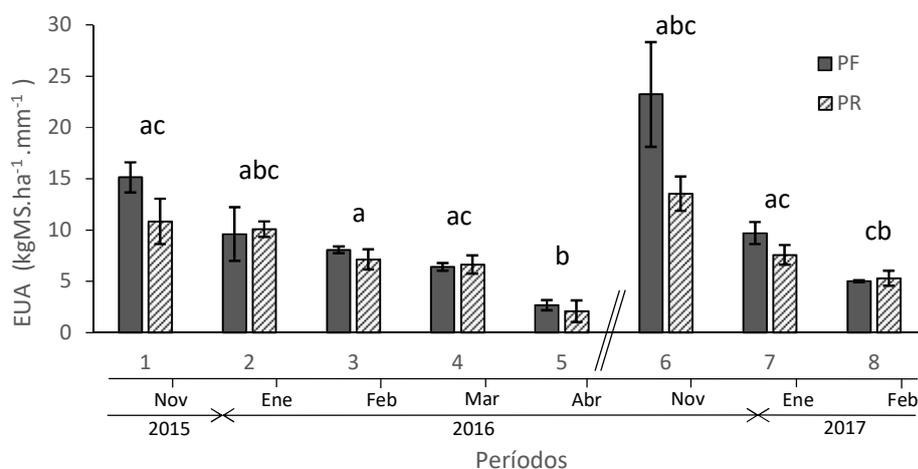


Figura 3.1: Valores medios de eficiencia en el uso del agua (EUA) para las pasturas bajo diferentes sistemas de pastoreo en los distintos períodos. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre períodos. PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo.

En la evaluación de la EUA total no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las pasturas sometidas a diferentes sistemas de pastoreo ( $T=1,93$ ;  $p=0,13$ ; Fig. 3.2).

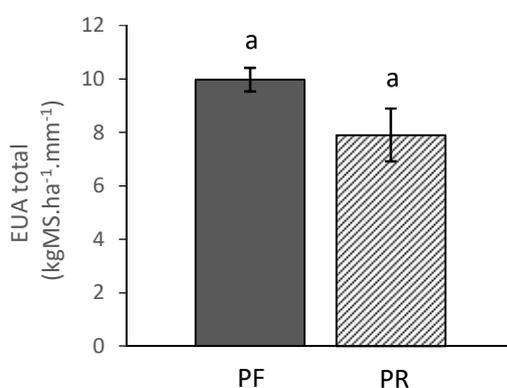


Figura 3.2: Valores medios de eficiencia en el uso del agua total (EUA total) para las pasturas bajo distintos sistemas de pastoreo. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas. PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo.

No se observaron diferencias estadísticamente significativas en la EUA temporada de las pasturas bajo distintos sistemas de pastoreo (temporada 1:  $T=0,99$ ;  $p=0,38$  y temporada 2:  $T=2,3$ ;  $p=0,08$ ; Fig. 3.3).

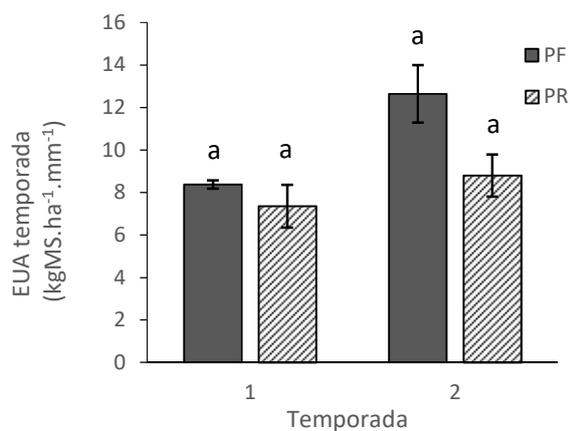


Figura 3.3: Valores medios de eficiencia en el uso del agua de cada temporada (EUA temporada) para las pasturas bajo distintos sistema de pastoreo. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre las pasturas sometidas a los distintos sistemas de pastoreo dentro de cada temporada. PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo.

No se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la variable EUA parcial entre temporadas para las pasturas sometidas a PF ( $T=-1,07$ ;  $p=0,4$ ) y a PR ( $T=1,81$ ;  $p=0,21$ ) (Fig. 3.4).

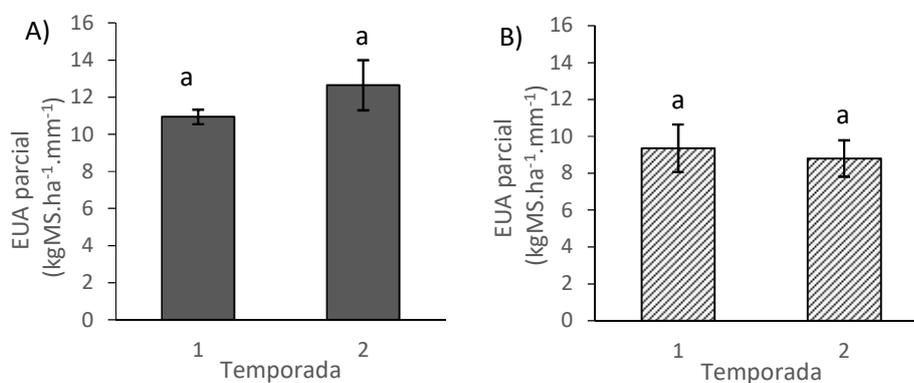


Figura 3.4: Valores medios de eficiencia en el uso del agua parcial (EUA parcial) de las pasturas bajo: A) pastoreo frontal (PF) y B) pastoreo rotativo (PR). Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas.

### 3.2.1. Oferta forrajera.

Se encontró interacción estadísticamente significativa entre los factores período y sistema de pastoreo ( $F=2,57$ ;  $p=0,03$ ). En el periodo 9 las pasturas

bajo PF mostraron valores significativamente más altos que bajo PR ( $p=0,01$ ), en el resto de los periodos no se observaron diferencias significativas entre las pasturas sometidas a los distintos sistemas de pastoreo. La tendencia temporal observada fue similar para ambos tratamientos y temporadas (Fig. 3.5).

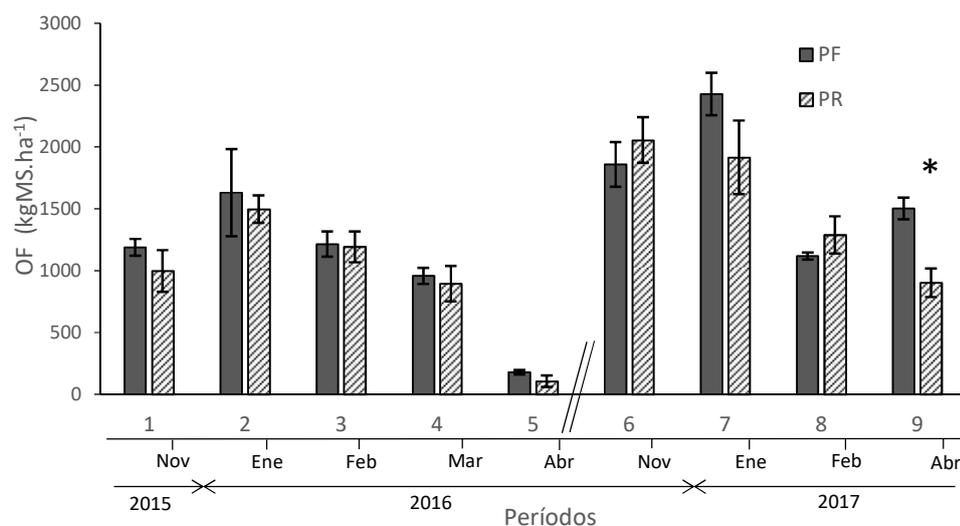


Figura 3.5: Valores medios de la oferta forrajera (OF) para las pasturas sometidas a los distintos sistemas de pastoreo en los distintos periodos. Las líneas verticales indican el error estándar. El asterisco indica el período donde se encontró una diferencia estadísticamente significativa entre sistemas de pastoreo. PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo.

No se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las pasturas sometidas a distintos sistemas de pastoreo en la OF total ( $T=0,87$ ;  $p=0,44$ ; Fig. 3.6).

Tampoco se observaron diferencias estadísticamente significativas en la OF temporada entre los sistemas de pastoreo (temporada 1:  $T=0,67$ ;  $p=0,54$  y temporada 2:  $T=1,04$ ;  $p=0,36$ ). Esta variable mostró valores significativamente mayores en la segunda temporada tanto para el PF ( $T=-8,43$ ;  $p=0,01$ ) como para el PR ( $T=-8,93$ ;  $p=0,01$ ) (Fig. 3.7).

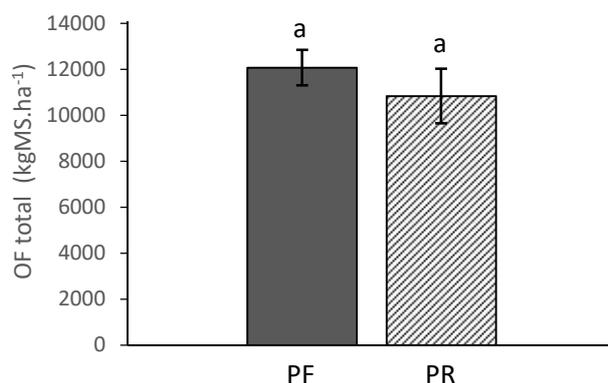


Figura 3.6: Valores medios de oferta forrajera total (OF total) para las pasturas bajo distintos sistemas de pastoreo. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas. PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo

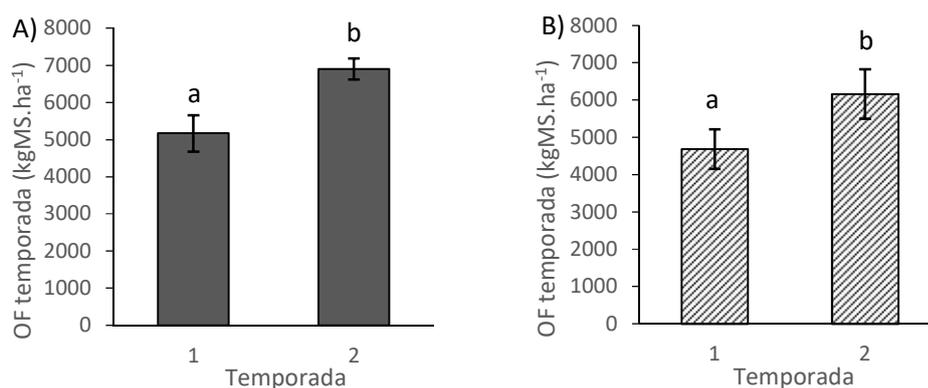


Figura 3.7: Valores medios de oferta forrajera del cultivo para cada temporada (OF temporada) en: A) pastoreo frontal (PF) y B) pastoreo rotativo (PR). Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas.

### 3.2.2 Evapotranspiración del cultivo

En la evaluación de la Etc temporada, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las pasturas sometidas a diferentes Sistemas de pastoreo en la primer temporada ( $T=0,87$ ;  $p=0,44$ ; Fig. 3.8).

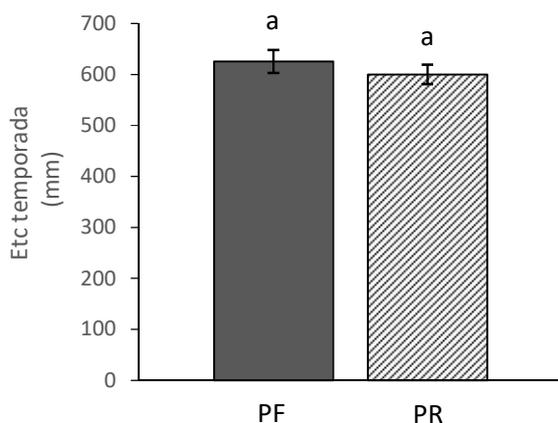


Figura 3.8: Valores medios de evapotranspiración del cultivo para la primera temporada (Etc temporada) para las pasturas bajo distintos sistemas de pastoreo. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas. PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo.

### 3.3 Biomasa de raíces.

La biomasa de raíces mostró valores significativamente mayores en las pasturas sometidas al PF que en las sometidas al PR ( $F=8,67$ ;  $p=0,01$ ; Fig. 3.9A).

Se encontraron diferencias significativas entre períodos ( $F=5,93$ ;  $p<0,01$ ). En el período 2, las pasturas mostraron valores significativamente más altos que en el período 1 ( $p<0,01$ ) y el 3 ( $p<0,01$ ), el resto de los periodos mostraron valores intermedios (Fig. 3.9B). No se encontró interacción significativa entre los factores período y sistema de pastoreo ( $F=1,45$ ;  $p=0,23$ ).

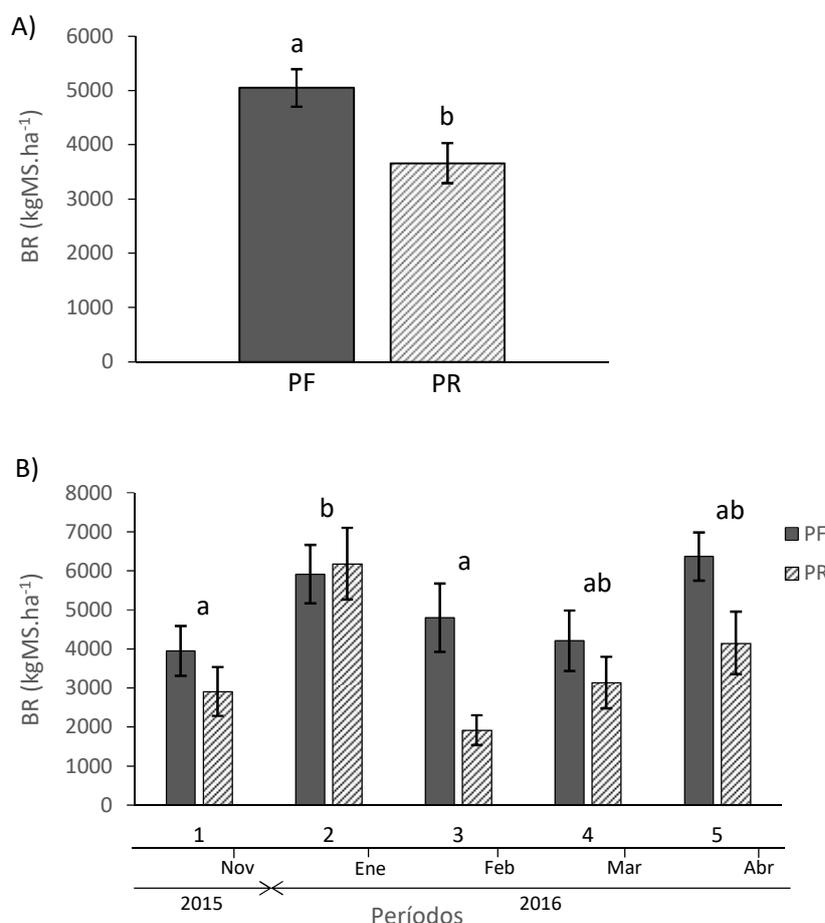


Figura 3.9: A- Valores medios de biomasa de raíces (BR) para las pasturas bajo diferentes sistemas de pastoreo promediando todos los periodos; B- Valores medios de biomasa de raíces para las pasturas sometidas a los distintos sistemas de pastoreo en los distintos periodos. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre periodos. PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo.

### 3.4 Variables físicas del suelo.

#### 3.4.1 Densidad aparente.

Se encontró una interacción estadísticamente significativa entre los factores sistema de pastoreo y periodos ( $F=3,06$ ;  $p=0,03$ ). En el período 4, las pasturas sometidas al PR mostraron valores significativamente más altos que las sometidas al PF ( $p<0,01$ ; Fig. 3.10).

En la comparación de las pasturas sometidas a cada sistema de pastoreo entre el período inicial y final de la primera temporada, se registró una

disminución significativa en las que estuvieron bajo el PR ( $T=6,10$ ;  $p<0,01$ ), mientras que no se observaron diferencias estadísticas en las que estuvieron bajo el PF ( $T=1,08$ ;  $p=0,31$ ) (Fig. 3.11).

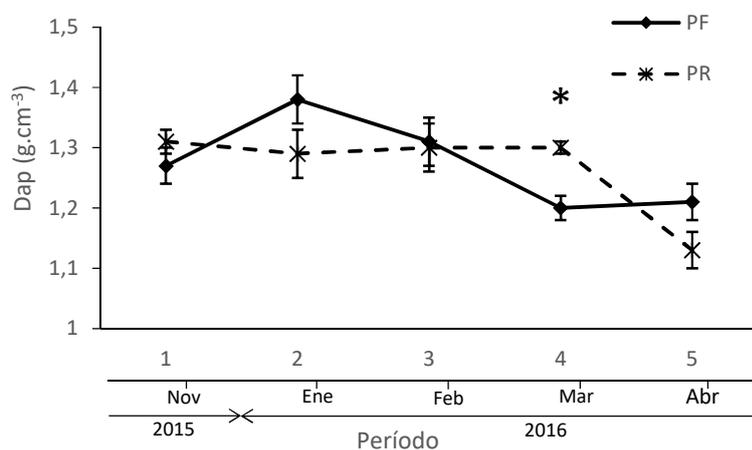


Figura 3.10: Evolución de la densidad aparente del suelo (Dap) para las pasturas sometidas a diferentes sistemas de pastoreo. Las líneas verticales indican el error estándar. El asterisco indica diferencias significativas del factor sistema de pastoreo en el período marcado. PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo.

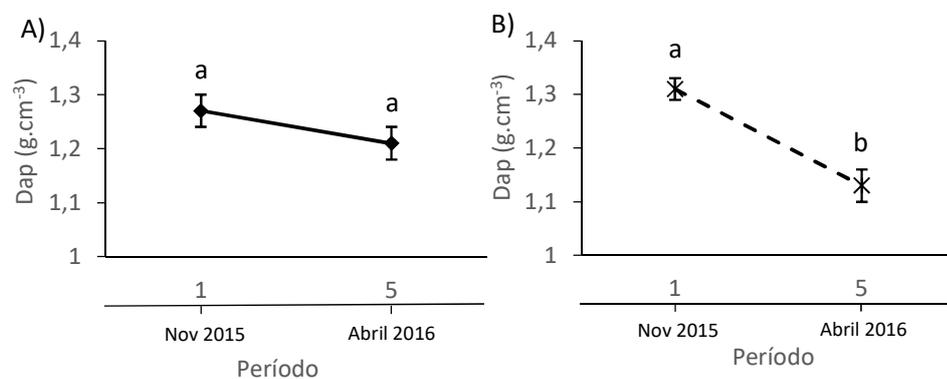


Figura 3.11: Evolución de la densidad aparente del suelo (Dap) entre el período inicial (1) y final (5) de la primera temporada para las pasturas sometidas a: A) pastoreo frontal y B) pastoreo rotativo. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas.

### 3.4.2 Conductividad hidráulica saturada del suelo

No se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la conductividad hidráulica saturada del suelo entre las pasturas bajo distintos sistemas de pastoreo ( $T=-0,45$ ;  $p=0,68$ ; Fig. 3.12).

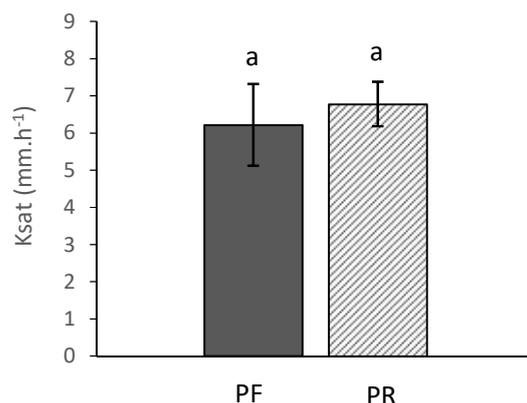


Figura 3.12: Valores medios de conductividad hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) para las pasturas sometidas a los distintos sistemas de pastoreo. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas. PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo.

## 3.5. Variables químicas del suelo.

### 3.5.1. Materia orgánica del suelo.

En el análisis de la materia orgánica del suelo en la primer temporada no se encontraron diferencias estadísticamente significativas para las pasturas bajo distintos sistemas de pastoreo ( $F=0,02$ ;  $p=0,88$ ) y tampoco para el factor período ( $F=2,85$ ;  $p=0,06$ ) ni en la interacción entre estos dos factores ( $F=0,61$ ;  $p=0,66$ ) (Fig. 3.13).

No se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre el período inicial y final de la primera temporada para las pasturas bajo cada sistema de pastoreo (para el PF,  $T=-2,58$ ;  $p=0,12$  y para el PR,  $T=-2$ ;  $p=0,18$ ; Fig. 3.14).

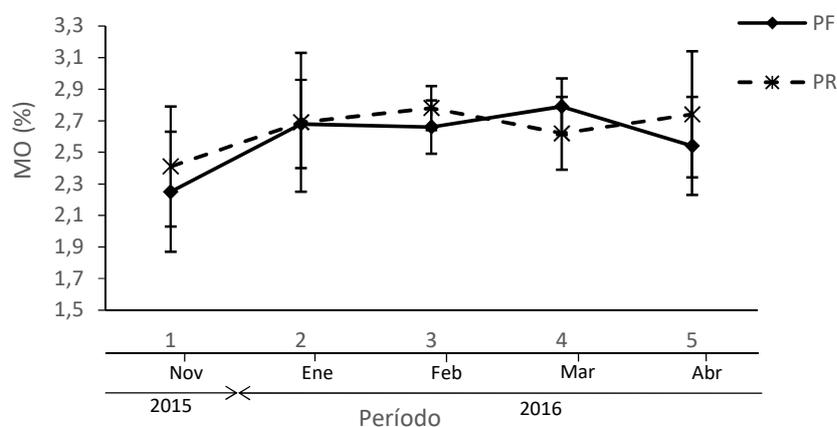


Figura 3.13: Evolución de la materia orgánica (MO) para las pasturas bajo diferentes sistemas de pastoreo. Las líneas verticales indican el error estándar. PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo.

No se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los períodos 5 y 9 para las pasturas bajo cada sistema de pastoreo (para el PF,  $T=-2,34$ ;  $p=0,14$  y para el PR,  $T=-1,1$ ;  $p=0,39$ ; Fig. 3.15). Sin embargo, tanto en esta evaluación como en la de los períodos 1 y 5, se observó una tendencia incremental en los contenidos de MO.

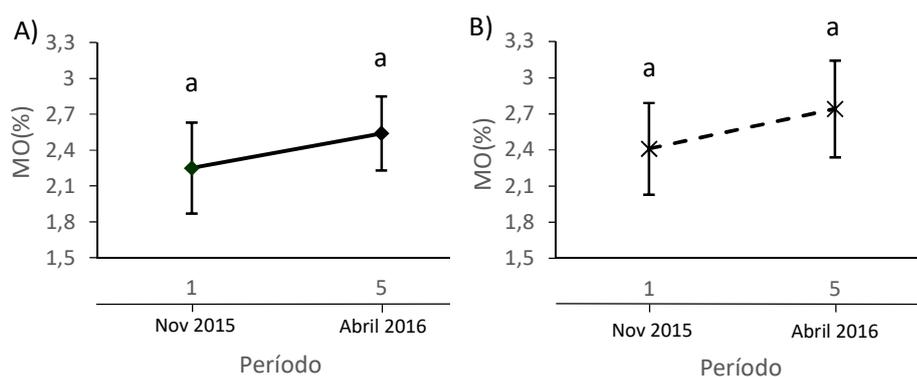


Figura 3.14: Evolución de la materia orgánica del suelo (MO) entre los períodos inicial (1) y final (5) de la primera temporada para las pasturas bajo los distintos sistemas de pastoreo, en A) pastoreo frontal y en B) pastoreo rotativo. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas.

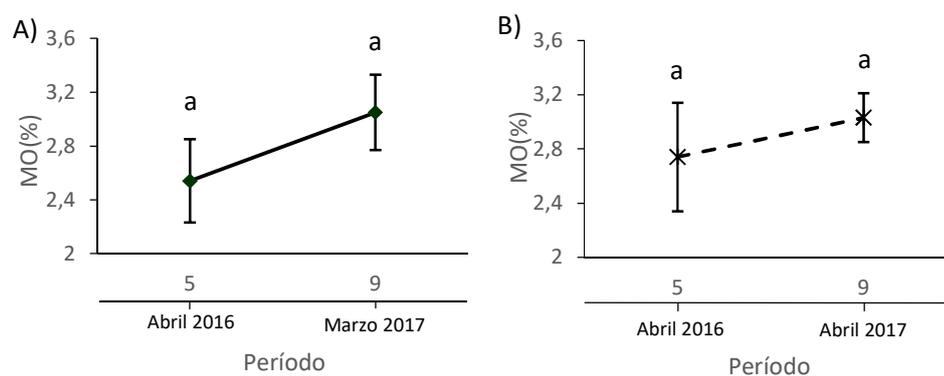


Figura 3.15: Evolución de la materia orgánica del suelo (MO) entre los periodos finales de cada temporada (5 y 9) para las pasturas bajo los distintos sistemas de pastoreo, en A) pastoreo frontal y en B) pastoreo rotativo. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas.

### 3.5.2. Nitrógeno total del suelo.

En el análisis del nitrógeno total del suelo (N) no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las pasturas sometidas a los distintos sistemas de pastoreo ( $F=0,78$ ;  $p=0,43$ ), sin embargo, se encontraron entre periodos ( $F=3,3$ ;  $p=0,04$ ; Fig. 3.16), siendo los tres centrales más altos que el periodo inicial y final. No se encontró interacción significativa entre los dos factores anteriores ( $F=1,68$ ;  $p=0,2$ ).

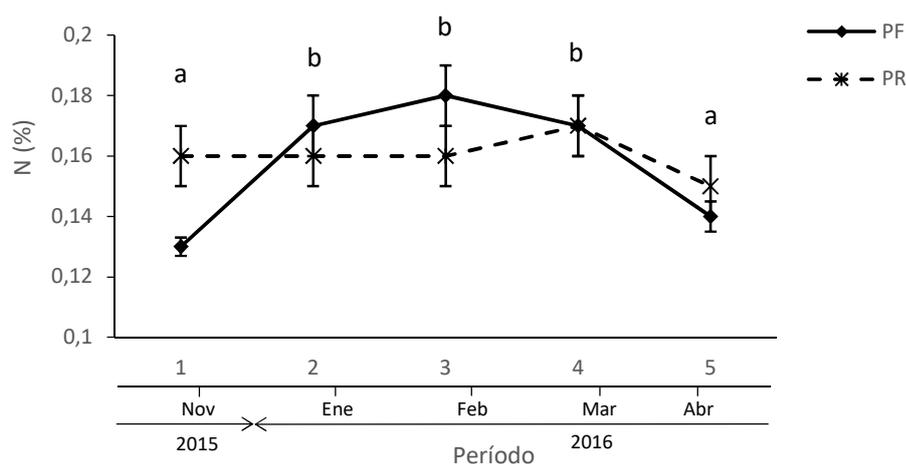


Figura 3.16: Evolución del Nitrógeno total del suelo (N) para las pasturas bajo distintos sistemas de pastoreo. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas entre periodos. PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo.

En la comparación entre el período inicial y final de la primera temporada para pasturas con distinto sistema de pastoreo no se encontraron diferencias estadísticamente significativas ni en el PF ( $T=-3,27$ ;  $p=0,08$ ) ni en el PR ( $T=2,14$ ;  $p=0,16$ ) (Fig. 3.17). Sin embargo, las tendencias temporales fueron opuestas, con una tendencia positiva en las pasturas bajo PF.

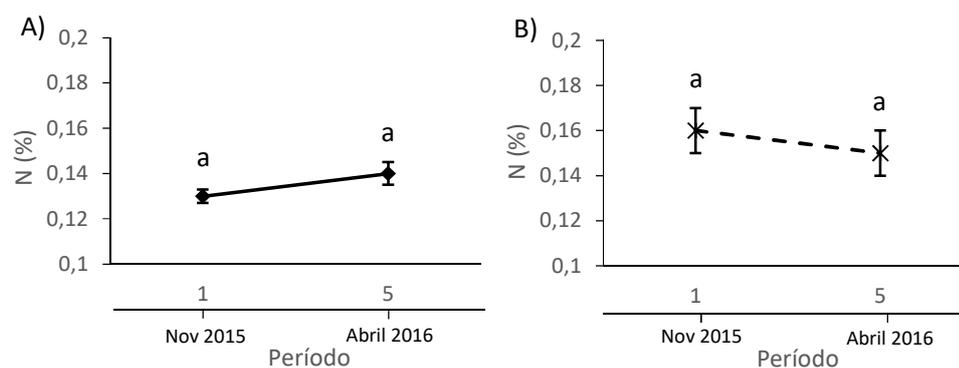


Figura 3.17: Evolución del Nitrógeno total del suelo (N) entre el período inicial (1) y final (5) para las pasturas bajo distintos sistemas de pastoreo, en A) pastoreo frontal y B) pastoreo rotativo. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas.

En la comparación entre los períodos finales de cada temporada no se encontraron diferencias estadísticamente significativas para las pasturas bajo distintos sistemas de pastoreo (para el PF,  $T=-1,29$ ;  $p=0,33$  y para el PR,  $T=-0,59$ ;  $p=0,61$ ) (Fig. 3.18).

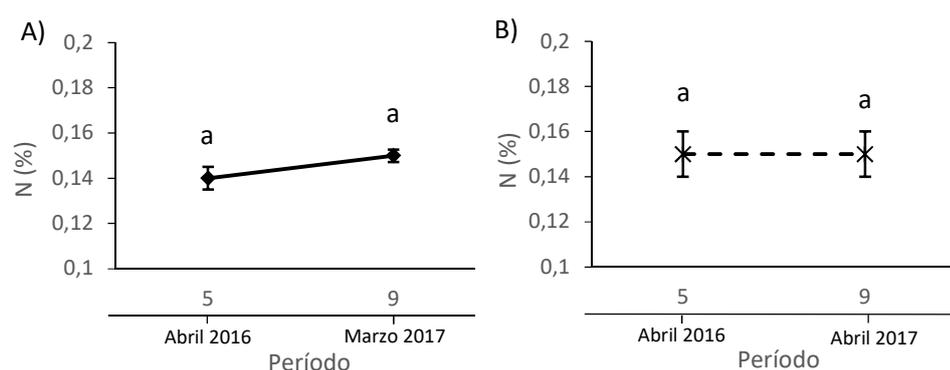


Figura 3.18: Evolución del nitrógeno total del suelo (N) entre los períodos finales de cada temporada (5 y 9) para las pasturas bajo los distintos sistemas de pastoreo, en A) pastoreo frontal y en B) pastoreo rotativo. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas.

### 3.5.3. pH del suelo.

En el análisis del pH del suelo de la primera temporada no se encontraron diferencias entre las pasturas sometidas a los distintos sistemas de pastoreo ( $F=0,18$ ;  $p=0,69$ ), sin embargo hubo diferencias entre periodos ( $F=9,88$ ;  $p<0,01$ ). Los periodos que difirieron fueron el 1 con respecto al 3 ( $p=0,04$ ).

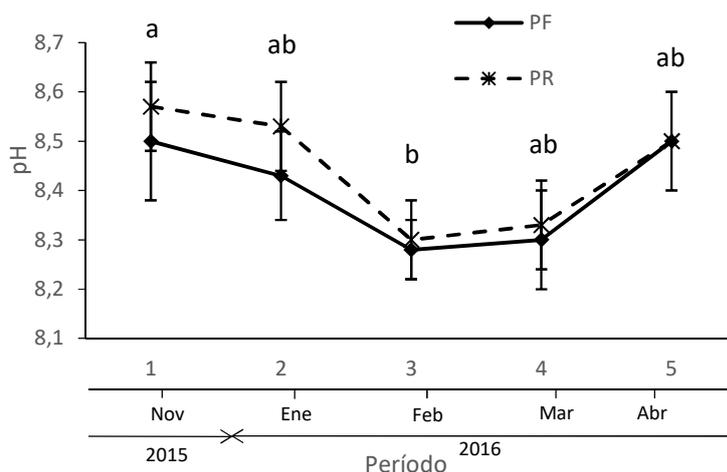


Figura 3.19: Evolución del pH del suelo (pH) en la primera temporada para las pasturas bajo los distintos sistemas de pastoreo. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre periodos. PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo.

Se observó una tendencia decreciente en los valores de pH a partir del período 2, con incrementos en el período final de la temporada (Fig. 3.19). No se encontró interacción significativa entre los dos factores anteriores ( $F=0,3$ ;  $p=0,87$ ).

No se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la comparación entre el período inicial y final de la primera temporada (Fig. 3.20), ni para el PF ( $T<0,01$ ;  $p>0,99$ ) ni para el PR ( $T=0,76$ ;  $p=0,53$ ).

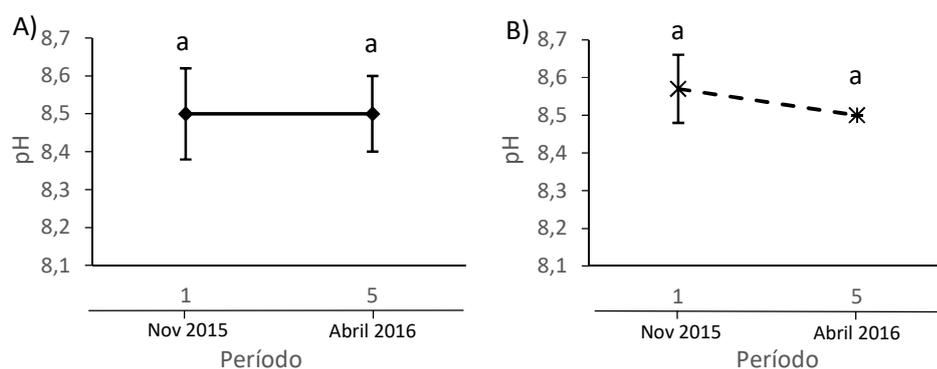


Figura 3.20: Evolución del pH del suelo (pH) entre el período inicial (1) y final (5) para las pasturas bajo distintos sistemas de pastoreo, en A) pastoreo frontal y B) pastoreo rotativo. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas

En la evaluación entre los período 5 y 9, para ambos sistemas de pastoreo se encontraron disminuciones significativas en los valores de pH (para el PF,  $T=8,2$ ;  $p=0,01$  y para el PR,  $T=5,91$ ;  $p=0,03$ ) (Fig. 3.21).

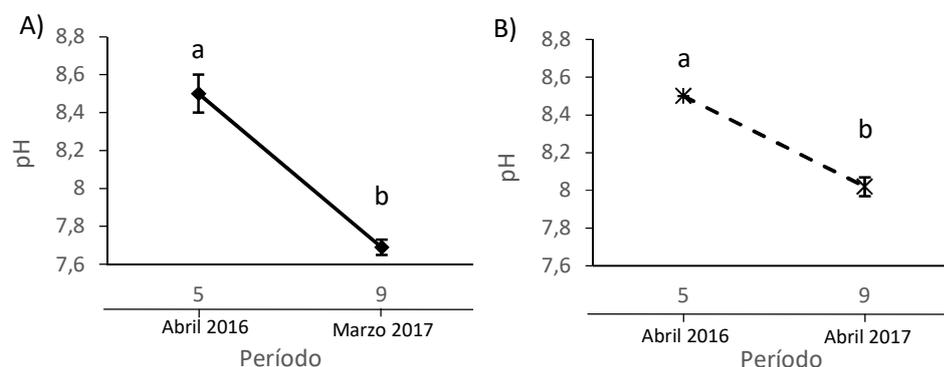


Figura 3.21: Evolución del pH del suelo (pH) entre los períodos finales de cada temporada (5 y 9) para las pasturas bajo los distintos sistemas de pastoreo, en A) pastoreo frontal y en B) pastoreo rotativo. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas.

#### 3.5.4. Salinidad del suelo

Se encontró una interacción estadísticamente significativa entre los factores sistema de pastoreo y períodos para la variable salinidad del suelo ( $F=4,35$ ;  $p=0,02$ ). En el período 1 y en el 4, las pasturas sometidas a PF mostraron valores significativamente más altos que las sometidas a PR (para el P1,  $p<0,01$  y para el P4,  $p=0,01$ ; Fig. 3.22).

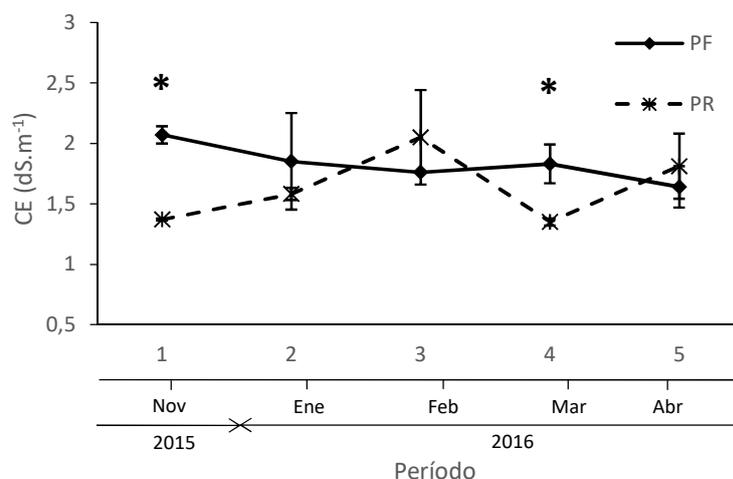


Figura 3.22: Evolución de la salinidad del suelo (CE) en las pasturas bajo cada sistema de pastoreo en la primer temporada. Las líneas verticales indican el error estándar. Períodos con asterisco indican diferencias significativas entre sistemas de pastoreo. PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo.

En el PF se observó una tendencia más regular a lo largo de la temporada respecto del PR; este último mostró un comportamiento con incrementos y disminuciones alternadas a lo largo de los períodos.

En la evaluación de esta variable para las pasturas sometidas a cada sistema de pastoreo entre el período inicial y final de la primer temporada (Fig. 3.23), no se encontraron diferencias significativas en el PF ( $T=1,86$ ;  $p=0,2$ ) ni en el PR ( $T=-1,56$ ;  $p=0,26$ ). Se observaron tendencias contrastantes en cada caso: en las pasturas sometidas a PF se observó una disminución en los valores de CE, mientras que en el caso de las sometidas a PR hubo un incremento de magnitud similar.

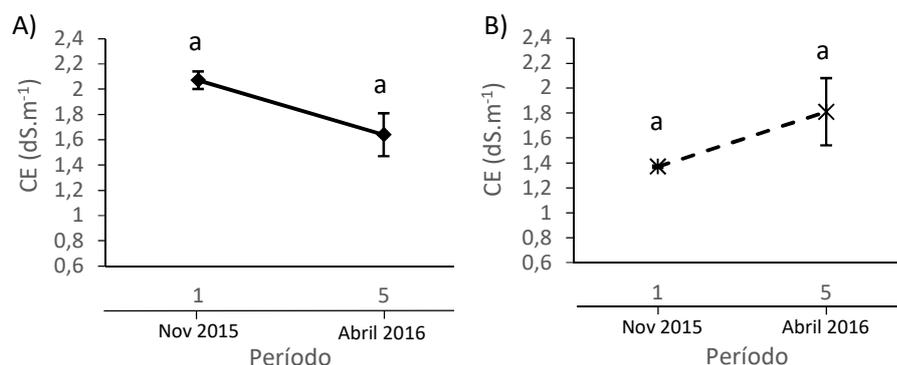


Figura 3.23: Valores medios de salinidad del suelo (CE) entre el período inicial (1) y final (5) para las pasturas bajo distintos sistemas de pastoreo, en A) pastoreo frontal y B) pastoreo rotativo. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas.

No se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los períodos finales de cada temporada para las pasturas bajo cada sistema de pastoreo (para el PF,  $T=0,91$ ;  $p=0,46$  y para el PR,  $T=1,10$ ;  $p=0,39$ ) (Fig. 3.24). En este caso, las tendencias fueron decrecientes para ambos sistemas de pastoreo

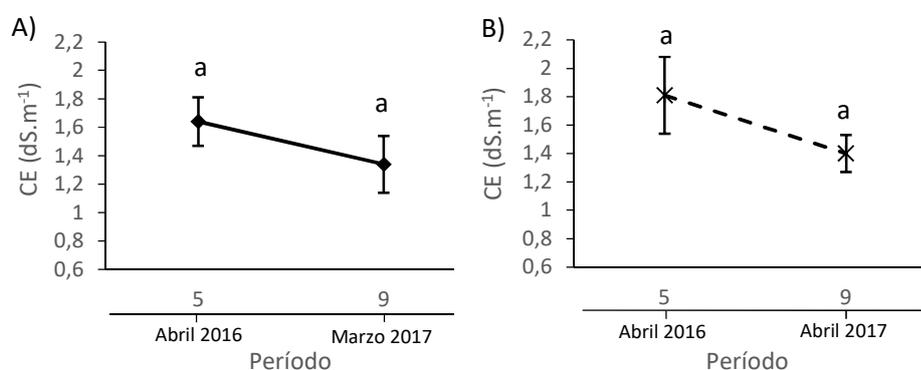


Figura 3.24: Valores medios de la salinidad del suelo (CE) entre los períodos finales de cada temporada (5 y 9) para las pasturas bajo los distintos sistemas de pastoreo, en A) pastoreo frontal y en B) pastoreo rotativo. Las líneas verticales indican el error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas.

### 3.6. Relaciones entre variables.

#### 3.6.1 Relación entre la EUA y las variables que la componen.

La EUA se correlacionó positiva y significativamente con la OF ( $r=0,6$ ;  $p<0,01$ ; Fig. 3.25), mientras que no se encontró relación significativa con la Etc ( $r=-0,22$ ;  $p=0,14$ ).

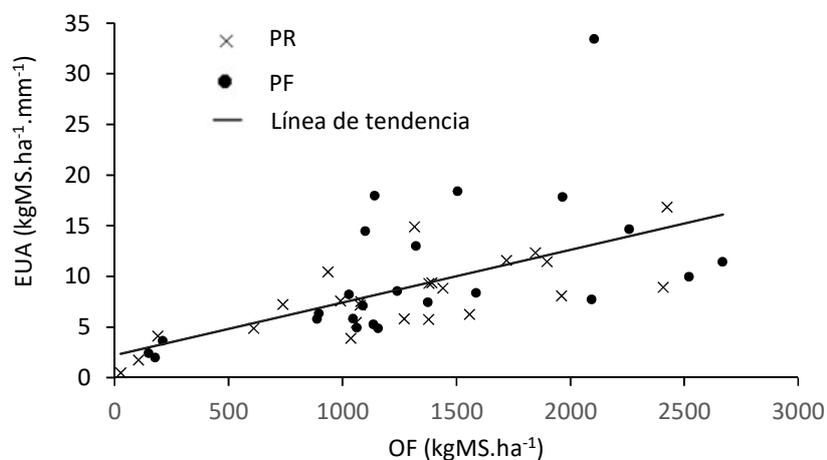


Figura 3.25: Relación entre la eficiencia en el uso del agua (EUA) y la oferta forrajera (OF). PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo.

### 3.6.2 Relación entre las variables ambientales y la EUA, OF y Etc.

La radiación solar diaria promedio (RS media) y la radiación solar acumulada (suma RS) explicaron el 70 % de la variación observada en la EUA (para Rs media,  $t=7,17$ ;  $p<0,01$  y para suma RS,  $t= -3,34$ ;  $p<0,01$ ) (Tabla 3.3 y Fig. 3.26). El resto de las variables no mostraron una relación significativa.

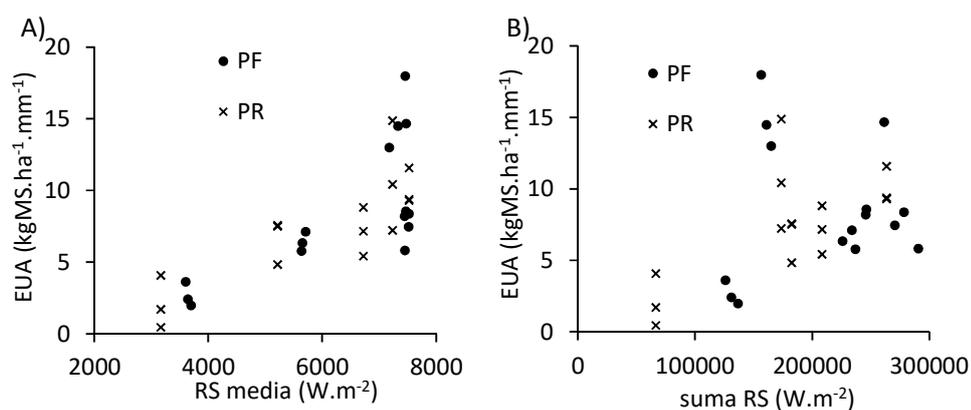


Figura 3.26: Relación entre la eficiencia en el uso del agua (EUA) y A) radiación solar diaria promedio (RS media) y B) radiación solar acumulada (suma RS). PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo.

La Rs media y la suma RS se relacionaron de forma positiva con la OF

( $t=4,21$ ;  $p<0,01$  y  $t=2,18$ ;  $p=0,04$ , respectivamente). Estas dos variables explicaron el 77 % de la variación observada (Tabla 3.3 y Fig. 3.27).

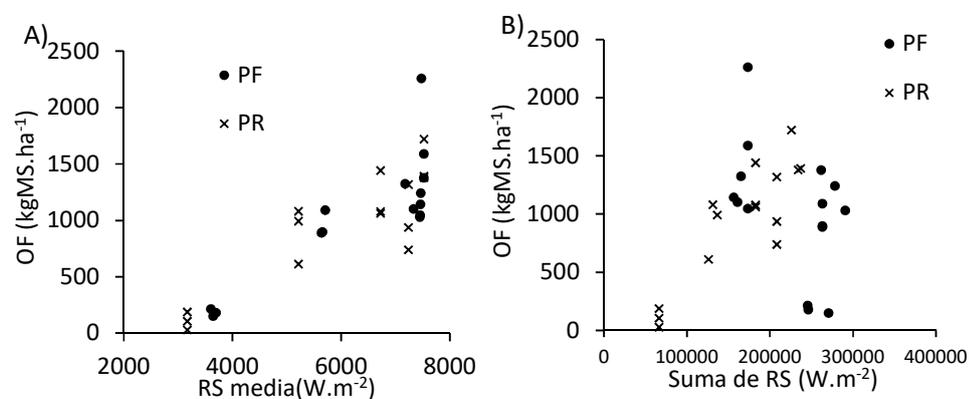


Figura 3.27: Relación entre la oferta forrajera (OF) y A) radiación solar diaria promedio (RS media) y B) radiación solar acumulada (suma RS). PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo.

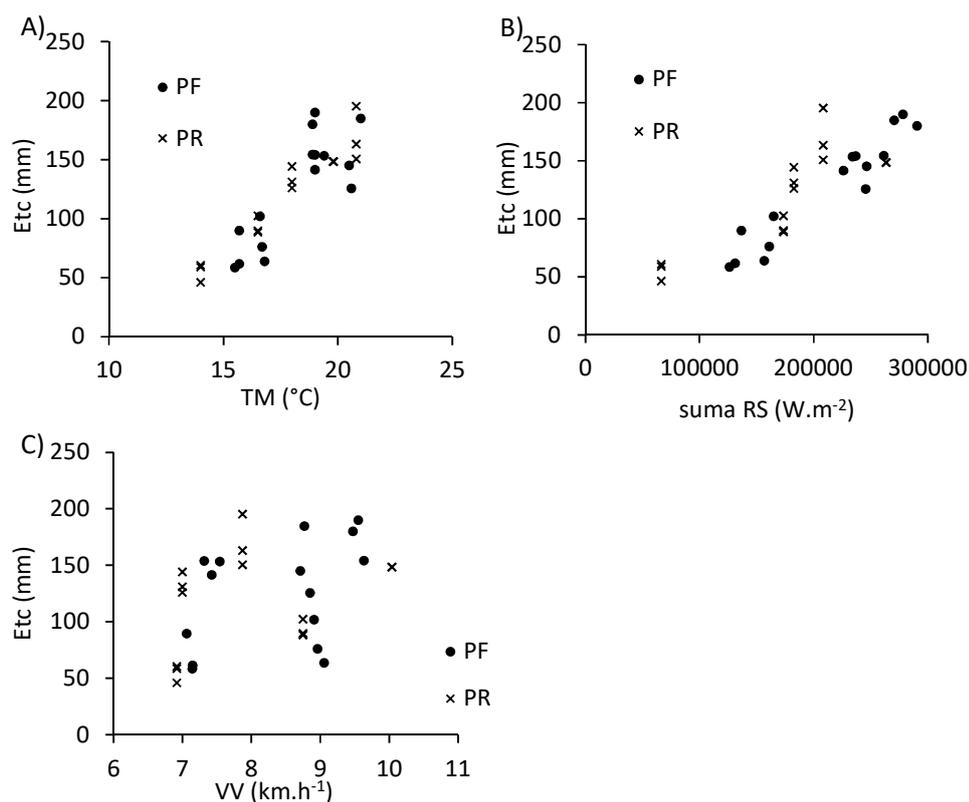


Figura 3.28: Valores observados de evapotranspiración del cultivo (Etc) en función de: A- la temperatura media diaria promedio (TM), B- la radiación solar acumulada (suma RS) y C- la velocidad del viento media diaria promedio (VV). PF: pastoreo frontal; PR: pastoreo rotativo.

La evapotranspiración del cultivo se relacionó positivamente con la temperatura media diaria promedio (TM) y la suma RS (para TM,  $t=2,19$ ;  $p<0,04$  y para suma RS,  $t=3,65$ ;  $p<0,01$ ), y negativamente con la velocidad del viento media diaria promedio (VV;  $t=-2,54$ ;  $p=0,02$ ). Estas tres variables explicaron el 86 % de la variación observada (Tabla 3.3 y Fig. 3.28).

Tabla 3.3: Parámetros de las regresiones por pasos significativas entre las variables ambientales y las variables medidas sobre las pasturas (EUA: eficiencia en el uso del agua; OF: oferta forrajera; Etc: evapotranspiración del cultivo; RS media: radiación solar diaria promedio; suma RS: radiación solar acumulada; VV: velocidad del viento media diaria promedio y TM: temperatura media diaria promedio).

Variable	Modelo	R <sup>2</sup>	Pendiente (b)			
			Rs media	suma RS	TM	VV
EUA	Rs media	0,58	0,02	-	-	-
	Rs media+suma RS	0,70	0,03	$3,7 \times 10^{-5}$	-	-
OF	Rs media	0,74	0,28	-	-	-
	Rs media+suma RS	0,77	0,20	0,03	-	-
Etc	TM	0,79	-	-	18,07	-
	TM+suma RS	0,83	-	$2,82 \times 10^{-4}$	10,83	-
	TM+suma RS+VV	0,86	-	$1 \times 10^{-3}$	7,44	-11,08

#### 4. DISCUSIÓN.

La ausencia de diferencias en la EUA entre las pasturas sometidas a los distintos sistemas de pastoreo indica que no se logró cambiar de forma diferencial la relación entre el agua transpirada y evaporada directamente del suelo (relación T/Etc) a través de una disminución en este último proceso, que según Arkley (1963), Cooper *et al.* (1983), Perry *et al.* (2009) y Sharma *et al.* (2015), es el camino más factible para mejorar este tipo de indicador, debido a que la EUA transpirada se mantendría constante en condiciones climáticas y en un cultivo determinado (Steduto *et al.* 2007).

En la segunda temporada, los valores de OF estuvieron en el orden de lo esperado para una pastura media en la zona (2000-2500 kgMS/ha por corte aproximadamente; INTA 2014), con aumentos significativos en ambos sistemas de pastoreo en la segunda temporada, aún con condiciones climáticas similares. Esto sugiere que el manejo animal y del recurso hídrico adecuado a través de intensidades de pastoreo (Vallentine 1990; Agnusdei 2012) y tiempos de descanso apropiados (Cangiano y Brizuela 2011) con eventos y láminas de riego acordes a las necesidades del cultivo (Agustinho *et al.* 1983; Drake y Oltjen 1994; Pinheiro Machado 2004) propician un aumento de la OF en el mediano/corto plazo. Sin embargo, el tiempo de permanencia pareció ser un elemento de manejo poco trascendente en relación a esta variable para las condiciones particulares del ensayo, aunque se puede esperar que la optimización del conjunto de factores de manejo descritos anteriormente (animal e hídrico) fueran más potentes en mejorar en el corto plazo la producción de forraje y diluyeran el impacto del tiempo de permanencia. Este resultado coincide con los encontrados por Kugler y Barbarossa (1997) en el Valle Inferior del Río Negro, aunque los tiempos de permanencia utilizados fueron menos contrastantes que los que se manejaron en este trabajo; sin embargo difieren con lo presentado por Hernández *et al.* (1985), Jung, *et al.* (1985), vanHeerden y Tainton (1988), Volesky *et al.* (1994) y Feria *et al.* (2002). En base a esto, se estima que el ambiente, las condiciones previas de manejo, el cultivo estudiado y el grado de contraste

entre los tiempos de permanencia evaluados, pudo incidir en la diferencia entre este y esos trabajos. En este sentido, se ha postulado que el grado de respuesta de las pasturas ante cambios en el manejo está afectado por la edad y condición previa de la misma siendo mas difícil modificar la estructura de pasturas con varios años de implantación (Agnusdei 2012).

Si bien no se encontraron trabajos que comparen sistemas de pastoreo similares a los estudiados en relación a la biomasa de raíces, el mayor valor de esta variable en la pastura bajo pastoreo frontal podría ser explicado por la imposibilidad de consumir el rebrote de las plantas en este sistema de pastoreo, propiciado por el tiempo de permanencia más corto respecto al pastoreo rotativo (Hernández *et al.* 1985), tal como es sugerido por Crider (1955) y Evans (1971, 1973). Este aspecto tendría gran importancia en la tasa de mortandad y en la velocidad de crecimiento de las raíces post pastoreo. A partir de lo indicado por este último autor, la variabilidad temporal de la biomasa de raíces observada en este trabajo surgiría de las interacciones entre el pastoreo y los parámetros climáticos que controlan el proceso de fotosíntesis (principalmente intensidad lumínica y temperatura), debido a que estas estructuras son un destino importante de fotoasimilados aún después de una defoliación (Briske y Richards 1995). Promover sistemas radiculares densos y profundos es importante para disminuir la resistencia al paso de agua en el sistema suelo-raíz y asegurar una exploración completa del perfil del suelo (Acevedo 1979), y de esta forma aumentar la tolerancia a períodos de déficit hídrico (Garwood y Sinclair 1979).

La densidad aparente del suelo (Dap) no mostró una tendencia temporal clara, con diferencias entre tratamientos en una única fecha. Sin embargo, las pasturas bajo pastoreo rotativo mostraron una reducción neta en la densidad aparente al final del ensayo. El comportamiento diferencial entre sistemas de pastoreo podría relacionarse con el efecto que altas cargas instantáneas generan en la superficie del suelo (Donkor *et al.* 2002). Por otro lado, los valores fluctuantes a lo largo de la temporada podrían responder al comportamiento de los suelos bajo estudio relacionado a mecanismos de

expansión-contracción (Pozzolo *et al.* 2006), lo que induciría a cambios en los componentes de la relación masa/volumen del suelo según el grado de humedecimiento superficial. Otro factor que pudo incidir en la dinámica de la densidad aparente del suelo fue la presión ejercida por el tránsito de la maquinaria agrícola utilizada para realizar los cortes post-pastoreo y/o las variaciones en las cargas animales entre pastoreos.

Los sistemas de pastoreo evaluados no lograron diferenciarse en la conductividad hidráulica saturada del suelo ( $K_{sat}$ ). Esto podría relacionarse con los resultados encontrados en la Dap, los cuales no mostraron evidencias contundentes de diferencias significativas entre sistemas de pastoreo. A partir de esto podría sugerirse que los sistemas de pastoreo no fueron lo suficientemente contrastantes como para influir de forma diferencial en el sistema poroso del suelo (Lobry de Bruyn y Kingston 1997; Drewry *et al.* 1999; Rodd *et al.* 1999).

Las características químicas del suelo no mostraron grandes diferencias entre sistemas de pastoreo, sólo en algunas variables se encontraron variaciones diferenciales en la comparación entre período inicial y final de la primera temporada en cada sistema. En el caso del Nitrógeno total del suelo (N), si bien no hubo diferencias entre tratamientos, la sumatoria de OF y biomasa de raíces sería mayor en el PF (puesto la igualdad estadística de la primera variable y los valores más altos en la segunda) lo que indicaría que el N presente en el sistema suelo-planta fue mayor, al menos en la profundidad de suelo evaluada. Esto podría ser explicado por una distribución más uniforme de las deyecciones en la superficie (Morton y Baird 1990) y la consecuente disminución de las pérdidas por lixiviación, y por el menor período en que las excreciones están expuestas al sol y a la atmósfera antes de ser incorporadas a través del riego en el sistema de pastoreo frontal (Agustinho *et al.* 1983; Drake y Oltjen 1994; Pinheiro Machado 2004). Este resultado es coincidente con Feria *et al.* (2002), quienes encontraron incrementos de N y materia orgánica del suelo (MO) en sistemas de pastoreo con bajos tiempos de permanencia y cargas instantáneas altas. La mayor producción de forraje

en la segunda temporada no se tradujo en una disminución del stock de N, por lo que se estima que ambos sistemas de pastoreo propiciaron un reciclaje de nutrientes más rápido y eficiente (Williams y Haynes 1990), cuando se lo compara con la primera temporada.

Si bien el pastoreo incidiría en la dinámica de la MO en el suelo (Schuman *et al.* 1999), los sistemas estudiados podrían no haber sido lo suficientemente contrastantes como para diferenciarse, o bien, la MO total del suelo no sería un indicador tan sensible o dinámico para mostrar cambios en la fertilidad, tal como indican Dubeux Jr. *et al.* (2006).

La disminución del pH mostrada entre los finales de temporada sugieren un efecto positivo de los sistemas de pastoreo evaluados, debido a que los suelos bajo estudio son marcadamente alcalinos. La evolución temporal de esta variable estaría relacionado a los procesos desencadenados a partir del depósito de las excreciones en el suelo (Williams y Haynes 1990) pero, a diferencia de lo sucedido con el N, no sugieren diferencias entre sistemas de pastoreo. Aunque la disminución del pH no fue suficiente para atribuirle efectos en la mayor producción de OF en la segunda temporada, se puede esperar que de forma indirecta la haya influenciado a través del efecto ejercido en la disponibilidad de ciertos nutrientes para el cultivo (González *et al.* 1998).

Aunque el manejo del riego se realizó de forma igualitaria para ambos sistemas de pastoreo, los distintos contenidos de humedad al ingreso de los animales en conjunto con la ocurrencia de precipitaciones con desfasaje temporal entre los momentos de pastoreo de cada sistema y la posible variabilidad en el contenido de sales del agua de riego a lo largo de la temporada, pudieron fomentar un comportamiento diferencial en la dinámica temporal de la salinidad del suelo (CE). No obstante, los valores registrados para esta variable fueron bajos ( $2,07 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ), cuando se lo compara con el valor umbral de salinidad para registrar disminuciones en la producción de la especie dominante de la pastura evaluada ( $3,9 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ; Allen *et al.* 2006).

La gran incidencia de la OF en el comportamiento de la EUA sugiere que el camino para aumentar los niveles de esta última variable es concentrar los esfuerzos en mejorar aquellos factores que afectan la producción de forraje, tal como indican Viets (1962), Sinclair *et al.* (1984), Perry *et al.* (2009) y Villalobos y Fereres (1990). Esto se confirma en el hecho de que los factores ambientales que más afectaron a la OF (radiación solar diaria promedio y radiación solar acumulada) son los mismos que afectaron, y en la misma dirección, a la EUA.

La radiación solar es el principal factor que controla la tasa de evapotranspiración cuando la humedad del suelo no es limitante (Jensen y Allen 1990). La relación positiva entre las variables vinculadas a la radiación solar y la OF es coincidente con lo postulado por Monteith (1972). La intensidad de la radiación solar, representada por la radiación solar diaria promedio (RS media), pareció influenciar más a la tasa de crecimiento de la pastura que a la evaporación directa desde la superficie del suelo, evidenciado a partir de la relación positiva de esta variable con la OF y la EUA. Este fenómeno señala que el remanente fotosintético puede ser un factor de manejo relevante para asegurar un crecimiento rápido post pastoreo e impedir, al menos parcialmente, la evaporación de agua desde el suelo (Sinclair 1984, Jensen y Allen 1990, Villalobos y Fereres 1990, Schmidhalter y Studer 1998, Keller y Seckler 2005, Perry *et al.* 2009), debido a que en gran parte del ciclo de crecimiento, el cultivo mantendría una alta cobertura vegetal. Un proceso similar se puede describir con la radiación solar acumulada (suma RS), en donde la energía solar total que llegó a la superficie habría afectado en mayor grado a la producción de forraje que a la evaporación de agua. Sin embargo, el aumento significativo de la OF en la segunda temporada no se reflejó en una mayor EUA del cultivo, lo que sugiere que el incremento de esta variable no habría alcanzado el umbral para alterar de forma significativa la relación T/Etc. Así mismo, la producción de forraje pareció estar limitada sólo por la energía solar disponible, por lo que se puede esperar que el suministro de nutrientes

y agua haya sido el adecuado para las condiciones ambientales dadas (Arkley 1963).

En climas áridos y semiáridos, la temperatura media asume un rol importante en el proceso de vaporización de agua, debido a que aumenta la energía disponible para evapotranspirar a través de flujos de calor sensible desde las inmediaciones del cultivo (Jensen y Allen 1990). Este fenómeno podría explicar la relación encontrada entre la temperatura media diaria promedio (TM) y la evapotranspiración del cultivo (Etc). Estos resultados están de acuerdo con lo expuesto por Sermons *et al.* (2017) y Sinclair (2007) quienes también atribuyen a las altas temperaturas una disminución en la eficiencia de funcionamiento de los mecanismos de regulación estomáticos de la transpiración. La suma RS explicó una pequeña proporción de la variación de la Etc, aunque se podría esperar que la relación entre estas variables sea más compleja, debido a que la radiación solar es la principal fuente de energía que llega a la superficie y es un parámetro que tiene gran influencia en la temperatura ambiental (Jensen y Allen 1990). La velocidad media del viento explicó solo un 3% de la variabilidad observada en la evapotranspiración del cultivo, en contraste con el 79% explicado por la TM, lo que podría sugerir que este resultado surge de una correlación temporal entre estas dos variables (datos no mostrados).

Dentro de los sistemas de pastoreo explorados en este trabajo, parecería que mantener un remanente fotosintético adecuado post pastoreo a través de la regulación de la intensidad de defoliación puede ser un factor clave para mejorar la EUA y la productividad de las pasturas. Esto debería complementarse con un adecuado control del contenido de humedad del suelo para determinar, al menos aproximadamente, el momento oportuno para que los animales entren al potrero (conjugado con la sumatoria térmica de la pastura) y el posterior riego, con el objetivo de evitar el déficit hídrico del cultivo. Para gestionar esto, el cálculo de la evapotranspiración del cultivo a partir del registro de la evapotranspiración de referencia, complementado con el dato de humedad fácilmente utilizable en la zona

radical y con estimaciones visuales de la superficie del suelo, surgen como herramientas de manejos plausibles y recomendables para los productores de la zona.

Si bien hubo algunas diferencias en las características fisicoquímicas del suelo y en la biomasa de raíces en los distintos sistemas de pastoreo, el resultado más promisorio resultó ser la mayor producción de forraje en la segunda temporada en ambos sistemas. Sin embargo, como las mediciones fueron realizadas solamente en sectores de la pastura con alta cobertura vegetal, no fue posible detectar eventuales cambios en las variables estudiadas en otros sectores de las melgas, presumiblemente con características del suelo menos favorables y, en base a esto, con mayor potencial de respuesta ante cambios en el manejo.

Teniendo en cuenta que los sistemas de pastoreo más intensivos, tales como el pastoreo frontal requiere una mayor planificación e inversión (divisiones de potreros, por ejemplo), una acción de manejo válida en primera instancia podría ser planificar la rotación del ganado al menos cada siete días y propiciar el ingreso de los animales al potrero con suelo superficialmente seco pero con alto contenido de humedad en la zona radicular total, para lograr llegar al riego posterior al pastoreo con contenidos de humedad adecuado. En función de los resultados productivos y económicos alcanzados con esta modalidad, será decisión del productor ir intensificando gradualmente el sistema para lograr que sean más resilientes, a través de sistemas radiculares más densos y ciclados de nutrientes más eficientes.

Por los trabajos que sugieren un aumento en la EUA al aumentar la producción, se recomiendan estudios de largo término para que los resultados favorables encontrados en ambos sistemas de pastoreo puedan expresarse en incrementos de EUA. En este sentido, la evaluación de la EUA de la planta entera (biomasa aérea y biomasa subterránea), podría ser un mecanismo más sensible para detectar diferencias atribuibles al manejo del pastoreo.

El estudio de la dinámica del remanente forrajero y su impacto en la evapotranspiración del cultivo, surge como otra línea de investigación interesante para establecer pautas de manejo y mejorar la EUA. Por otro lado, conocer la dinámica y el ciclo de las distintas formas de N y MO en el suelo para ambos sistemas de pastoreo sería un aporte clave para establecer prácticas que fomenten sistemas más eficientes y sustentables. Se puede esperar que el grado de intensificación del pastoreo determine remanentes forrajeros más uniformes y densos, impactando positivamente en la EUA del cultivo. Esto se evidencia en los trabajos que sugieren distribuciones más uniformes de los nutrientes en las pasturas bajo sistemas de pastoreo con cargas animales instantáneas elevadas y por lo estimado en el presente estudio respecto a mayores valores de N presente en el sistema suelo-planta en las pasturas bajo pastoreo frontal,

## 5. CONCLUSIONES

Las pasturas sometidas a pastoreo con alta carga instantánea y corto tiempo de permanencia mostraron eficiencias en el uso del agua en relación a la OF, similares a las sometidas a baja carga instantánea y mayor tiempo de permanencia.

Los valores más altos de BR encontrados en las pasturas sometidas a pastoreo frontal, no se tradujeron en incrementos diferenciales en la OF. Se estima que la biomasa total producida (OF+BR) fue mayor en este sistema de pastoreo.

El sistema de pastoreo rotativo propició una disminución significativa en la Dap, aunque esto pudo estar asociado a las características expansivas del suelo y el grado de humedad edáfica en que las muestras fueron extraídas. Las pasturas sometidas a los distintos sistemas de pastoreo no se diferenciaron respecto a la Ksat.

La ausencia de diferencias significativas entre sistemas de pastoreo en las propiedades químicas del suelo, indican que ambos sistemas impactan de la misma forma en este cuerpo. Sin embargo, si bien las evidencias no son concluyentes, el N en el sistema suelo-planta pudo verse incrementado como consecuencia de la mayor producción de biomasa total en el PF.

En general, se encontraron efectos positivos en ambos sistemas, tanto en la vegetación como en el suelo, expresados a partir de una mayor OF en la segunda temporada. Estos resultados ponen en evidencia que un manejo apropiado del pastoreo a través de intensidades de defoliación y tiempos de descanso ajustados al cultivo, conjugado con un manejo del riego que permita satisfacer su demanda hídrica e incorporar de forma eficiente las excreciones al suelo mejoran la mayoría de las variables evaluadas.

Los factores climáticos, principalmente la radiación solar y la temperatura del ambiente, condujeron el crecimiento de la pastura y su relación con la evapotranspiración, respectivamente. La dependencia de la EUA y OF a las intensidades lumínicas encontradas en este trabajo, puso de manifiesto la importancia de promover una rápida y densa cobertura del suelo a través de

remanentes fotosintéticos adecuados para atenuar la evaporación directa del suelo.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

ABAYE, A. O.; ALLEN, V. G.; FONTENOT, J. P. 1997. Grazing sheep and cattle together or separately: effect on soils and plants. *Agronomy Journal*. 89: 380-386.

ACEVEDO E. 1979. Interacciones suelo-agua-raíz en el proceso de absorción de agua por las plantas. *Boletín Técnico de la facultad de Agronomía de la Universidad de Chile*. 44: 17-25.

AGNUSDEI, M. G. 2012. Rol de la ecofisiología en el diseño de manejos especializados de pasturas. *Pasturas 2012. Hacia una ganadería competitiva y sustentable. Jornada Técnica*. 13-28.

AGUSTINHO, R.; DEFOSSÉ, A.; MICCI, R. 1983. *Sistemas de producción intensivo de carne ovina en el Valle Inferior del Río Chubut*, Trelew: 35p.

ALARCÓN V. C.; DÖRNER F. J.; DEC B. D.; BALOCCHI L. O.; LÓPEZ C. I. 2010. Efecto de dos intensidades de pastoreo sobre las propiedades hidráulicas de un Andisol (Duric Hapludand). *Agro Sur*. 30-41.

ALLEN , R. G., PEREIRA, L. S., RAES, L. S.; SMITH, M. 2006. *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma: FAO.

ARBUNIÉS DE MAC KARTHY, R. 1994. *Estadísticas agrometeorológicas del Valle Inferior del Río Chubut*. INTA. Estación Experimental Chubut. 142p.

ARKLEY, R. J. 1963. Relationships Between Plant Growth and Transpiration. *HILGARDIA*. 559-584.

BALZARINI, M.; DI RIENZO, J.; TABLADA, M.; BRUNO, C.; CÓRDOBA, M.; ROBLEDO, W.; CASANOVES, F. 2012. *Estadística y biometría. Ilustraciones del uso de InfoStat en problemas de agronomía*. Brujas. Córdoba. 389p.

BEGUET, H. A.; BAVERA, G. A. 2001. *Fisiología de la planta pastoreada*. [En línea] Sitio Argentino de Producción animal. [[http://www.produccion-animal.com.ar/produccion\\_y\\_manejo\\_pasturas/pastoreo%20sistemas/04-fisiologia\\_de\\_la\\_planta\\_pastoreada.pdf](http://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pastoreo%20sistemas/04-fisiologia_de_la_planta_pastoreada.pdf).] [Consulta: 15 de junio 2015].

- BELL, M. J.; CULLEN, B. R.; JOHNSON, I. R.; ECKARD, R. J. 2012. Modelling Nitrogen Losses from Sheep Grazing Systems with Different Spatial Distributions of Excreta. *Agriculture*. 2: 282-294.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. 1986. Bulk Density. En: A. Klute, ed. *Methods of Soil Analysis. Part 1*. Soil Science Society of América. Madison (Wisconsin). p. 363-375.
- BÖHM, W. 1979. *Methods of studying root systems*. Berlin: Springer-Verlag. 33
- BRISKE, D. D. 1991. Developmental Morphology and Physiology of Grasses. En: *Grazing Management. An ecological perspective*. p. 85-107.
- BRISKE, D. D.; RICHARDS, J. H. 1995. Plant responses to defoliation: a physiological, morphological and demographic evaluation. Davis(California): Department of Rangeland Ecology and Management. University of California. 104 p.
- BRUECK, H. 2008. Effects of nitrogen supply on water-use efficiency of higher plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 171: 210-219.
- BUREAU OF RECLAMATION. 1963. *Manual de clasificación de tierras con fines de riego*. Caracas: Dirección de Cartografía Nacional.
- CANGIANO, C. A.; BRIZUELA, M. A. 2011. *Producción animal en pastoreo*. INTA. Buenos Aires. 514 p.
- CÁRDENAS, E.A.; LASCANO, C.E. 1988. Utilización de ovinos y bovinos en la evaluación de pasturas asociadas. *Pasturas tropicales*. 10(2): 2-10.
- CARREIRA, D. A. 2011. Cuantificación de la materia orgánica del suelo. Método de Walkley & Black, Rosario: Jornadas de actualización: Gestión de la calidad en los laboratorios de análisis de suelos agropecuarios. SAMLA-PROINSA.
- COLABELLI, M.; AGNUSDEI, M.; MAZZANTI, A.; LABREVEUX, M. 1998. El proceso de crecimiento y desarrollo de gramíneas forrajeras como base para el manejo de la defoliación. [En línea] [[http://www.produccion-animal.com.ar/produccion\\_y\\_manejo\\_pasturas/pastoreo%20sistemas/01-proceso\\_crecimiento.pdf](http://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pastoreo%20sistemas/01-proceso_crecimiento.pdf)] [Consulta: 26 de Agosto 2016].
- CONTI, M. E. 1998. *Principios de Edafología. Con énfasis en suelos argentinos*. Orientación Gráfica Editora SRL. Buenos Aires. 350 p.

COOK, S.; GICHUKI, F.; TURRAL, H. 2006. Water productivity: Estimation at plot, farm, and basin scale. Basin Focal Project Working Paper N° 2, Colombo: s.n.

COOPER, P. J. M.; KEATINGE, J. D. H.; HUGHES, G. 1983. Crop evapotranspiration - a technique for calculation of its components by field measurement. *Field Crops Research*.7: 299-312.

CRESPI, R.; RIVETTI, A. R.; PAGLIARICCI, H.; OHANIAN, A.; PEREYRA, T.; DÍAZ, M. Del P. 2001. Comportamiento hídrico y eficiencia del uso del agua en una pastura consociada. *Ingeniería del agua*, 8(5): 433-440.

CRIDER, F. J. 1955. Root-growth stoppage. Resulting from defoliation of grass. 1102 ed. Washington, D.C.: United States Department of Agriculture. 23 p.

DA SILVA, A. P.; IMHOFF, S.; CORSI, M. 2003. Evaluation of soil compaction in an irrigated short-duration grazing system. *Soil & Tillage Research*. 70: 83-90.

DEFOSSÉ, A.; GONZÁLEZ, D. M.; RODRIGUEZ, M. V. 2015. Eficiencia en el uso de pasturas por ovinos en un sistema de pastoreo frontal y uno rotativo en el valle inferior del Río Chubut. *Revista Argentina de Producción Animal*, 35(1): 251.

DENOIA, J.; SOSA, O.; ZERPA, G.; MARTÍN, B. 2000. Efecto del pisoteo animal sobre la velocidad de infiltración y sobre otras propiedades físicas del suelo. *Pastos*. 129-141.

DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DE LOS ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA. 1972. Medición del agua de riego. Diana. México. 86 p.

DI RIENZO, J. A.; MACCHIAVELLI R.; CASANOVES F. 2011. Modelos Lineales Mixtos. Aplicaciones en Infostat. Córdoba. 1ª edición.

DONKOR, N. T.; GEDIR, J. V.; HUDSON, R. J.; BORK, E. W.; CHANASYK, D. S.; NAETH, M. A. 2002. Impacts of grazing systems on soil compaction and pasture production in Alberta. *Canadian Journal of Soil Science*, 82(1): 1-8.

DRAKE, D. J.; OLTJEN, J. 1994. Intensively Managed Rotational Grazing Systems for Irrigated Pasture. *Rangeland Management*. 33-42.

DREWRY, J. J.; LOWE, J. A. H.; PATON, R. J. 1999. Effect of sheep stocking intensity on soil physical properties and dry matter production on a

Pallic Soil in Southland. *New Zeland Journal of Agricultural Researche*. 42: 493-499.

DUBEUX JR., J. C. B.; SOLLENBERGER, L. E.; COMERFORD, N. B.; SCHOLBERG, J. M.; RUGGIERI, A. C.; VENDRAMINI, J. M. B.; INTERRANTE, S. M.; PORTIER, K. M. 2006. Management intensity affects density fractions of soil organic matter from grazed bahiagrass sward. *Soil Biology & Biochemistry*. 38: 2705-2711.

EVANS, P. S. 1971. Root growth of *Lolium perenne* L. II. Effect of defoliation and shading. *New Zeland Journal of Agricultural Research*. 14: 552-562.

EVANS, P. S. 1973. The effect of repeated defoliation to three different levels on root growth of five pasture species. *New Zeland Journal of Agricultural Research*. 16: 31-34.

FAN, T.; STEWART, B. A.; YONG, W.; JUNJIE, L.; GUANGYE, Z. 2005. Long-term fertilization effects on grain yield, water-use efficiency and soil fertility in the dryland of Loess Plateau in China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 106: 313-329.

FAO. 1978. Effective rainfall in irrigated agriculture, [en línea] [<http://www.fao.org/docrep/X5560E/X5560E00.HTM>]. [Consulta: 11 de junio 2015].

FAO. 2013. Afrontar la escasez de agua. Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria. Roma. Informe sobre temas hídricos n° 38. 79p.

FEISINGER, P. 2004. El diseño de estudios de campo para la conservación de la biodiversidad. FAN, Santa Cruz de la Sierra. 242 p.

FERIA, A. L.; VALDÉS, G.; MARTÍN, P. C.; GONZÁLEZ, M. E. 2002. Evaluación de tres métodos de pastoreo para la ceba bovina. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*. 36: 225-230.

FERREYRA E, R.; SELLES VAN SCH., G. 2013. Manual de riego para especies frutales. Uso eficiente del agua de riego y estrategias para enfrentar la escasez. Santiago. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centros Regionales de Investigacion La Platina y La Cruz. 320p.

FLAHERTY, S; PESSACG, N; BRANDIZI, L; SOLMAN, S; PASCUAL, M. 2015. Impacto del cambio climático sobre la producción de agua en la cuenca del Río Chubut, Argentina. En: Congreso Internacional de Servicios

Ecosistémicos en los Neotrópicos: de la investigación a la acción 4°, Mar del Plata. Argentina.

FLOATE, M. J. S. 1981. Effect of grazing by large herbivores on nitrogen cycling in agricultural ecosystems. En: F. Clarke & T. Rosswal, edits. Terrestrial nitrogen cycles, processes, ecosystem strategies and management impacts. Ecological Bulletin (Stockholm) 33. pp. 585-601.

GAJRI, P. R.; PRIHAR, S. S.; ARORA, V. K. 1993. Interdependence of nitrogen and irrigation effects on growth and input-use efficiencies in wheat. Field Crop Research. 31: 71-86.

GARWOOD E. A.; SINCLAIR J. 1979. Use of water by six grass species. 2. Root distribution and use of soil water. Journal of Agricultural Science. 93:25-35.

GODAGNONE, R. E.; LUQUE, J. L.; KOZAK, F. 1989. Carta detallada de suelos de la Estación Experimental Agropecuaria Trelew. INTA. Castelar. 58 p.

GONZÁLEZ, M.; SEGAT, A.; CONTI, M. 1998. Reacción del suelo. En Conti, M. Principios de edafología con énfasis en suelos argentinos. Orientación Gráfica Editora. Bs. As. 185-197

GRASSI, C. J. 1998. Fundamentos del riego. CIDIAT. Mérida, Venezuela. 392p.

GRACE J. 1974. The effect of wind on Grasses.1. Cuticular and stomatal transpiration. Journal of Experimental Botany. 25(86): 542-551.

GREENWOOD, K. L.; LAWSON, A. R.; KELLY, K. B. 2009. The water balance of irrigated forages in northern Victoria, Australia. Agricultural Water Management. 96: 847-858.

HERNÁNDEZ, D.; ROSETE, A.; ROBLES, F. 1985. Sistema de pastoreo rotacional para la producción de leche con *C. dactylon*. II. Efecto del tiempo de estancia. Pastos y forrajes. 8: 279-295.

HOGLUND, J. H. 1985. Grazing intensity and soil nitrogen accumulation. New Zeland Grassland Association. 46: 65-69.

HOULBROOKE, D.J.; LITTLEJOHN, R. P.; MORTON, J.D.; PATON, R. J. 2008. Effect of irrigation and grazing animals on soil quality measurements in the

North Otago Rolling Downlands of New Zealand. British Society of Soil Science. 24: 416-423.

INSÚA, J.R.; AGNUSDEI, M.G.; DI MARCO, O.N. 2012. Calidad nutritiva de láminas de dos cultivares de festuca alta (*Festuca arundinacea* Schreb). Revista de Investigaciones Agropecuarias. 38(2):190-195

INTA. 2012. Proyecto: Apoyo al desarrollo territorial del área geográfica valles irrigados Inferiores Río Chubut y Sarmiento. Estación Experimental Chubut. Trelew.

INTA. 2014. Informe de resultados para el seguimiento y evaluación de pasturas de la chacra 226. Octubre de 2013-Abril de 2014. Parte 1: pasturas. Informe Interno de la Estación Experimental Agropecuaria Chubut. Trelew, Chubut.

INTA. 2015. La ganadería en el Valle Inferior del Río Chubut. Características, visión y potenciales acciones para la producción primaria y el agregado de valor. [en línea]. Trelew, Chubut. [[https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta\\_vision\\_ganaderia\\_eea\\_chubut\\_2015\\_txt.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_vision_ganaderia_eea_chubut_2015_txt.pdf)]. [Consulta: 1 de abril de 2015]

IPCC. 2014. Cambio Climático 2014. Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resumen para responsables de políticas. [en línea] [[http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5\\_wgII\\_spm\\_es.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_es.pdf)]. [5 de abril de 2017]

ISRAELSEN, O. W.; HANSEN, V. E. 1965. Principios y aplicaciones del riego. Reverté S.A., Barcelona. 396p.

JARVIS, S. C. 2000. Soil-Plant-Animal Interactions and Impact on Nitrogen and Phosphorus Cycling and Recycling in Grazed Pastures. En: Lemaire, G.; Hodgson, J.; de Moraes, A.; Nabinger, C.; F. de Carvalho, P. C. eds. Grassland Ecophysiology and Grazing Ecology. Cambridge. CABI. p. 317-337.

JENSEN, M. E.; ALLEN, R. G. 1990. Evaporation, evapotranspiration and irrigation water requirements. American Society of Civil Engineers. Reston, Virginia. 742p.

JUNG, H. G.; RICE, R. W; KOONG, L. J. 1985. Comparison of heifer weight gains and forage quality for continuous and short-duration grazing systems. Journal of Range Management. 38: 144-148.

- KATERJI, N.; VAN HOORN, J. W.; HAMDY, A.; MASTRORILLI, M. 2003. Salinity effect on crop development and yield, analysis of salt tolerance according to several classification methods. *Agricultural Water Management*. 62: 37-66.
- KELLER, A.; SECKLER, D. 2005. Limits to the Productivity of Water in Crop Production. En: *California Water Plan Update*. California. 177-197
- KHATAAR, M.; MOHHAMADI, M. H.; SHABANI, F. 2018. Soil salinity and matric potential interaction on water use, water use efficiency and yield response factor of bean and wheat. *Scientific Reports*. 8: 2679.
- KUGLER, N. M.; BARBAROSSA, R. A. 1997. Evaluación de dos sistemas de pastoreo en pasturas irrigadas. En: *Intercambio de experiencias de pastoreo y conservación de forraje 3°*. Bariloche. Argentina, p 83-85.
- LAYA, H. A. 1981. Formulación de un plan integral de manejo hídrico para el Valle Inferior del Río Chubut. Levantamiento semidetallado de suelos. Rawson: Consejo Federal de Inversiones. 167p.
- LOBRY DE BRUYN, L. A.; KINGSTON, T. J. 1997. Effect of summer irrigation and trampling in dairy pastures on soil physical properties and earthworm number and species composition. *Australian Journal of Agricultural Research*. 48: 1059-1079.
- LUQUE, J. L. 1992. Evaluación de propiedades hidrofísicas en suelos vérticos del Valle Inferior del Río Chubut durante la aplicación de diferentes enmiendas. Tesis de maestría en Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Argentina. 187p.
- MAPFUMO, E.; CHANASYK, D.S.; NAETH, M. A.; BARON, V. S. 1999. Soil compaction under grazing of annual and perennial forage. *Canadian Journal of Soil Science*. 79: 191-199.
- MEDRANO, H.; BOTA, J.; CIFRE, J.; FLEXAS, J.; RIBAS-CARBÓ, M.; GULÍAS, J. 2007. Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geográficas*. 43: 63-84.
- MINAGRI. 2014. Estrategia Provincial para el Sector Agroalimentario. [en línea]. [[http://www.prosap.gov.ar/webDocs/EPSA\\_ChubutyResolucion\\_Septiembre2014.pdf](http://www.prosap.gov.ar/webDocs/EPSA_ChubutyResolucion_Septiembre2014.pdf)] [Consulta: 15 de agosto de 2016].
- MIÑÓN, D. P.; ÁLVAREZ, J. M.; GALLEGO, J. J.; GARCILAZO, M. G.; BARBAROSSA, R. A.; GARCÍA VINENT, J. C. 2015. Recursos forrajeros para intensificar la producción de carnes en los valles regados patagónicos. INTA. Estación Experimental Valle Inferior del Río Negro. Convenio

provincia de Río Negro-INTA. Viedma, Argentina. Información Técnica n° 36. 69p

MOLDEN, D. 2006. Accounting for Water Use and Productivity. En: User-Producer Conference on Water Accounting for Integrated Water Resource Management, Voorburg. Netherlands. p 1-16.

MOLDEN, D.; OWEIS, T Y; PASQUALE, S; KIJNE, J; HANJRA, M A; BINDRABAN, P S; BOUMAN, B A; COOK, S; ERENSTEIN, O; FARAHAMI, H; HACHUM, A; HOGEVEEN, J; MAHOO, H; NANGIA, V; PEDEN, D; SIKKA, A; SILVA, P; TURRAL, HUGH; UPADHYAYA, A; ZWART, S. 2007. Pathways for increasing agricultural water productivity. En: Molden, D. ed. Water for food, water for life: a comprehensive assessment of water management in agriculture. IWMI Londres, p. 279-310.

MONTEITH, J. L. 1972. Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems. *The Journal of Applied Ecology*. 9: 747-766.

MORTON, J. D.; BAIRD, D. B. 1990. Spatial distribution of dung patches under sheep grazing. *New Zeland Journal of Agricultural Research*. 33: 285-294.

NORUSIS, M. J., 1997. SPSS Advanced statistics 7.5.

ORTIZ REINOSO, V.; SOTO SILVA, C. 2006. Cálculo y manejo en pastoreo controlado. II) Pastoreo rotativo y en franjas. *Revista Veterinaria*. 41: 15-24.

PASSIOURA, J. B. 2002. Soil conditions and plant growth. *Plant, Cell and Environment*. 25: 311-318.

PEDEN, D.; TADESSE, G.; MISRA, A K; AWAD AHMED, F.; ASTATKE, A.; AYALNEH, W.; HERRERO, M.; KIWUWA, G.; KUMSA, T.; MATI, B.; MPAIRWE, D.; WASSENAAR, T.; YIMEGNUHAL, A. 2007. Water and livestock for human development. En: Molden D. ed. Water for food, water for life: a comprehensive assessment of water management in agriculture. IWMI. Londres, p. 485-514.

PÉREZ, M.; KLOSTER, N. 2017. Conductividad eléctrica: comparación del método de pasta saturada "a campo" (simulado) vs extracto de saturación en el laboratorio. En: Kloster, N. ed. Métodos de análisis e implementación de calidad en el laboratorio de suelos. INTA Anguil. Anguil, 35-38.

PERRY, C.; STEDUTO, P.; ALLEN, R. G.; BURT, C. M. 2009. Increasing productivity in irrigated agriculture: Agronomic constraints and hydrological realities. *Agricultural Water Management*. 96: 1517-1524.

PINHEIRO MACHADO, L. C.. 2004. Pastoreo Racional Voisin. Tecnología agroecológica para el tercer milenio. Hemisferio Sur. Buenos Aires. 253 p.

POZZOLO, O. R.; FERRARI, H. J.; GANGE, J. M.; HERRERA, M. A.; PEREYRA, C.; RIVAROLA, S.; CERANA, J.; BENAVIDES, R.; WILSON, M.; DE BATTISTA, J. 2006. Comportamiento de suelos vertisoles al pastoreo con distintas cargas en sistemas de siembra directa y convencional. En Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola 7. Chillán. Chile.

RICHARDS, L. A. 1948. Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soil. *Soil Science*, 66: 105-110.

RITCHIE, J. T. 1972. Model for Predicting Evaporation from a Row Crop with Incomplete Cover. *Water Resources Research*, 8: 1204-1231.

RIVERA PEÑA, M. 2008. Determinación de la dinámica del agua en el sistema agroforestal Quesungual e identificación de factores suelo-planta para el mejoramiento de la productividad del agua en los cultivos. Tesis de Doctorado en Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agrarias- Énfasis en suelos. Palmira, Colombia. 306p.

RODD, A. V.; PAPADOPOULOS, Y. A.; LAFLAMME, L. F.; MCRAE, K. B.; FILLMORE, S. A. E.; WILSON, R. W. 1999. Effect of rotational grazing on selected physical properties of a Gleyed Brunisolic Gray Luvisol loam in Nova Scotia. *Canadian Journal of Soil Science*. 79: 117-125.

ROSSI, M. J. 2013. Análisis de la variabilidad espacial y modelación de los procesos de escorrentía e infiltración del agua en ambientes semiáridos (Monte Patagónico). Tesis de Doctorado en Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 170 p.

SADRAS, V. O.; O'LEARY, G. J.; ROGET, D. K. 2005. Crop responses to compacted soil: capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crops Research*. 91: 131-148.

SCHMIDHALTER, U.; STUDER, C. 1998. Water-Use Efficiency as Influenced by Plant Mineral Nutrition. En: Sino-German Workshop "Impact of plant nutrition on sustainable agricultural production" 1. Kiel, Alemania.

SCHUMAN, G. E.; REEDER, J. D.; MANLEY, J. T.; HART, R. H.; MANLEY, W. A. 1999. Impact of grazing management on the carbon and

nitrogen balance of a mixed-grass rangeland. *Ecological Applications*. 9: 65-71.

SERMONS, S. M., SINCLAIR, T. R., SEVERSIKE, T. M. & RUFTY, T. W. 2017. Assessing transpiration estimates in tall fescue: The relationship among transpiration, growth, and vapor pressure deficits. *Environmental and experimental Botany*. 137: 119-127.

SERRA, J. J., SAINZ TRÁPAGA, J.; MALNERO, H. A. 2000. Limitaciones de disponibilidad hídrica del Río Chubut para nuevas áreas bajo riego o derivaciones para otros fines en el Valle Inferior. En: Congreso Latinoamericano de Hidráulica 19°, Córdoba. Argentina.

SHALHEVET, J. 1994. Using water of marginal quality for crop production: major issues. *Agricultural Water Management*. 25: 233-269.

SHARMA, B., MOLDEN, D.; COOK, S. 2015. Water use efficiency in agriculture: Measurement, current situation and trends. En: Drechsel P.; Heffer P.; Magen H.; Mikkelsen R.; Wichelns D. eds. *Managing water and fertilizer for sustainable agricultural intensification*. International Fertilizer Industry Association (IFA), International Water Management Institute (IWMI), International Plant Nutrition Institute (IPNI), and International Potash Institute (IPI). París, p. 39-64.

SHEWMAKER, G. E., ELLSWORTH, J. W.; JENSEN, S., 2009. Southern Idaho Fertilizer Guide. Irrigated Pastures. University of Idaho Extensión. Idaho, p. 1-5.

SINCLAIR, T.; FISCUS, E.; WHERLEY, B.; DURHAM, M.; RUFTY, T. 2007. Atmospheric vapor pressure deficit is critical in predicting growth response of "cool-season" grass *Festuca arundinacea* to temperature change. *Planta*. 227: 273-276.

SINCLAIR, T. R.; TANNER, C. B.; BENNET, J. M. 1984. Water-Use Efficiency in Crop Production. *BioScience*. 34: 36-40.

SOKAL, R. R. & ROHLF, J. F., 1984. *Introducción a la bioestadística*. Editorial Reverté SA. Barcelona. 365 p.

STEDUTO, P., HSIAO, T. C.; FERERES, E. 2007. On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science*. 25: 189-207.

STOUT, W. L. 1992. Water-use Efficiency of Grasses as Affected by Soil, Nitrogen, and Temperature. *Soil Science Society of America Journal*. 56: 897-902.

STOUT, W. L.; JUNG, G. A.; SHAFFER, J. A. 1988. Effects of Soil and Nitrogen on Water Use Efficiency of Tall Fescue and Switchgrass Under Humid Conditions. *Soil Science of America Journal*. 52: 429-434.

STOUT, W. L.; SCHNABEL, R. R. 1997. Water-use efficiency of perennial ryegrass as affected by soil drainage and nitrogen fertilization on two floodplain soils. *Journal of Soil and Water Conservation*. 3: 207-221.

STRAHLER, A. N., 1989. *Geografía Física*. Barcelona: Ediciones Omega. 767 p.

TANNER, C. B.; SINCLAIR, T. R. 1983. Efficient water use in crop production: researche or re-searche? *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production*. 1-27.

TARJUELO MARTÍN BENITO, J. M. 2005. *El riego por aspersión y su tecnología*. Mundi-Prensa, Madrid. 581 p.

THOMPSON, L. M.; TROEH, F. R. 1988. *Los suelos y su fertildiad*. Reverté SA., Barcelona. 657 p.

TOLEDO, A. 2002. El agua en México y el mundo. *Gaceta Ecológica*. 64: 9-18.

VALLENTINE, J. F. 1990. *Grazing Management*. Academic Press, Inc., San Diego. 533 p.

VAN GENUCHTEN, M. T. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science*. 44: 892-898.

VANHEERDEN, J. M.; TAINTON, N. M. 1988. Influence of grazing management on the production of an irrigated grass/legume pasture in the Rûens area of the Southern cape. *Journal of the Grassland Society of Southern Africa*. 3: 130-137.

VIETS, F. G. J. 1962. Fertilizers and the efficient use of water. *Advances in Agronomy*. 14: 223-264.

VILLALOBOS, F. J.; FERERES, E. 1990. Evaporation Measurments beneath Corn, Cotton, and Sunflower Canopies. *Agronomy Journal*. 82: 1153-1159.

VOLESKY J. D. DE ACHAVAL O'FARREL F.; ELLIS, W. C.; KOTHMANN, M. M.; HORN, F. P.; PHILLIPS, A.; COLEMAN, S. W. 1994. A comparison of Frontal, Continuous, and Rotation Grazing Systems. *Journal of Range Management*. 47: 210-214.

WARREN, S. D.; NEVILL, M. B.; BLACKBURN, W. H.; GARZA, N. E. 1986. Soil response to trampling under intensive rotation grazing. Soil Science Society of American Journal. 50: 1336-1341.

WILLIAMS, P. H.; HAYNES, R. J. 1990. Influence of improved pastures and grazing animals on nutrient cycling within New Zeland Soils. New Zeland Journal of Ecology. 14: 49-57.

WOODING , R. A. 1968. Steady infiltration from a shallow circular pond. Water Resources. 4: 1259-1273.

WWAP. 2015. Agua para un mundo sostenible. Datos y cifras, [en línea] UNESCO, Colombella, Perusa, Italia.  
[<http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/images/WWDR201>]

## 7. ANEXO 1: CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA DEL SUELO. DIFICULTADES EN SU ESTIMACIÓN.

### 7.1. Introducción

La conductividad hidráulica de un suelo se define como la tasa a la cual el agua puede moverse a través del mismo, bajo determinadas condiciones y gradientes hidráulicos. En el caso de la conductividad hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ), este movimiento se da en condiciones del espacio poroso completamente ocupado por agua, y depende de la fluidez del líquido y de la textura y estructura del suelo (Martinez Beltrán 2003). Esta propiedad de los suelos es un indicador sensible al manejo efectuado sobre ellos y se utiliza frecuentemente para identificar cambios entre usos edáficos contrastantes (Ellies Sch. *et al.* 1997; Soracco 2003; Aoki y Sereno 2005), debido a que a partir de esta se pueden dimensionar variaciones en las características funcionales y morfológicas del sistema poroso (Ellies Sch. *et al.* 1997).

Para la estimación de la  $K_{sat}$  existen modelos que ajustan datos de infiltración de agua en el suelo en estado transitorio (variación de la tasa de infiltración en el tiempo; Rossi 2013), a partir del uso de infiltrómetros de tensión. En este estado, que se corresponde a flujos de agua en el suelo en zonas no saturadas, el movimiento del líquido se relaciona con el desplazamiento del aire presente en los poros (Wang *et al.* 1998). Algunos experimentos de laboratorio han demostrado que bajo condiciones similares a la de los suelos, la velocidad de infiltración del agua fluctúa en función de la presión del gas en los poros ubicados por debajo del frente de humedecimiento. Sin embargo, a una determinada presión de aire, este logra escapar por la superficie y descomprimir la parte inferior del sistema poroso, con lo que se iniciaría un nuevo ciclo de infiltración (Free y Palmer 1941; Wang *et al.* 1998)

Los suelos con diferente composición textural muestran distinto comportamiento respecto al ingreso de agua, y se pueden identificar dos etapas cuando sucede (Haines 1923). La primera se identifica por un desplazamiento de aire cuando comienza el humedecimiento (partiendo de

un suelo seco), y la segunda ocurre sin desplazamiento de aire, lo que incluye un aumento del volumen del suelo directamente proporcional a la entrada del agua al mismo. En los suelos con mayor contenido de arcilla expandibles, estos procesos son más evidentes (Haines 1923; Kutílek 1996). El suelo bajo estudio presenta características particulares respecto a la estabilidad de su sistema poroso, con cambios en el volumen y forma de los mismos a partir de eventos de humedecimiento/desecamiento (Kutílek 1996) y presencia de grietas de tamaños variables en función de la humedad del suelo. Esto es particularmente importante debido a que la funcionalidad de los poros varía a lo largo de estos procesos (Kutílek 1996).

En este anexo se aborda la situación generada a partir de las determinaciones de  $K_{sat}$ , debido a que en la mayoría de los casos no pudo ser estimada. Este apartado tiene el objetivo de analizar los resultados provenientes de las determinaciones llevadas a cabo y, a partir de ello, identificar los fenómenos que pudieron ocasionarlos.

## 7.2. Materiales y métodos

La metodología utilizada para llevar a cabo los ensayos de infiltración de agua en el suelo y la estimación de  $K_{sat}$  se describe en la sección 2.3.4.2 del cuerpo principal del trabajo.

Los períodos en los que se realizaron las determinaciones que aparecen en este anexo fueron el 3, 4 y 5.

## 7.3. Análisis de los resultados obtenidos

### 7.3.1. Representación y análisis de los casos.

Se representaron gráficamente para cada determinación de los períodos 3, 4 y 5, la serie de datos correspondiente a la velocidad de infiltración ( $I$ ) en función del tiempo, donde se visualizaron un gran número de casos en los que la distribución de los puntos no siguió la tendencia esperada para modelar este tipo de fenómeno físico (curva exponencial). Se pudo observar en la distribución de los datos que mientras en el primer caso a medida que

transcurrió el tiempo tendieron hacia una velocidad de infiltración constante (Fig. 7.1A), en el segundo caso esta tendencia fue ascendente luego de alcanzar un punto mínimo (Fig. 7.1B). Si bien los casos representados en la figura 7.1 no son comparables en términos absolutos porque difieren en la tensión específica de la cámara del IMD, son válidos para hacer este análisis cualitativo.

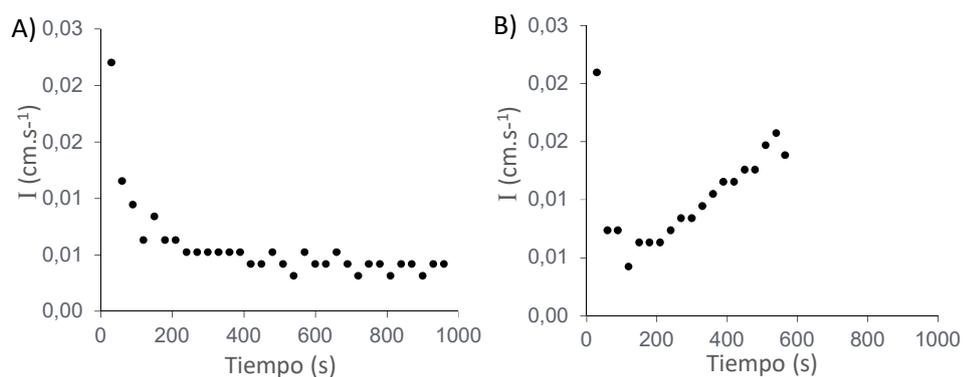


Figura 7.1: Representación de dos determinaciones contrastantes representativas para la variable velocidad de infiltración (I), en A) velocidad de infiltración constante y en B) velocidad de infiltración ascendente.

### 7.3.2 Clasificación de los casos

Se clasificaron los casos en “normales” y “extraños”, dependiendo de las características de la distribución de los datos explicada en el punto anterior (ejemplificados en la Fig. 7.1A y 7.1B, respectivamente), y en “Seco” y “Húmedo” cuando el contenido de humedad gravimétrico del suelo (metodología descrita en 2.3.2.2, Ec. 2.7) previo a la determinación fue menor o igual al 40% y mayor al 40 % respectivamente, luego se realizó una tabla de contingencia (Tabla 7.1).

Del total de casos “extraños” (24), el 88% ocurrió cuando el suelo se encontraba “seco”, mientras que el 80% de los casos “normales” ocurrió con contenidos altos de humedad de suelo. Por otra parte, se relacionó el tipo de caso (normal o extraño) con el sistema de pastoreo al cual fue sometida la

pastura en que se desarrolló la determinación, y se observó que la que estuvo bajo pastoreo rotativo tuvo un 92,6% de casos “normales”, mientras que la que estuvo bajo pastoreo frontal tuvo el 22% de estos casos.

Tabla 7.1: Tabla de contingencia para la clasificación de los casos “normales” y “extraños” según la humedad previa a la determinación.

Caso	Contenido Humedad		Total
	Húmedo	Seco	
Extraños	3	21	24
Normales	24	6	30
Total	27	27	54

En la tabla 7.2 se muestran los valores de  $K_{sat}$  para aquellos casos en los que se pudo ajustar una curva y estimar  $I_i(h)$ . Algunos casos clasificados como normales no pudieron ajustarse a una curva en donde el parámetro que representa a  $I_i(h)$  estuviera presente.

Tabla 7.2: Valores de la conductividad hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) en los casos que fue posible ajustar una curva y estimar el parámetro de infiltración en un tiempo infinito ( $I_i(h)$ ). PF: sistema de pastoreo frontal; PR: sistema de pastoreo rotativo.

Período	Sistema de pastoreo	Nº casos "normales"	$K_{sat}$ media ( $mm \cdot h^{-1}$ )
3	PF	3	6,17
3	PR	7	6,80
4	PF	1	8,90
4	PR	8	7,91
5	PF	0	-
5	PR	5	6,12

#### 7.4. Discusión

Se encontró que la mayoría de los casos “normales” se desarrollaron con contenidos de humedad de suelo mayores al 40%. Este proceso puede ser explicado por lo postulado por Haines (1923), debido a que por encima de

este contenido hídrico se podría esperar que el ingreso de agua al suelo ocurra sin desplazamiento de aire, con un aumento del tamaño de poros (directamente proporcional del volumen del suelo) y, en consecuencia, sin aumento de presión de aire por debajo del frente húmedo. En contraste, suelos con bajos contenidos de humedad podrían estar en la zona de la primera etapa del proceso de humedecimiento descrito por el mismo autor, en donde si bien existe un aumento del tamaño de los poros, no es directamente proporcional al ingreso de agua, lo que resultaría en un aumento de la presión de aire por debajo del frente de humedecimiento, con la consecuente disminución de la tasa de infiltración (Free y Palmer 1941; Wang *et al.* 1998). Casos similares a los “extraños” fueron encontrados en las pruebas de laboratorio bajo muestras de suelo confinadas y semi confinadas llevadas a cabo por Wang *et al.* (1998), sin embargo, este trabajo encontró que cíclicamente se liberaban burbujas de aire por la superficie del sustrato, lo que aumentaba la tasa de infiltración abruptamente, para luego volver a disminuir y repetir el proceso.

La mayor cantidad de casos “normales” encontrados en las pasturas sometidas al pastoreo rotativo respecto a las sometidas al pastoreo frontal pudo deberse al mayor contenido de humedad en el suelo presente en las primeras al momento de las determinaciones, como se indica en la tabla 3.1. Esta situación estuvo relacionada al tiempo de permanencia diferencial de los animales en el potrero entre sistemas de pastoreo, debido a que en el caso del rotativo (tiempo de permanencia más prolongado) fue necesario el ingreso de los animales a las pasturas con suelo más húmedo, para asegurar niveles adecuados de esta variable a la salida de los mismos.

### 7.5. Conclusiones

Los casos que no respondieron al modelo exponencial esperado en las determinaciones de infiltración estarían relacionados a la dinámica de las relaciones agua-aire en el suelo. Sin embargo, se podría esperar que ensayos

más prolongados de infiltración superen la etapa en la que el aire influye en este proceso y los datos adopten la forma de la curva esperada.

Los suelos estudiados presentan ciertos inconvenientes para medir el fenómeno de infiltración con la metodología propuesta por las características dinámicas del sistema poroso cuando son humedecidos.

#### 7.6 Bibliografía

AOKI, A. M.; SERENO, R. 2005. Modificaciones de la conductividad hidráulica y porosidad del suelo estimadas mediante infiltrómetro de disco a tensión. *Agricultura técnica*. 65: 295-305.

ELLIES SCH., A.; GREZ, R.; RAMÍREZ G. C. 1997. La conductividad hidráulica en fase saturada como herramienta para el diagnóstico de la estructura del suelo. *Revista Agro Sur*. 25: 51-56.

FREE, G. R.; PALMER, V. J. 1941. Interrelationship of infiltration, air movement, and pore size in graded silica sand. *Soil Science Society of American Journal*. 5: 390-398.

HAINES, W. B. 1923. The volume-changes associated with variations of water contents. *The Journal of Agricultural Science*. 13: 296-310.

KUTÍLEK, M. 1996. Water relations and water management of Vertisols. En: Ahmad N.; Mermut A. eds. *Development in Soil Science. Vertisols and technologies for their management*. Elsevier. p. 201-230.

MARTINEZ BELTRÁN, J. 2003. Hidrología del suelo y determinación de sus características hidráulicas. En: *Master en Ingeniería en regadíos*. Ministerio de Fomento. Ministerio de medio ambiente. Madrid. 283p.

ROSSI, M. J. 2013. Análisis de la variabilidad espacial y modelación de los procesos de escorrentía e infiltración del agua en ambientes semiáridos (Monte Patagónico). Tesis de Doctorado en Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 170 p.

SORACCO, C. G. 2003. Relación entre la conductividad hidráulica saturada y la densidad aparente en tres situaciones de manejo contrastantes. *Evaluación de Parámetros y Procesos Hidrológicos en el suelo*. En VII Escuela Latinoamericana de Física de Suelos. p. 35-38. La Serena, Chile.

WANG, Z.; FEYEN, J.; VAN GENUTCHEN, M. T.; NIELSEN, D. R.  
1998. Air entrapment effects on infiltration rate and flow instability. *Water Resources Research*. 34: 213-222.