

Manejo del riego en la Patagonia occidental (Región de Aysén)

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS

Boletín INIA / N° 499

ISSN 0717-4829



Autores:

- **Christian Hepp K.**
INIA Tamei Aike
- **Dagoberto Villarroel T.**
INIA Tamei Aike
- **Homero Barría O.**
INIA Remehue
- **Pier Barattini P.**
INIA Tamei Aike
- **Camila Reyes S.**
INIA Tamei Aike



Instituto de Investigaciones Agropecuarias

Manejo del riego en la Patagonia occidental (Región de Aysén)

Autores:

Christian Hepp K.

Dagoberto Villarroel T.

Homero Barría O.

Pier Barattini P.

Camila Reyes S.

INIA TAMEL AIKE

Km 4,5 camino Coyhaique Alto, Coyhaique

Boletín N° 499

ISSN 0717 - 4829



Directora Responsable:

Camila Reyes S. Directora INIA Tamel Aike

Editor técnico:

Christian Hepp K.
(Jefe de Proyecto)

Comité Editor:

María Paz Martínez de U.
Dagoberto Villarroel
Sandro Cisternas F.
Andrea Romero G.

Autores:

Christian Hepp K. Ingeniero Agrónomo MPhil PhD INIA Tamel Aike
Dagoberto Villarroel T. Ingeniero Agrónomo MSc INIA Tamel Aike
Homero Barría O. Ingeniero Agrónomo INIA Remehue
Pier Barattini P. Biólogo MSc INIA Tamel Aike
Camila Reyes S. Ingeniero Agrónomo PhD INIA Tamel Aike

Boletín INIA N°499

ISSN 0717 - 4829

Este boletín fue editado por el Centro Regional de Investigación INIA Tamel Aike, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Ministerio de Agricultura, Chile.

La presente publicación entrega resultados obtenidos en el marco del proyecto "Uso del agua en sistemas ganaderos vulnerables: estrategia de adaptación al cambio climático en Aysén" (19BP-117329).

Cita Bibliográfica correcta:

Hepp, C., Villarroel, D., Barría, H., Barattini, P. y Reyes, C. 2024. Manejo del riego en la Patagonia occidental (Región de Aysén). Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación INIA Tamel Aike, Coyhaique, Región de Aysén, Chile. Boletín Técnico N° 499, 204 pp.

Digitalización, Apoyo Gráfico, Diseño y Diagramación:

Gabriel Quilahuilque Márquez

INIA Tamel Aike

Abril 2024

Índice

Introducción	4
Capítulo 1:	7
Caracterización agroclimática de la Patagonia occidental	
Capítulo 2:	23
Suelos y relaciones hídricas en la Patagonia occidental	
Capítulo 3:	57
Parámetros para la gestión del riego en praderas	
Capítulo 4:	81
Sistemas de riego por aspersión para uso en praderas	
Capítulo 5:	101
Experiencias de riego de praderas en la Región de Aysén	
Capítulo 6:	143
Uso de sistemas de teledetección en riego de praderas de la Patagonia	
Capítulo 7:	161
Evaluación técnico-económica de sistemas de riego para Aysén: Estudio de casos	
Capítulo 8:	189
Uso de la plataforma web riegoaysen.cl	
Referencias	201

Introducción

Es habitual escuchar que la zona austral de Chile y, particularmente, la Región de Aysén, poseen enormes reservas de agua dulce a nivel hemisférico. Lo anterior, acompañado de poseer algunos climas con regímenes caracterizados por muy alta pluviometría. No obstante, el análisis de antecedentes meteorológicos en la zona muestra que estos climas están cambiando y que no escapan a la tendencia observada en otras partes del país y el mundo.

Las precipitaciones están disminuyendo y ello se está reflejando en las lluvias de la primavera y, especialmente, del verano. En la última década, a pesar de la variabilidad interanual esperable, las precipitaciones en estas estaciones han declinado significativamente, lo que ha llevado a reportar que, de las últimas diez temporadas de crecimiento vegetal, al menos siete han mostrado diferentes déficits hídricos, en particular, en los meses de verano. Es más, en la última década se han presentado los veranos más secos del registro histórico meteorológico disponible en varias estaciones regionales, de 65 años.

El crecimiento de praderas y cultivos en la región de Aysén es muy estacional, extendiéndose aproximadamente entre mediados de octubre a mediados de abril. Es algo más extendido en la zona occidental, y más reducido en la parte oriental de la región. Es decir, se generan al menos seis meses del año en que no hay crecimiento vegetal y ello impone ciertas limitaciones a los sistemas agropecuarios, especialmente de tipo ganadero. Para los sistemas ganaderos resulta fundamental reservar parte del forraje acumulado en primavera-verano, para su consumo en el período de otoño-invierno. La conservación de forraje está presente en casi todos los predios ganaderos regionales y permite ese traslado de forraje entre estaciones del año y así alimentar adecuadamente al ganado durante todo el año.

Las características térmicas y pluviométricas de la primavera y el verano tendrán entonces un efecto directo sobre la cantidad y calidad de forraje que sea factible conservar en cada temporada. Primaveras muy frías y veranos muy secos afectarán el crecimiento de praderas y cultivos, generando cosechas de forraje insuficientes para mantener los sistemas con las cargas animales normales, lo que produce desequilibrios y trastornos al resultado final del negocio ganadero.

En base a la problemática anterior, en 2019 se presentó el proyecto "Uso del agua en sistemas ganaderos vulnerables: estrategia de adaptación al cambio climático en Aysén" al Concurso de Bienes Públicos para la Competitividad de Innova-Corfo, el que se desarrolló entre 2020 y 2024 en la Zona Intermedia y Zona de Estepa de la Región de Aysén.

A través de este proyecto se pretendió posicionar el tema hídrico en la región, junto con generar información base necesaria para conocer y manejar el agua en el suelo, conocer los efectos de incorporación de riego en praderas y cultivos con temporadas de diferentes características y poner dicha información en una plataforma web pública, la que se denominó riegoaysen.cl. Junto a lo anterior, se aportó a la formación de capacidades técnicas locales en el ámbito del riego, proceso que debe continuar y profundizarse. Asimismo, como el riego tiene un carácter estratégico y sus efectos varían según las características de cada primavera y verano, se realizaron evaluaciones técnico-económicas, para modelar la factibilidad de instalar sistemas de riego en cada zona estudiada. El presente boletín resume los resultados obtenidos en este proyecto.

Coyhaique, mayo de 2024



Capítulo 1

Caracterización agroclimática de la Patagonia Occidental

Christian Hepp K.

Introducción

La Región de Aysén es la tercera más extensa del país, con más de 10,85 millones de hectáreas de superficie total (14,3 % de superficie continental de Chile). Se extiende desde los 43° 38' hasta los 49° 16' de latitud sur, con más de 600 km de distancia entre sus extremos, en línea recta. Se caracteriza por una topografía montañosa y una costa desmembrada con un amplio y complejo sistema de archipiélagos, separados por canales y fiordos. Su orografía está definida por los Andes Patagónicos, que componen la sección austral de la Cordillera de Los Andes. En esta región, los Andes Patagónicos generan dos condiciones climáticas muy definidas, dadas por las vertientes occidental (lluviosa) y oriental (más seca).

En la vertiente occidental de la cordillera se ubica la denominada Zona Húmeda, donde predomina el bosque siempreverde, mientras que en la vertiente oriental se ubica la Zona Intermedia con una transición hacia la Zona de Estepa, ubicada cerca de la frontera con la República Argentina.

Climas de Aysén

Clasificación según Koeppen (1918)

De oeste a este, en la Región de Aysén es posible encontrar diferentes climas:

- Templado húmedo litoral (Cfbni), caracterizado por muy altas precipitaciones, que en ciertas zonas pueden superar los 4.000 mm anuales. Tiene una fuerte influencia oceánica y es el predominante en la zona de fiordos, con una temperatura media anual que supera los 10 °C. Las islas y zonas costeras tienen sólo muy pequeñas superficies con suelos con potencial agropecuario y dominan los humedales y bosque nativo siempreverde.
- Templado húmedo costero (Cfbn), presenta también altas precipitaciones (1.500-3.000 mm anuales) y una temperatura media anual de 9 °C. Corresponde a sectores

de la vertiente occidental de Los Andes, en valles angostos, cubiertos parcialmente de bosque siempreverde y zonas con habilitación de suelos para ganadería. La temporada de crecimiento de praderas en esta zona se extiende habitualmente entre inicios de septiembre y fines de abril (7-8 meses).

- Templado Húmedo Intermedio (Cfb), cubre zonas de la vertiente oriental de la Cordillera Patagónica, con precipitaciones en el rango de 800-1.200 mm y temperatura media anual de 8 °C. Tiene una mayor influencia continental y se caracteriza por mayores amplitudes térmicas entre estaciones del año. El invierno es frío y con caída de nieve, mientras que el verano es más seco y cálido que la zona occidental. Los sectores de potencial agropecuario se sitúan en valles algo más amplios y con mayor superficie habilitada para el desarrollo de actividades agropecuarias. El bosque predominante es caducifolio, dominado por lenga (*Nothofagus pumilio*) y ñire (*N. antártica*) en sectores más húmedos o transicionales a la estepa. En esta zona climática se encuentran los predios con mayor potencial productivo. Los veranos habitualmente presentan meses secos, donde la restricción hídrica puede llegar a afectar fuertemente la producción de las praderas. La temporada de crecimiento, según ubicación, se extiende habitualmente entre octubre y fines de marzo (6 meses).

- Andino Boreal, en sus componentes templado y frío (Cfc), el primero en zonas más bajas (< 600 metros sobre el nivel del mar (msnm)) y el segundo a mayor altitud, hasta los 1.200-1.300 msnm, zona en la que se encuentra el límite vegetacional. Esta condición se caracteriza por menores temperaturas y precipitaciones en forma de nieve, con una temporada de crecimiento más corta (4-5 meses). Aquí se encuentran las denominadas "veranadas".

- Templado Seco Estival (Csb), también conocido como "microclima", ya que se ubica en sectores acotados asociados a grandes lagos, como General Carrera, Cochrane y O'Higgins. Se caracteriza por bajas precipitaciones, especialmente invernales, de entre 250-400 mm anuales. Las temperaturas son más templadas, especialmente en verano, el cual se presenta habitualmente muy seco. La producción agropecuaria se debe sustentar en el riego. A pesar de las condiciones templadas, son habituales las heladas de primavera y los cultivos sensibles requieren de control adecuado.

- Clima de Estepa Fría (Csc), se encuentra en las zonas orientales, cercanas al límite con Argentina. La precipitación varía de 400-700 mm aproximadamente y con una temperatura media anual de 6 °C o menos. La vegetación dominante es el coirón en zonas semi-planas y extensas, donde se desarrolla ganadería extensiva, especialmente con ovinos. También se presenta bosque achaparrado de ñire y zonas de valles más húmedos, conocidos como "mallines". Los veranos son secos y los inviernos muy fríos, por lo que el crecimiento vegetal es restringido. En esta zona se han desarrollado proyectos de riego, especialmente para establecer alfalfa con latencia invernal, con buenos resultados productivos.

Régimen térmico

Los diversos climas presentes en la Región de Aysén tienen regímenes de temperatura que los distinguen. Si bien esta región se encuentra en la Zona Austral de Chile y se caracteriza por una condición fría, hay fuertes contrastes estacionales y también entre zonas climáticas.

Coyhaique (Zona Intermedia)

La estación meteorológica de Teniente Vidal de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) es representativa de la condición térmica de la Zona Intermedia de Aysén. Posee un registro de 65 años a la fecha. El Cuadro 1.1 muestra los parámetros de temperaturas de esta estación, como promedio de los últimos 30 años. Con una temperatura promedio anual de 8,3 °C, corresponde a una zona fría. La temperatura media tiene una amplia variación en el año, registrando un mínimo de 2,3 °C en julio y un máximo de 14 °C en enero y febrero, con una diferencia de 11,7 °C entre el mes más cálido y aquel más frío. La amplitud térmica promedio del año es de 9,2 °C. La temperatura mínima media del mes más frío (julio) es de -0,3 °C y de 8,9 °C en enero. La máxima media del mes más cálido (febrero) es de 20,6° C, mientras que llega a 6 °C en julio. En cuanto a temperaturas absolutas (promedio de 30 años), la mínima se registra en el mes de julio, con -9,5 °C (hay años en que llega a -20° C) y se presentan temperaturas bajo cero entre marzo y octubre, aunque en años particulares pueden ocurrir en casi cualquier mes del año, pero más frecuentemente en noviembre. Esto deja un período libre de heladas de 3-4 meses. La temperatura máxima absoluta promedio más alta se registra en febrero con casi 30 °C, mientras que solo llegan a alrededor de 12 °C en junio y julio. La temporada de crecimiento vegetal más significativo en esta zona se extiende desde el mes de octubre hasta fines de marzo, es decir, de 5-6 meses.

Cuadro 1.1. Temperaturas medias, mínimas y máximas mensuales (°C) de la localidad de Coyhaique (Zona Intermedia). Promedio 30 años (1995-2024). Elaborado en base a datos de la estación Teniente Vidal (DMC).

T° promedio °C	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
Media	14,0	14,0	11,2	8,3	5,4	2,6	2,3	3,8	6,0	8,5	10,6	13,0	8,3
Mínima media	8,9	8,6	6,8	4,6	2,6	0,1	-0,3	0,9	2,2	4,0	5,8	7,9	4,3
Máxima media	19,7	20,6	17,3	13,8	9,6	6,1	6,0	8,4	11,6	14,0	16,1	18,5	13,5
Mínima absoluta	2,9	2,4	-0,8	-2,8	-4,9	-8,0	-9,5	-5,2	-3,8	-1,8	0,1	2,1	
Máxima absoluta	28,2	29,6	25,6	20,6	16,3	11,9	12,5	13,8	17,9	21,5	24,6	27,0	

Balmaceda (Zona de Estepa)

Los datos que se presentan en el Cuadro 1.2 corresponden a la estación DMC Balmaceda, ubicada en la Zona de Estepa de la Región de Aysén. Ésta cuenta también con un registro desde el año 1960 (65 años), lo que permite estudiar el comportamiento de diferentes variables meteorológicas y caracterizar el clima predominante.

Cuadro 1.2. Temperaturas medias, mínimas y máximas mensuales (°C) de la localidad de Balmaceda (Zona de Estepa). Promedio 30 años (1995-2024). Elaborado en base a datos de la estación Balmaceda (DMC).

T° promedio °C	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
Media	12,6	12,4	9,6	6,7	3,8	0,9	0,5	2,2	4,6	7,1	9,3	11,5	6,8
Mínima media	7,2	6,7	4,9	2,6	0,6	-1,8	-2,3	-0,9	0,6	2,4	4,4	6,3	2,6
Máxima media	18,7	19,5	16,3	12,7	8,5	4,8	4,4	6,9	10,3	13,0	15,1	17,4	12,3
Mínima absoluta	-1,0	-2,6	-5,8	-7,8	-9,8	-12,7	-14,5	-9,4	-7,6	-5,9	-3,2	-1,4	
Máxima absoluta	26,8	28,5	24,7	19,9	14,8	10,5	10,3	12,4	16,7	20,5	23,3	25,6	

La Zona de Estepa se ubica en la zona oriental, cercana al límite con Argentina y cuenta con un clima frío, con una temperatura media anual de solo 6,8 °C (promedio 30 años). La temperatura media del mes más cálido (enero) es de 12,6 °C y de 0,5 °C en el mes más frío del año (julio), con una diferencia entre ambos de 12,1 °C. Por su parte, la amplitud térmica promedio anual es de 9,7 °C. La temperatura máxima media se registra en el mes de febrero, con 19,5 °C, mientras que la mínima media más baja ocurre en el mes de julio, con -2,3 °C. En cuanto a temperaturas extremas, la mínima absoluta del mes más frío es de -14,4 °C (promedio 30 años), mientras que la máxima absoluta promedio del mismo período ocurre en febrero y es de 28,5 °C. De esta forma, en cualquier mes del año pueden ocurrir heladas. La condición de clima frío en esta zona reduce la temporada de crecimiento vegetal significativo a solo 4-4,5 meses.

Cochrane (Zona Sur)

La Zona Sur de la Región de Aysén, representada en este caso por la estación DMC de la localidad de Cochrane, comparte algunas características climáticas con la Zona Intermedia, pero se diferencia en términos de suelos, vegetación, invierno algo más frío y también menor pluviometría. En el Cuadro 1.3 se muestran las temperaturas promedio (30 años) registradas en Cochrane, donde la media anual es de 8,2 °C, con un promedio de 14,4 °C en enero y febrero y 1,3 °C en el mes de julio, estableciéndose una diferencia de 13,1 °C entre estos extremos. La temperatura mínima media anual es de 3,3 °C y la máxima media de 13,7 °C, con una amplitud térmica promedio anual de 10,4 °C. La temperatura mínima media del mes más frío (julio) es de -1,8 °C, mientras que la máxima media del mes más cálido (febrero) alcanza 21,3 °C. Las mínimas absolutas son cercanas o bajo cero grados entre marzo y noviembre, lo que restringe

el período libre de heladas a solo 3 meses. La mínima absoluta promedio de 30 años alcanza $-8,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en julio, mientras que la máxima absoluta promedio es de $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ en febrero. La temporada de crecimiento efectiva se extiende por aproximadamente 5 meses y está generalmente más limitada por el régimen pluviométrico.

Cuadro 1.3. Temperaturas medias, mínimas y máximas mensuales ($^{\circ}\text{C}$) de la localidad de Cochrane (Zona Sur). Promedio 30 años (1995-2024). Elaborado en base a datos de la estación Cochrane (DMC).

T° promedio $^{\circ}\text{C}$	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
Media	14,4	14,4	11,4	8,0	4,5	1,5	1,3	3,4	6,4	8,8	11,1	13,2	8,2
Mínima media	8,2	8,0	5,7	3,2	0,9	-1,5	-1,8	-0,5	1,4	3,3	5,3	7,4	3,3
Máxima media	20,7	21,3	17,9	13,6	8,8	5,0	5,0	8,1	12,2	15,0	17,2	19,3	13,7
Mínima absoluta	3,1	2,7	0,1	-2,1	-4,8	-7,1	-8,5	-5,4	-3,3	-1,7	-0,2	2,4	
Máxima absoluta	28,2	29,0	25,0	20,3	15,3	11,8	11,7	13,6	17,9	21,5	24,2	26,3	

La Junta (Zona Húmeda)

La Zona Húmeda, por su ubicación en la vertiente occidental de la cordillera, recibe la influencia marítima con precipitaciones abundantes producto de los frentes que provienen del oeste (Océano Pacífico). Esta zona se encuentra en una amplia extensión territorial desde el límite norte regional prácticamente hasta los campos de hielo. En este caso se utiliza la estación meteorológica de la localidad de La Junta (red INIA), ya que la estación Puerto Aysén (DMC), a pesar de tener mayor amplitud histórica de registros, presenta en ciertos años información muy discontinua que dificulta el análisis. La estación La Junta se ubica en la comuna de Cisnes, en la parte norte de la denominada Zona Húmeda y cuenta a la fecha con siete años de registros.

Cuadro 1.4. Temperaturas medias, mínimas y máximas mensuales ($^{\circ}\text{C}$) de la localidad de La Junta (Zona Húmeda). Promedio 7 años de registro (2017-2024). Elaborado en base a datos de la estación La Junta (INIA).

T° promedio $^{\circ}\text{C}$	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
Media	14,1	15,3	12,7	10,1	7,3	4,5	4,4	5,5	7,1	8,9	11,3	13,4	9,5
Mínima media	8,0	8,0	6,8	6,0	3,9	1,5	1,4	2,0	2,8	3,8	5,9	7,7	4,8
Máxima media	20,2	20,5	17,0	14,2	10,6	7,4	7,4	9,1	11,5	14,1	16,8	19,0	14,0
Mínima absoluta	9,3	9,5	8,0	6,5	2,3	0,0	0,6	2,4	3,4	4,3	7,6	8,9	
Máxima absoluta	19,4	20,3	14,9	12,8	10,9	8,1	7,3	8,0	9,2	12,6	14,2	16,5	

La temperatura media anual registrada en La Junta es de $9,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, con una mínima media anual de $4,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ y máxima media anual de $14\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que genera una amplitud térmica anual de $9,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Cuadro 1.4). La temperatura mínima media del mes más

frío (julio) es de 1,4 °C, mientras que la máxima media del mes más cálido (febrero) llega a 20,5 °C. Se aprecia que las temperaturas mínimas medias en invierno son notoriamente más altas que en las otras zonas, aunque limitan el crecimiento vegetal entre mayo y julio, aproximadamente. Ya en agosto, la temperatura máxima media supera 9 °C y se produce crecimiento en las praderas. Por este motivo, la temporada de crecimiento vegetal en esta zona es más larga que en el resto de la región, extendiéndose por 8-9 meses.

Tendencias de la temperatura (Coyhaique)

Con la disponibilidad de datos de series relativamente largas de años (65 años) en la estación de Coyhaique (DMC), es interesante evaluar el comportamiento de las temperaturas en el contexto de cambio climático que se está observando. Por este motivo, se analizaron las temperaturas de diferentes series de años para observar posibles cambios que se estén produciendo. Se analizaron tendencias de temperaturas medias, mínimas y máximas. Donde se aprecian más diferencias en el tiempo es en la temperatura máxima media y máxima absoluta promedio. Existe una tendencia de que las primaveras y especialmente los veranos sean más cálidos.

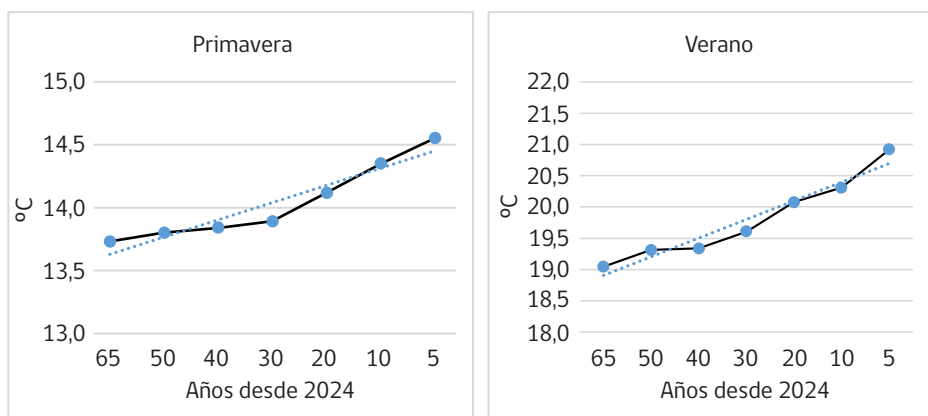


Figura 1.1. Tendencia de la temperatura máxima media (°C) de la primavera y verano en Coyhaique, considerando diferentes rangos de años desde 2024. Elaborado en base a datos de estación DMC Teniente Vidal (Coyhaique).

La Figura 1.1 muestra los cambios que ha mostrado la temperatura máxima promedio al analizar diferentes series de años, desde la serie completa de 65 años hasta solo los más recientes, tanto en la primavera climatológica (septiembre a noviembre) como en el verano (diciembre a febrero). En la primavera se aprecia que, especialmente a partir

de los últimos 30 años, se ha producido un alza sostenida en la temperatura máxima media en Coyhaique y que ello se intensifica al considerar series de años más recientes. Si se tiene en cuenta la temperatura máxima promedio de los últimos 30 años y se compara con la de los últimos 5 años, hay un alza de 0,8 °C. En el verano se observa un aumento lineal de la temperatura máxima media en la medida que se van considerando series de años más recientes. Hay una diferencia de prácticamente 1,5 °C si se observa la serie de los últimos 30 años versus el último lustro en la localidad de Coyhaique.

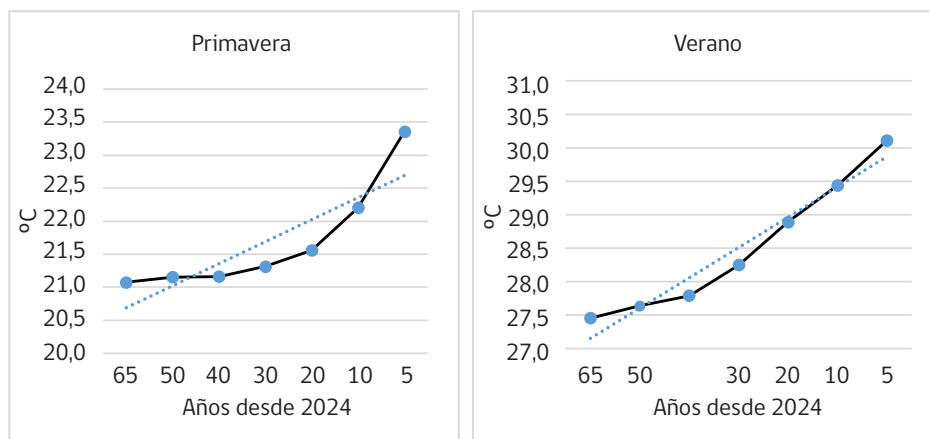


Figura 1.2. Tendencia de la temperatura máxima absoluta (°C) de la primavera y verano en Coyhaique, considerando diferentes rangos de años desde 2024. Elaborado en base a datos de estación DMC Teniente Vidal (Coyhaique).

Al considerar el comportamiento de las temperaturas máximas absolutas (Figura 1.2), también se aprecian cambios relevantes en el tiempo, con mayor incidencia de temperaturas extremas en años más recientes, tanto en primavera como en verano.

El Cuadro 1.5 muestra los promedios de temperaturas máximas medias y absolutas de primaveras y veranos de las últimas tres décadas. En la máxima media de primavera se aprecian aumentos en los últimos 13 años, con un aumento de 0,8 °C, mientras que la máxima absoluta promedio de esta estación se incrementa en 1,2 °C desde la década del 90. En el verano, el promedio de la máxima media de la década del 90 fue de 18,3 °C, que se incrementó a 20,2 °C en la década reciente, es decir, un aumento de 1,9 °C. Las temperaturas máximas absolutas promedio de la década de 1990 fueron de 26,6 °C, mientras que en 2011-2013, aumentaron a un promedio de 29,2 °C, es decir 2,6 °C más. Lo anterior muestra que tanto las primaveras y, especialmente, los veranos están siendo más cálidos respecto a décadas pasadas. Al parecer, la incidencia de temperaturas altas extremas está mostrando el mayor cambio.

Cuadro 1.5. Promedios de temperatura máxima media y absoluta de primavera y verano en las tres décadas más recientes. Elaborado en base a datos de la estación DMC Teniente Vidal.

Período	T° máxima media década		T° máxima absoluta promedio década	
	primavera	verano	primavera	verano
1991-00	13,5	18,3	20,6	26,6
2001-10	13,6	19,3	21,0	27,6
2011-23	14,3	20,2	21,8	29,2

Régimen Pluviométrico

Pluviometría en diferentes zonas

En el Cuadro 1.6 se resume la pluviometría mensual de cuatro estaciones de la Región de Aysén, representativa de diferentes zonas agroclimáticas (promedio de los últimos 30 años; 7 años en La Junta).

La Zona Intermedia (estación Coyhaique) presenta un promedio anual de 1.025 mm, siendo junio el mes más lluvioso y febrero el más seco. Las mayores precipitaciones se concentran en otoño-invierno (Cuadro 1.7), mientras que, en promedio, la primavera reúne 18 % y el verano 14 % de la lluvia anual. En esta zona también son frecuentes las precipitaciones sólidas, las cuales se concentran en invierno y en los sectores de mayor altitud.

Cuadro 1.6. Datos históricos de precipitación mensual (mm) de cuatro localidades representativas de zonas climáticas contrastantes de la Región de Aysén. Elaborado en base a datos de estaciones DMC Teniente Vidal (Coyhaique), DMC Balmaceda, DMC Cochrane y La Junta (INIA).

Localidad	Años	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
Coyhaique	30	59	44	75	97	121	143	126	118	60	69	60	54	1.025
Balmaceda	30	25	20	38	50	69	80	70	58	31	34	29	22	529
Cochrane	30	36	34	51	73	95	90	78	79	32	56	42	39	703
La Junta	7	123	128	219	316	364	425	372	383	251	233	232	214	3.245

Para la Zona de Estepa se considera la estación Balmaceda, que tiene un promedio anual de 529 mm, con una distribución estacional similar a la de la Zona Intermedia, pero con mucha menos precipitación total. La estación de Cochrane representa a la Zona Sur de Aysén, con una precipitación promedio de 703 mm anuales, también presentando cerca de un tercio de las lluvias en la temporada de crecimiento (septiembre-febrero), mientras que el resto cae en otoño e invierno.

Cuadro 1.7. Precipitación promedio estacional (mm) de cuatro localidades representativas de zonas climáticas contrastantes de la Región de Aysén. Elaborado en base a datos de estaciones DMC Teniente Vidal (Coyhaique), DMC Balmaceda, DMC Cochrane y La Junta (INIA).

Localidad	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
Coyhaique	189	142	293	387
Balmaceda	94	78	157	208
Cochrane	129	104	218	248
La Junta	715	344	898	1.180

Finalmente, la estación La Junta pertenece a la denominada Zona Húmeda de Aysén, promedia 3.245 mm anual en el período 2017-2023 (siete años). Esta zona presenta lluvias mucho más significativas en primavera y verano, superando los 1.000 mm en este período. En promedio, 28 % de las precipitaciones caen en otoño y cerca de 36 % en invierno.

Tendencias de las precipitaciones

La Figura 1.3 muestra la serie de años 1994-2023 y sus respectivas precipitaciones de primavera. Si bien se aprecia una variabilidad interanual, se puede apreciar a lo largo del tiempo una tendencia a la disminución de lluvias estacionales. En los últimos 30 años, la línea de tendencia muestra una disminución desde los 200 mm a cerca de 160 mm en lluvias de primavera.

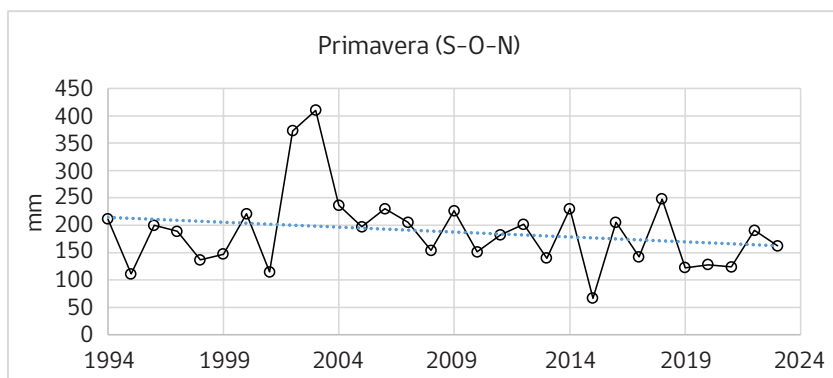


Figura 1.3. Promedio de precipitaciones de primavera en los últimos 30 años en Coyhaique y su tendencia. Elaborado en base a datos de estación DMC Teniente Vidal.

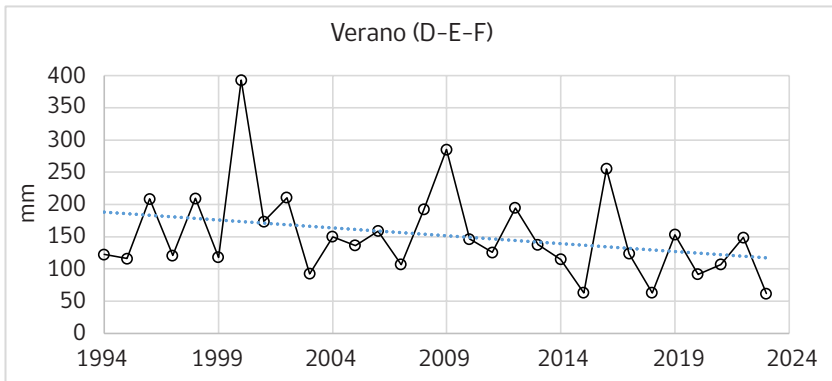


Figura 1.4. Promedio de precipitaciones de primavera en los últimos 30 años en Coyhaique y su tendencia. Elaborado en base a datos de estación DMC Teniente Vidal.

Algo similar se aprecia en la Figura 1.4 para la estación de verano climatológico, que considera los meses de diciembre a febrero. Junto con observarse una variabilidad similar entre años, se puede apreciar que la tendencia en 30 años también es a la baja. Los veranos de 2015-16, 2017-18 y 2023-24 son los más secos en el registro de 30 años.

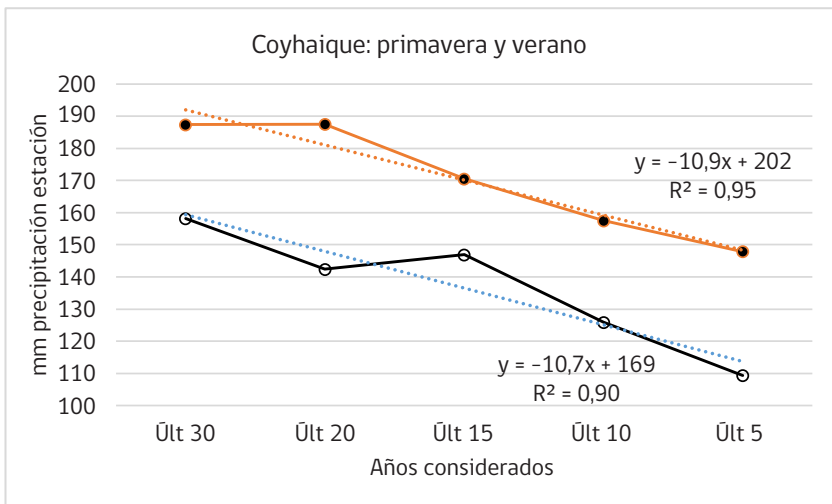


Figura 1.5. Tendencia de las precipitaciones promedio de diferentes rangos de años del registro de los últimos 30 años en Coyhaique. Elaborado en base a de estación DMC Teniente Vidal.

La Figura 1.5 muestra cómo va disminuyendo la precipitación promedio de 30 años al ir considerando rangos de años más recientes, tanto en primavera como en verano, para la localidad de Coyhaique. Por ejemplo, el promedio de 30 años de lluvias de verano es de 158 mm, mientras que en los últimos 10 años llega a 125 mm y a sólo 110 mm al considerar los últimos cinco años. Lo anterior habla de cómo están cambiando las condiciones típicas de este clima y que caracteriza a la Zona Intermedia de Aysén. Similares situaciones están ocurriendo en otras zonas de la región.

Distribución de la precipitación

A pesar de que el total de lluvia caída es un antecedente importante y que permite comparar diferentes años, meses o temporadas particulares, es muy importante considerar también la distribución de la precipitación. Para ello se realizó en este caso un análisis más detallado de los datos y se agruparon las precipitaciones cada 5 días, desde el mes de septiembre de cada temporada hasta el mes de febrero.

En la Figura 1.6 se muestra la distribución de las precipitaciones para tres diferentes temporadas, apreciándose que hay diferencias importantes entre ellas. La temporada 2016-17 presentó una primavera y verano más lluvioso, con una adecuada distribución de eventos de precipitación que superan los 20 mm y que son más efectivos. Esta distribución permite sostener el crecimiento vegetal sin grandes deficiencias. Por otra parte, la temporada 2015-16, que ha sido la más seca en registro, presenta una situación totalmente diferente. Se observa sólo una precipitación que supera los 20 mm (en noviembre) y muy escasa caída de agua en el resto de la temporada. Las consecuencias de esta muy baja precipitación fueron grandes limitaciones al crecimiento vegetal, con graves resultados para la producción agropecuaria de dicha temporada. Más recientemente, la temporada 2023-24 presenta una situación intermedia, con una primavera más húmeda (tres eventos de lluvias > 20 mm), pero posteriormente un verano muy seco, en particular, los meses de diciembre y enero.

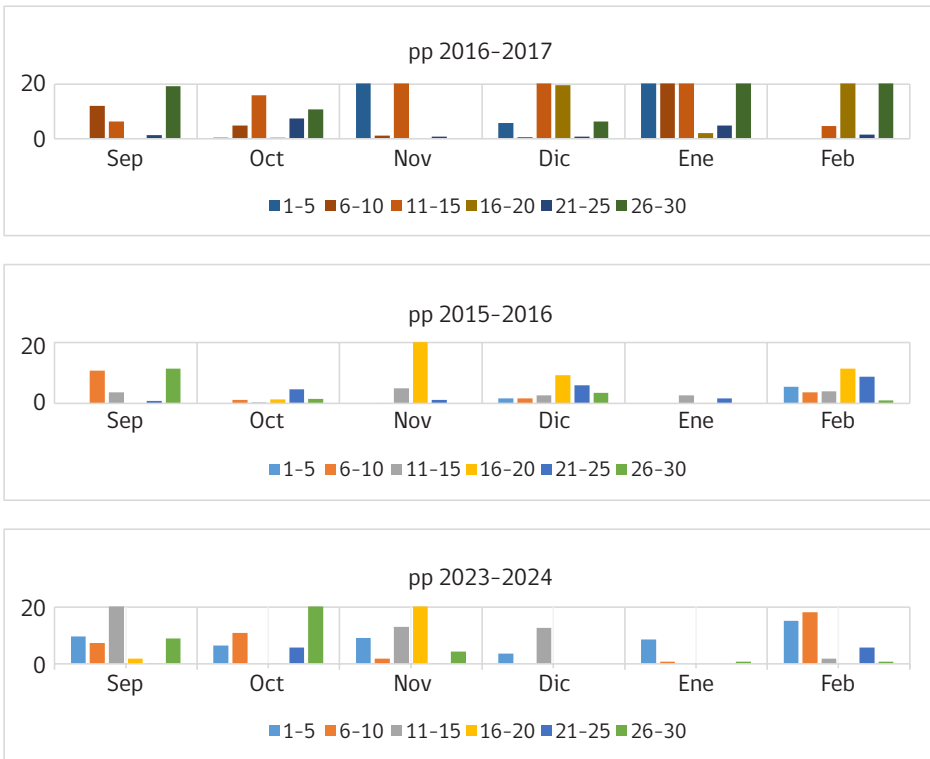


Figura 1.6. Distribución de precipitaciones en los meses de primavera y verano (cada columna representa la precipitación registrada en 5 días) de tres diferentes temporadas. Elaborado en base a datos de estación DMC Coyhaique. Nota: Hay columnas que pueden sobrepasar los 20 mm en 5 días.

Junto con la distribución de las lluvias (“cuándo” llueve), es de gran importancia la intensidad de la precipitación (“cuánto” llueve) en cada evento. Por ello, más que la cantidad total de agua caída en primavera y verano, importa cómo se distribuye y la magnitud de los eventos de lluvia para que ésta sea efectiva.

Hay que considerar que en esta zona, en verano existe una evaporación importante, la que según el mes, puede superar los 5 mm/día, la que se ve agravada por los fuertes vientos que son habituales en este sector. Por ello, precipitaciones menores (generalmente bajo 5 mm/d) no son en realidad “efectivas” y muchas veces no alcanzan a infiltrar en el suelo. Así, es importante analizar la caída pluviométrica en términos de su intensidad. Por ejemplo, la evaporación de bandeja medida en el sector de Valle Simpson (INIA Tamel Aike) en diciembre puede fluctuar entre 3,4-8,1 mm/d, según las características del mes, en enero entre 4,1-5,1 mm/d y en febrero entre 3,0-6,9 mm/d (mediciones promedio en tres temporadas).

Evapotranspiración

La evapotranspiración de referencia (ET_o) es la transferencia de agua desde el suelo a la atmósfera bajo condiciones estandarizadas. Éstas comprenden una cubierta vegetal baja (césped) con cobertura completa del suelo, sin restricción de humedad (a capacidad de campo). Esta medida permite comparar la evapotranspiración en todas las condiciones climáticas del mundo.

Por otra parte, se define la evapotranspiración máxima (ET_{max}) como la transferencia de agua a la atmósfera desde un cultivo o pradera, no necesariamente con cobertura completa del suelo, pero sin restricción hídrica. En estas condiciones, la planta está expresando su máximo potencial de crecimiento para su estado de desarrollo. Esta medida se utiliza como referencia para determinar necesidades de agua.

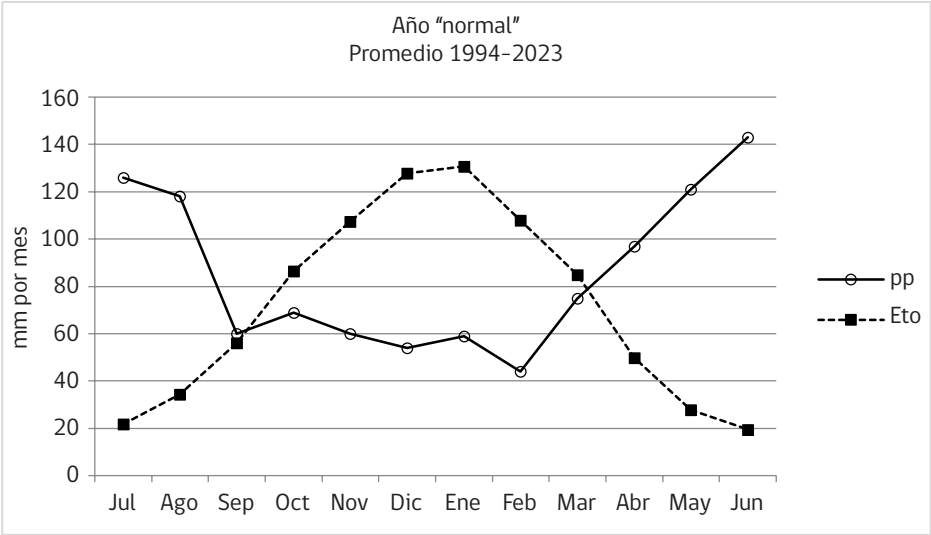


Figura 1.7. Variación de la precipitación (pp) y evapotranspiración de referencia (ET_o) en la localidad de Coyhaique. Elaborado en base a datos promedio 30 años de la estación Teniente Vidal.

Las necesidades de agua de un cultivo o pradera están dados por su capacidad de evapotranspirar (evaporación + transpiración). La evapotranspiración máxima dependerá de la evapotranspiración de referencia para cada etapa de desarrollo, para lo cual se considera la relación ET_{max}/Eto y se denomina “coeficiente de cultivo o K_c”, que es una constante (existen tablas de valores de K_c para diferentes tipos de cultivo y sus etapas de desarrollo).

En condiciones sin déficit hídrico, la evapotranspiración del cultivo (ETc) para diferentes etapas de desarrollo se puede determinar como el producto de la evapotranspiración de referencia y el coeficiente de cultivo (Kc), o sea $ETc = ET_o * Kc$. El riego, lo que busca es que la evapotranspiración real se acerque lo más posible a la evapotranspiración máxima del cultivo.

La Figura 1.7 muestra las curvas de precipitación y evapotranspiración de referencia mensual en una condición promedio de la localidad de Coyhaique, para un ciclo anual.

Balance hídrico

En Coyhaique es "normal" tener al menos 3-4 meses con balance hídrico negativo (generalmente diciembre, enero, febrero y en parte, marzo). En promedio hay un déficit hídrico de 218 mm, lo que equivale a 2.180 m³/ha. Este déficit es respecto del potencial de crecimiento para las condiciones climáticas de la zona y que se podría expresar si, por ejemplo, se contara con posibilidades de riego. Lo anterior quiere decir que, en los meses más críticos, las plantas no pueden expresar su potencial de crecimiento debido a la falta de agua.

En las temporadas con veranos secos, el déficit de humedad es superior y se ve afectado el crecimiento vegetal, especialmente los rebrotes de verano. Hay que considerar que el suelo se comporta como un estanque, con una reserva de agua que se arrastra de invierno y pasa a primavera, agua que es consumida generalmente por el fuerte crecimiento de noviembre/diciembre. Si no hay reposición de agua, producto de precipitaciones estivales (o de riego), las praderas y cultivos verán afectado su crecimiento (especialmente aquellos con arraigamiento más superficial).

El Cuadro 1.8 muestra un balance hídrico simple para la zona de Coyhaique, considerando valores promedio de los últimos 30 años. En este caso se utiliza la capacidad de almacenamiento de agua del suelo volcánico con las características locales, en los primeros 50 cm de profundidad. Se supone que en ese volumen de suelo estará la fracción más significativa de raíces capaces de absorber agua. En caso de cultivos o especies de arraigamiento más profundo, puede considerarse una profundidad mayor. Asimismo, al tratarse de una pradera tipo, se considera aquí un coeficiente de cultivo igual a 1 ($Kc=1$).

Cuadro 1.8. Balance hídrico simple de la localidad de Coyhaique. Datos promedio de precipitación (pp) y evapotranspiración de referencia (ETo) elaborados a partir de datos de estación Teniente Vidal (DMC).

	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Año
Pp (mm/mes)	123	110	68	64	57	58	60	45	69	91	129	135	1008
Eto (mm/mes)	22	34	56	86	108	128	131	108	85	50	28	20	854
pp-Eto (mm)	101	76	12	-23	-51	-70	-71	-63	-16	42	101	115	
Reserva del suelo (mm)	75	75	75	52	2	0	0	0	0	42	75	75	
Variación reserva (mm)	0	0	0	-23	-51	-2	0	0	0	42	33	0	
ETr (real)	22	34	56	86	108	60	60	45	69	50	28	20	636
Falta de agua (mm)	0	0	0	0	0	68	71	63	16	0	0	0	218
Exceso de agua (mm)	101	76	12	0	0	0	0	0	0	0	68	115	372

En ese perfil, este suelo es capaz de almacenar hasta 75 mm de agua aprovechable por las plantas (rango de humedad entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente). Se aprecia que en estas condiciones promedio, el suelo puede suministrar humedad hasta el mes de noviembre. De ahí en adelante, se depende de las precipitaciones, las que pueden suplir sólo parcialmente los requerimientos de crecimiento vegetal (dado por la tasa de evapotranspiración, generándose una brecha entre la evapotranspiración potencial (dada por la condición climática) y la real. De esa forma, entre diciembre y marzo hay un déficit de agua y, recién en abril, el suelo vuelve a reponer su reserva de humedad. En el caso de que se pueda suplementar agua durante el período crítico mediante riego, es posible acercarse al potencial productivo.

Anexo

Evapotranspiración de referencia (mensual/diaria)

Coyhaique (promedios 2017-2023)

Mes	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Promedio (mm/mes)	Promedio (mm/d)
Enero	119,9	142,1	136,8	147,8	142,8	157,6	152	142,7	4,6
Febrero	96,6	120,5	132,4	115,4	144,8	129,5	118,8	122,6	4,4
Marzo	77,6	80,1	91,5	93,2	107,4	81,6	78,9	87,2	2,8
Abril	52,3	46,4	51,5	47	51,3	45,9	54,8	49,9	1,7
Mayo	25,8	28,3	31	26,6	28,4	27,9	33,9	28,8	0,9
Junio	19,6	18,3	18	18,4	19,1	21,8	19,5	19,2	0,6
Julio	23,5	24,8	19	18,7	27,2	20,2	16,9	21,5	0,7
Agosto	33,7	41	39,1	39	35,8	40,4	36,5	37,9	1,2
Septiembre	62	51,3	61,3	63,8	60,3	58,3	56,9	59,1	2,0
Octubre	75,5	92,9	94,9	101,6	97,7	98,8	97,4	94,1	3,0
Noviembre	121,5	112,1	108,4	130,8	124,7	133,4	103,8	119,2	4,0
Diciembre	140	152,4	129,5	142	180,3	135,2	156,9	148,0	4,8
Año	848	910,2	913,4	944,3	1019,8	950,6	926,3	930,4	

Balmaceda (promedios 2017-2023)

Mes	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Promedio (mm/mes)	Promedio (mm/d)
Enero	120,1	141,6	135,1	156,4	150,8	154,7	148,7	143,9	4,6
Febrero	113,1	120,5	132,3	128,8	161,6	124,9	114,6	128,0	4,6
Marzo	85,4	79,4	98,6	109,9	117,6	80,4	80,4	93,1	3,0
Abril	55,4	45,8	53,9	61,8	64,2	46,3	57,7	55,0	1,8
Mayo	28,3	30,9	32,8	36,3	38,4	26,6	31,1	32,1	1,0
Junio	20,7	19,9	19,7	24,2	25,8	21,7	17,9	21,4	0,7
Julio	21,9	21,7	19,5	21,1	33,4	16,6	15,3	21,4	0,7
Agosto	34	39	41,8	41,7	43,5	33,8	29,7	37,6	1,2
Septiembre	58,5	49,2	67,5	70,6	71,8	52,6	51,8	60,3	2,0
Octubre	77	91	106,4	106	102,4	94,1	92,5	95,6	3,1
Noviembre	121	108,8	119,4	140,3	134,3	135,6	101,7	123,0	4,1
Diciembre	135,9	150,5	138,1	149,6	176,4	133,3	153,6	148,2	4,8
Año	871,3	898,3	965,1	1046,7	1120,2	920,6	895	959,6	

Capítulo 2

Suelos y relaciones hídricas en la Patagonia Occidental

Christian Hepp K. y Pier Barattini P.

Introducción

La Región de Aysén es la tercera región más grande de Chile, con una superficie total de casi 11 millones de hectáreas, abarcando desde los 43° 40' y 49° 10' de latitud sur, aproximadamente. Posee una gran dispersión geográfica y una condición orográfica que define diferentes zonas agroclimáticas. Estas zonas están caracterizadas por componer diferentes biomas contrastantes, los que abarcan desde grandes masas forestales de bosque siempreverde en la vertiente occidental de la cordillera de Los Andes, el bosque caducifolio de lenga en la vertiente oriental, hasta las praderas naturalizadas y los pastizales naturales de coirón en las llanuras orientales. Una parte importante de la Región de Aysén está cubierta de masas forestales, no existiendo en estos sectores praderas o grandes masas de plantas herbáceas.

La colonización más significativa de Aysén se inició recién en el siglo XX, época que se caracterizó por grandes incendios forestales para habilitar campos para la ganadería, que afectaron a cerca de tres millones de hectáreas. Junto a ello, se provocaron intensos procesos de erosión, que modificaron sustancialmente el paisaje de muchas zonas hasta la actualidad.

En la Región de Aysén se pueden distinguir cuatro zonas agroclimáticas: Litoral/insular; Húmeda Occidental; Intermedia; y Esteparia. También se puede mencionar una zona con microclima asociada a pequeños sectores ribereños de los grandes lagos.

Este capítulo se centra en las zonas Intermedia y Esteparia de Aysén y sus características generales, pero profundizando en los aspectos físicos de los suelos y su potencialidad para utilizar riego estratégico en los sistemas ganaderos.

Características generales de la Región de Aysén

La zona Intermedia de Aysén abarca la vertiente oriental de Los Andes Patagónicos y considera los valles que se ubican hacia el este de la región. Esta zona presenta varios climas, dependiendo principalmente de la altitud en que se encuentra cada zona, tal como se comentó en el capítulo anterior. Su vegetación original predominante es el

bosque nativo caducifolio de *Nothofagus*, especialmente la lenga (*N. pumilio*), pero también el ñire (*N. antártica*) en sectores más húmedos y en la zona de transición hacia la estepa patagónica. Junto a este bosque hay especies arbustivas, siendo los más frecuentes el calafate, el michay y la zarzaparrilla. Esta fue la zona más afectada por los grandes incendios forestales durante el período de colonización, particularmente la primera mitad del siglo XX.



Figura 2.1. Paisaje habitual en la Zona Intermedia de Aysén, afectada por extensos incendios forestales en el siglo pasado. A través de programas estatales de bonificación, muchos de estos sectores han sido habilitados con limpieza de las palizadas muertas.

Junto con la remoción del bosque por efecto de los incendios (Figura 2.1), en muchos sectores se sembraron especies herbáceas forrajeras, como sustento para el ganado ovino y bovino que fue llegando a la zona. Así se generó una pradera naturalizada, compuesta por especies nobles, como el pasto ovillo (*Dactylis glomerata*), trébol blanco (*Trifolium repens*), poa (*Poa pratensis*), pasto miel (*Holcus lanatus*), además de otras especies, como el diente de león (*Taraxacum officinale*), cerastio (*Cerastium arvensis*), pasto del chanco (*Hypochoeris radicata*). En las últimas décadas, con la introducción de semillas de cultivos y forrajes de otras regiones, se han popularizado y extendido especies malezas como yuyo, bolsita del pastor, romaza, quingüilla, etc.

Con décadas de utilización ganadera en manejos extensivos, en muchos sectores la pradera naturalizada se ha degradado y empobrecido, presentando un bajo valor forrajero. La composición de la pradera está muy ligada a las condiciones de fertilidad del suelo en cada sector (Figura 2.2).



Figura 2.2. Composición botánica de la pradera naturalizada de la zona intermedia: pradera degradada sin fertilizar (derecha) y pradera naturalizada fertilizada con corrección de azufre y fósforo (izquierda).

La zona Intermedia es aquella de mayor potencial ganadero de la Región de Aysén, especialmente por contener la mayor proporción de praderas con alto potencial productivo (Figura 2.3) y contar con suelos donde es posible establecer diferentes tipos de recursos forrajeros, como praderas sembradas, alfalfa, y cultivos forrajeros, como cereales (avena, cebada, trigo, triticale y centeno) y brásicas (nabos, rutabagas, raps forrajero).



Figura 2.3. Sectores con suelos habilitados para la agricultura y ganadería en la zona intermedia de Aysén. En la fotografía la zona de Valle Simpson, cercano a la ciudad de Coyhaique.

Por su parte, la zona Esteparia de Aysén ocupa algunos sectores orientales de la región, en zonas limítrofes con la República Argentina. Esta zona agroclimática se asocia a un bioma de estepa con pastizal de coirones, similar al que se encuentra en Magallanes y Tierra del Fuego, pero comparativamente menos significativo en cuanto a superficie que en dichos casos (Figura 2.4).

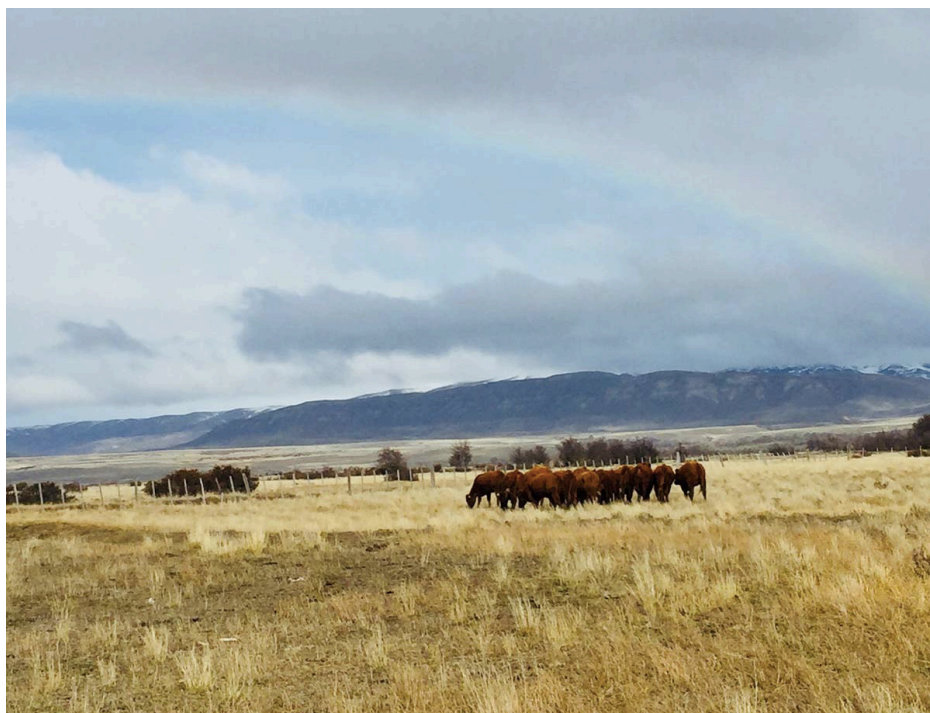


Figura 2.4. Coironales de la zona Esteparia de Aysén, con pastoreo extensivo.

En las localidades más altas de esta zona se puede encontrar el clima andino boreal (Cfc) con características transicionales hacia condiciones más frías, con predominio del bosque de ñire. Sin embargo, domina el clima de estepa fría (Csc), representado por sectores como Balmaceda, Coyhaique Alto, Ñirehuao o Alto Río Cisnes. Son zonas con veranos muy secos y predominancia de fuertes vientos, como se señaló en el capítulo anterior.

El coironal o pastizal de coirón es el único ambiente de herbáceas nativas de la Región de Aysén. Se trata de una comunidad de diferentes especies gramíneas, del tipo festucas (ej. *Festuca pallelescens*) y estipas (*Stipa* spp), entre otras. La condición del coironal es variable según los sitios, dependiendo de las condiciones de humedad y del manejo existente. Estas praderas naturales son utilizadas principalmente por sistemas ovinos extensivos, aunque también bovinos de carne en ciertas zonas.

Estos pastizales se caracterizan por una muy baja producción forrajera y generalmente se utilizan como veranadas, aunque también pueden estar en condiciones algo más húmedas en los bordes de las invernadas de la zona. Si bien las temperaturas estivales son adecuadas para el crecimiento vegetal, la baja humedad del suelo, producto de

escasas precipitaciones en esa época, limita las tasas de crecimiento y, por ello, es que predomina esta comunidad vegetal muy adaptada a las condiciones restrictivas mencionadas. Sin embargo, existen sectores con suelos de buena calidad, donde es factible la implementación de sistemas de riego, en que se reemplaza el coirón por praderas sembradas (especialmente de alfalfa), con posibilidades de lograr altas producciones de forraje.

Aspectos generales de los suelos de la Región de Aysén

Gran parte de la Región de Aysén ha estado sometida a intensa actividad volcánica (prehistórica e histórica). La mayoría de sus suelos se originaron a partir de depósitos de cenizas volcánicas, producto de las sucesivas erupciones. Incluso en épocas recientes, la actividad volcánica ha estado presente, afectando vastas zonas de la provincia de Palena (erupción volcán Chaitén en 2008) y Aysén (erupciones del volcán Hudson en 1971 y 1991).

Desde el punto de vista de su formación, los suelos también poseen influencia de actividad glacial y fluvial muy relevante, considerando que el retiro de los hielos en muchos valles es relativamente reciente y se extiende desde el Neolítico hasta el presente (10-12.000 años).

Producto de estas erupciones repetidas en el tiempo geológico, es habitual encontrar suelos enterrados, es decir, suelos ya formados, los que fueron cubiertos subsecuentemente por nuevas cenizas.

Superficie de suelos

En la Región de Aysén, estudios desarrollados por el INIA Tamel Aike, en asociación con la Universidad de Concepción y el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), estudiaron los suelos, su capacidad de uso y potencial agropecuario. Se determinaron 68 valles productivos, los que variaban en su composición, desde suelos arables y con alto potencial, hasta zonas marginales con escaso valor productivo, pero sujetos muchas veces a ganadería muy extensiva.

En total se clasificaron más de 1,5 millones de hectáreas, lo que corresponde al 13,9 % del total regional. El resto de la superficie son zonas sobre los límites vegetacionales (altas cordilleras), glaciares, ríos y lagos, campos de hielo, cajas de ríos, y zonas cubiertas de bosques de conservación (en general, clase de capacidad de uso VIII).

El Cuadro 2.1 muestra la superficie con potencial agropecuario de la región, detallando la capacidad de uso del suelo y el tipo de vegetación que corresponde. Los suelos arables (clases de capacidad de uso III y IV) representan 126.561 ha (un 8,1 % de la superficie estudiada, pero sólo un 1,2 % del total regional). Algo más de 300.000 ha son praderas, en diferentes condiciones, lo que representa un 19 % de la superficie catastrada (2,8 % del total regional). Es en esta superficie donde se puede desarrollar en forma más amplia la ganadería y donde sería factible lograr las mayores producciones forrajeras. Lo anterior indica también que una parte sustancial de la superficie de potencial agropecuario en la región corresponde a suelos cubiertos con matorrales, bosques de uso ganadero (silvopastoreo), estepas y otros.

Debe considerarse que de las 126.561 ha de suelos clases III y IV, 40.979 ha están cubiertas de bosque y sólo 57.660 ha se encuentran con praderas. De ellas, alrededor de 34.000 ha se encuentran en la Zona Intermedia y es en estos suelos donde se pueden desarrollar praderas y cultivos de mayor potencial productivo. En una fracción de ellas sería factible instalar sistemas de riego, existiendo la disponibilidad de agua adecuada.

Cuadro 2.1. Superficie de potencial agropecuario en la Región de Aysén. Elaborado a partir de información de Hepp y Stolpe (2014/19).

Tipo de vegetación	Superficie ha							Total del estudio (ha)
	III	IV	V	VI	VII	VIII	Otros	
Bosque	108	40.871	53.684	269.026	214.473	73.506	7.414	659.082
Estepa	46	5.379	7.947	136.060	65.887	17.389	1.447	234.155
Humedales	73	2.635	15.779	2.726	681	36	686	22.617
Matorral	133	15.048	21.573	64.634	87.523	29.143	2.815	220.869
Pradera	2.478	55.182	25.969	125.323	69.647	18.309	4.534	301.443
Turbales	0	23	1.489	328	623	168	74	2.705
Otros	105	4.479	7.064	21.065	21.246	23.881	52.675	130.516
Total	2.943	123.618	133.505	619.163	460.081	162.432	69.646	1.571.387

Por otra parte, el mismo Cuadro indica del orden de 136.000 ha de estepas, las que en algunos predios presentan condiciones topográficas adecuadas para el desarrollo de proyectos de riego. Esta zona posee sectores con buenos suelos, pero con una cubierta vegetal muy pobre, producto de la escasa humedad, debida a un régimen pluviométrico muy restringido, especialmente en verano. Por lo tanto, la implementación de riego en estas condiciones posiblemente ofrece los mejores resultados técnico-económicos, por los grandes diferenciales productivos factibles de obtener.

Órdenes de suelos de Aysén

Zona Intermedia

En la zona intermedia de Aysén predomina el orden de suelos denominado Andisoles. Estos suelos son definidos por la FAO como suelos negros de origen volcánico (depósitos de cenizas volcánicas) y representan menos del 1 % de los suelos del mundo. Se ubican en zonas de actividad volcánica actual o histórica (ej. el cinturón de fuego del Pacífico). Secundariamente, se encuentran algunos suelos menos desarrollados como Inceptisoles, generalmente en zonas más marginales.

Los Andisoles de esta zona son suelos relativamente profundos, de texturas livianas (areno-franco, franco arenosos a francos) y con drenaje muy rápido. Su contenido de materia orgánica es relativamente alto (generalmente sobre 15 % en los horizontes superficiales), como también su capacidad de intercambio catiónico.

Sectores característicos de la zona Intermedia son Coyhaique, Valle Simpson, Lago Pollux, Baguales, Las Bandurrias, Villa Castillo, entre otros. También es importante mencionar que hay zonas de transición hacia las zonas agroclimáticas vecinas, particularmente hacia la esteparia. Estas son zonas más secas y/o frías, que comparten algunas características de las señaladas, que resulta en niveles más bajos de producción de las praderas. En estas zonas también existen áreas donde la implementación de sistemas de riego estratégico de praderas pudiera justificarse.

Dentro de este orden de suelos, en esta zona se encuentran especialmente aquellos característicos de zonas húmedas, por lo que se los clasifica, en general, dentro del sub-orden "Udand". Estos suelos se generaron en zonas de depósitos relativamente profundos de cenizas volcánicas, las que se encuentran sobre terrazas aluviales, relativamente planas a onduladas, y sobre depósitos glaciales o de combinación fluvio-glacial.

Según un estudio desarrollado por INIA Tamel Aike y la Universidad de Concepción (UdeC), en términos generales, los Andisoles de esta zona presentan propiedades "ándicas". Estas propiedades incluyen la presencia de vidrio volcánico y pumicita, alta materia orgánica, presencia de arcillas amorfas, alto contenido de agua aprovechable, baja densidad aparente y niveles variables de fijación de fósforo. Todo lo anterior en al menos un 50 % de los primeros 60 cm de profundidad del suelo. En esta zona de Aysén, si bien se trata de suelos profundos, livianos y fértiles, su productividad puede estar parcialmente limitada por estar ubicados en una zona fría y/o en una orografía escarpada en sectores.

Varios de los suelos Andisoles descritos en la zona intermedia pertenecen al gran grupo "Hapludand", que se caracterizan por tener un subsuelo relativamente poco

desarrollado. Es común tener perfiles de suelo con bajo nivel de diferenciación de los horizontes. La mayoría de los suelos se clasifica en la familia “Medial amorphíc”, es decir, suelos volcánicos, generalmente de cenizas medias, con presencia de arcillas amorfas.

Zona Esteparia

Los suelos de la zona de estepa son diversos, pero suelen encontrarse aquellos correspondientes al orden Mollisols. Éstos son suelos muy evolucionados, pero que en este caso no pueden expresar su potencial por las condiciones limitantes de humedad y bajas temperaturas predominantes en esta condición climática fría. Son generalmente de textura franca a franco arcillosa, con pH de 6 o superior, con alta capacidad de intercambio catiónico, sin problemas de saturación de aluminio y bajos niveles de azufre. Sin embargo, la fertilidad parece no ser una limitación determinante en estos suelos, ya que el potencial de crecimiento del pastizal es bajo y no responde habitualmente a la aplicación de nutrientes, por las condiciones agroclimáticas ya señaladas. Es en estos suelos que se encuentran habitualmente pastizales del tipo coirón y/o pastizales más cortos y densos asociados a zonas más húmedas (invernadas). Los Mollisols se han formado, por lo general, a partir de materiales generadores de cenizas volcánicas sobre depósitos glaciales y fluvioglaciales en posiciones topográficas que varían desde terrazas aluviales hasta lomajes ondulados. El suelo superficial es oscuro con buen contenido de materia orgánica y el subsuelo puede tener leve desarrollo de estructura y color hasta mayor desarrollo con estructura fuerte y acumulaciones de arcilla. Estos suelos son naturalmente fértiles, pero su potencial agrícola en la zona es limitado por la escasez estival de agua. El pastoreo extensivo es un buen uso para estos suelos, pero con manejo conservacionista, dado que son susceptibles a erosión hídrica y eólica. En el estudio realizado por INIA-UdeC se describieron ocho suelos del Orden Mollisols en la región.

En algunos casos, con la adecuada disponibilidad de humedad en el suelo, se pueden regar los coironales y establecer praderas mixtas o alfalfa, alcanzándose altos rendimientos. En dichos casos, la fertilización y eventualmente el riego, pasan a ser de gran importancia. Localidades características de la zona de estepa en Aysén son Balmaceda, Coyhaique Alto, Ñirehuao, El Ceballo y Alto Río Cisnes.

Principales características químicas de los suelos de Aysén

El Centro de Investigación INIA Tamel Aike procesa una proporción importante de las muestras de suelo que se analizan anualmente en la Región de Aysén. Estas muestras provienen de diferentes zonas agroclimáticas y los resultados analíticos permiten a los productores y asesores determinar los requerimientos de fertilización de las praderas y cultivos. En paralelo, producto de los requerimientos de diferentes unidades experimentales y proyectos, se complementa la información analítica de los suelos.

En base a dichos antecedentes, en 2017 se procedió a analizar la información registrada en el laboratorio de INIA Tamel Aike, con un total de más de 9.500 muestras de suelo y más de 45.000 análisis de suelo.

El Cuadro 2.2 resume los resultados encontrados, para los diferentes macronutrientes y otras variables relacionadas con la fertilidad de suelos.

En ese cuadro se aprecia que los niveles de **fósforo disponible** (Olsen) son, en general, medios a bajos, aunque son algo superiores en la zona Intermedia Sur. En la zona Intermedia Norte los valores son bajos, mientras que son intermedios en la Zona Intermedia Central. La variabilidad de los niveles de fósforo es elevada y en una misma zona puede diferir mucho, dependiendo sobre todo del manejo e historial de fertilización. En todo caso, en el tiempo han tendido a mejorar los índices generales de fósforo en los suelos, producto de la masificación de tecnología de fertilización y apoyo gubernamental con programas de fomento/subsidio. Estos rangos medios de fósforo disponible deben llegar a 20-25 mg/kg para alcanzar luego niveles de mantención. Si se consideran diferentes valles de interés agropecuario, la mitad de los valles mostraron niveles promedio bajo 15 mg/kg y más de un cuarto estuvo bajo 10 mg/kg. Sólo una fracción (16 %) tuvo en promedio sobre 20 mg/kg.

Cuadro 2.2. Promedios de concentración de nutrientes disponibles (NPKS), niveles de pH y porcentaje de materia orgánica, en suelos de la Región de Aysén, según zonas agroclimáticas. Muestras a 20 cm profundidad. Promedios acotados de >45.000 análisis realizados en INIA Tamel Aike. Hepp y Stolpe (2014/19).

Zona	Cantidad de análisis	N	P	K	pH	MO	S
		mg/kg	mg/kg	mg/kg		%	mg/kg
Estepa	464	20,0	18,0	267,0	6,1	10,1	3,1
Húmeda central	1179	24,8	10,1	137,4	5,7	14,0	2,9
Húmeda norte	1011	36,0	11,1	127,2	5,4	18,4	3,1
Húmeda sur	271	15,8	11,9	107,4	5,5	11,3	2,3
Intermedia central	5341	17,1	17,5	211,3	6,1	11,6	2,8
Intermedia norte	238	17,8	9,9	125,6	5,8	13,5	2,6
Intermedia sur	615	18,2	21,8	205,3	6,0	11,2	3,2
Perilacustre Lago General Carrera	420	15,5	15,8	228,2	6,5	5,1	5,0
Total muestras	9539						

Se han realizado diferentes muestreos de suelos para determinar otras variables importantes para caracterizar la fertilidad de los suelos. Es el caso de la **retención de fósforo** (o capacidad de intercambio aniónico). En la zona intermedia, los valores de retención de fósforo se sitúan habitualmente en rangos medios, de entre 52-65 %.

Otra variable es la **capacidad tampón de fósforo**, conocida como "CP", que mide la cantidad de fósforo que es necesario aportar para aumentar en 1 mg/kg (=ppm) el nivel de P-Olsen del suelo. En el caso de la zona intermedia (central y sur) los valores fluctuaron entre 11,9 y 20,8 kg de P/ppm.

En cuanto al **potasio disponible**, éste se encuentra, en promedio, en niveles adecuados en la zona Esteparia e Intermedia Central y Sur (>200 mg/kg). En otras zonas es habitualmente deficitario y muchas veces debe aplicarse en las fórmulas de fertilización.

La deficiencia de **azufre** es la más frecuente en muchas zonas de Aysén. Se encuentra en niveles bajos a muy bajos en todas las zonas analizadas. En la mayoría de los casos el azufre debe considerarse en las dosis de fertilización en praderas y cultivos, ya que su deficiencia limitará también la respuesta a los demás nutrientes. El azufre disponible se encuentra en el suelo en formas muy solubles y móviles, como es el anión sulfato, por lo que está muy sujeto a pérdidas por lixiviación. El 75 % de los valles analizados presentó promedios de azufre disponible de 3 mg/kg o menos.

El **nitrógeno** es un elemento esencial para los vegetales y es determinante en el rendimiento de las praderas y cultivos. El nitrógeno se encuentra en grandes cantidades en el suelo, sin embargo, la mayoría se encuentra en formas orgánicas, no disponibles para ser absorbidas. El **nitrógeno disponible** mide los niveles de nitrato y amonio en la solución del suelo y representa sólo una pequeña fracción del nitrógeno total. De manera similar a lo que ocurre con el sulfato, el nitrato también se pierde fácilmente por lixiviación, lo que es común en suelos livianos de drenaje rápido como estos suelos volcánicos. Antecedentes de análisis de nitrógeno en suelos de la zona Intermedia indican promedios de 26-28 mg/kg (medios) en la zona Intermedia norte y sur, y tienden a ser algo mayores en la zona Intermedia central (más cercanos a 40 mg/kg). En todo caso, como ya se indicó, estos valores son muy variables y dependen mucho de la época de muestreo, el tratamiento de la muestra y pueden variar mucho en un mismo período de tiempo.

Los suelos de Aysén presentan valores de **acidez (pH)** variables, dependiendo de la zona agroclimática que se trate. En la zona Intermedia (central y sur) los rangos de pH son ligeramente ácidos, mientras que en la zona Intermedia norte están en el rango moderadamente ácido, llegando hasta fuertemente ácido en zonas más húmedas.

La **materia orgánica (MO)** de los suelos de Aysén es, en general, bastante alta, salvo en sectores de baja pluviometría, como ciertas áreas de la zona Esteparia, Intermedia Sur y de Microclima. Muchos suelos superan el 15 % de MO, pero la mayoría se sitúa en el rango 10-15 %.

El complejo de intercambio del suelo repone iones y tiende a mantener así el equilibrio de cargas. Los nutrientes que se encuentran en el complejo de intercambio están

potencialmente disponibles para las plantas. El número de sitios de carga negativa en el complejo de intercambio se conoce como la **capacidad de intercambio catiónico (CIC)**. Los cationes calcio, magnesio, potasio y sodio se conocen como cationes alcalinos y su suma se conoce como “suma de bases”, mientras que el aluminio e hidrógeno corresponden a cationes ácidos. Análisis de suelos realizados en la zona Intermedia mostraron promedios para la capacidad de intercambio catiónico con niveles de calcio de 7,3–10,2 cmol (+)/kg, magnesio de 1,3–1,6 cmol (+)/kg, potasio de 0,5–0,6 cmol (+)/kg y sodio de 0,1 cmol (+)/kg. Esto indicaría un rango de suma de bases de 9,2–12,5 cmol (+)/kg.

Por su parte, la **capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe)** incluye, además, al aluminio de intercambio. En las zonas Intermedia y Esteparia, salvo en sectores muy húmedos, la concentración de aluminio intercambiable es muy baja, con una saturación de aluminio habitualmente menor a 1 %.

Caracterización física de los suelos de Aysén

La fertilidad de los suelos tiene básicamente tres componentes: físico, químico y biológico. Los aspectos físicos del suelo son de gran relevancia al estar influyendo sobre los aspectos químicos y también los biológicos. Las plantas se encuentran ancladas al suelo a través de su sistema radicular y éste debe explorar el perfil, para abastecerse adecuadamente de agua, aire y nutrientes.

El suelo es un medio poroso, que se compone de fracciones sólidas, líquidas y gaseosas. Las fracciones sólidas son los materiales minerales del suelo, dados por las partículas de diferente tamaño del suelo; y la materia orgánica. Ambos componentes tienen gran relevancia en definir también la química del suelo y la disponibilidad de nutrientes para las plantas. La disposición y proporción en que se presentan las partículas del suelo tiene a su vez mucha importancia en el movimiento del agua (y consiguientemente del aire), ya que definen la porosidad de éste y, entre otros, son responsables de la facilidad o dificultad que tendrá el sistema radicular para absorber agua. Algunas características físicas determinan, además, el movimiento del agua en el suelo, sus niveles de saturación y de agua aprovechable para las plantas. Datos de muestras analizadas en diferentes sectores de la Región de Aysén se encuentran en anexo de este capítulo.

Textura de los suelos

La textura del suelo considera todas aquellas fracciones minerales inferiores a 2 mm de tamaño (es decir, que pasan un tamiz con esa medida) y es la proporción relativa de tres componentes: arena, limo y arcilla. Su determinación se realiza en una muestra tamizada en que se ha destruido la estructura (agregados del suelo). Al determinarse

los porcentajes de los tres componentes indicados, mediante un triángulo textural se determina la clase de textura del suelo. La textura de un suelo es una característica bastante estable en el tiempo y tiene connotaciones en la química y biología del suelo, como también en aspectos prácticos de manejo como es, por ejemplo, la preparación con maquinaria, la compactación, la erodabilidad, la capacidad de retención del agua, el drenaje, etc.

Para determinar los rangos de textura en los suelos de la zona Intermedia, se analizaron 27 pares de muestras, cada una de las cuales correspondía a los niveles de 0-10 cm y de 10-30 cm de profundidad. Las muestras fueron secadas al aire y luego tamizadas (2 mm). Se procedió luego a determinar la textura a través del método de Bouyoucos (hidrómetro - sedimentación).

Los valores promedio para todas las muestras del nivel 0-10 cm y 10-30 cm se muestran en el Cuadro 2.3. En el nivel superficial, la textura promedio mostró una fuerte predominancia de arenas, con un 65 %, seguido de 28 % de limo y sólo 7 % de arcilla. La clase textural predominante fue entre areno-franca a franco-arenoso. Por su parte, en el nivel más profundo (10-30 cm) la textura es muy similar, con las mismas clases texturales predominantes.

Cuadro 2.3. Textura: proporción de arena, limo y arcilla promedio en muestras de suelo de la zona intermedia de Aysén.

	Profundidad 0-10 cm		
	% arena	% limo	% arcilla
Promedios	65,5	28,0	6,6
Min	45,8	13,7	2,2
Max	83,7	43,0	15,3

	Profundidad 10-30 cm		
	% arena	% limo	% arcilla
Promedios	69,4	24,9	5,7
Min	51,6	13,9	0,9
Max	82,9	42,9	13,0

La proporción de arena en algunas muestras llegó hasta 83 %, mientras que las arcillas siempre estuvieron en una muy baja proporción. En general, las muestras indican suelos de texturas más bien gruesas, livianas y que son de fácil labranza. Hay que considerar que la proporción de materia orgánica de estos suelos es relativamente alta y que estas fracciones son las que más fácilmente se pierden con la labranza de estos suelos, especialmente por la erosión eólica.

Densidad aparente, densidad real y porosidad del suelo

La densidad del suelo habitualmente tiene dos componentes. Se habla de densidad real cuando se considera un volumen completamente ocupado por los sólidos (minerales y materia orgánica), sin espacios de aire ni agua. Sin embargo, el suelo en su estado natural incluye una proporción variable, pero importante, de espacios porosos, donde se ubica el agua y el aire del suelo. Por ello se considera la densidad aparente, que toma en cuenta el volumen de suelo con sus sólidos y porosidad (se mide en una muestra de volumen inalterado). Por consiguiente, la densidad real es siempre mayor a la densidad aparente.

Para determinar las densidades de suelos de la zona intermedia, se tomaron muestras a dos profundidades, 0–10 cm y 10–30 cm, que es donde se ubica habitualmente la mayor proporción y densidad de raíces de la mayoría de las especies forrajeras. Se cavaron calicatas (Figura 2.5) y en las profundidades indicadas se obtuvieron muestras con cilindros de volumen conocido, las que fueron rasadas mediante un cuchillo (Figura 2.6). Estas muestras fueron llevadas al laboratorio, donde fueron pesadas y secadas a 105 °C por 48 horas. La densidad aparente (D_a) se expresa en gramos de suelo seco por el volumen total inalterado de la muestra (g/cm^3).



Figura 2.5. Calicata para la toma de muestra a diferentes profundidades con anillos metálicos.



Figura 2.6. Preparación de la muestra para determinar densidad aparente.

La densidad real (D_r) se determina mediante el método de picnómetro, que utiliza una muestra de suelo secada a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$, molida y luego se determina su volumen con el uso del picnómetro.

Por su parte, la porosidad total (PT) corresponde a la expresión $(D_r - D_a) / D_r$, ya que es la proporción de espacios de aire totales en relación al volumen total del suelo y se expresa en porcentaje.

El Cuadro 2.4 resume los resultados promedio para D_a , D_r y PT. La densidad real promedio de los 27 suelos de la zona Intermedia analizados fue de $0,82\text{ g/cm}^3$ en los primeros 10 cm de profundidad, con un rango relativamente amplio, entre un mínimo de $0,57$ y un máximo de $1,12\text{ g/cm}^3$. A mayor profundidad (10-30 cm), la densidad aparente promedio fue similar, aunque con un rango algo más amplio entre muestras.

En el mismo Cuadro se aprecia la densidad real del suelo en las mismas condiciones, teniendo un promedio de $1,88\text{ g/cm}^3$ en la fracción superficial del suelo y de $1,98\text{ g/cm}^3$ entre 10-30 cm de profundidad. También existió una distribución de valores, entre $1,76 - 2,2\text{ g/cm}^3$ en la superficie y de $1,76 - 2,11\text{ g/cm}^3$ en el rango 10-30 cm.

La densidad real de estos suelos volcánicos es inferior a otros suelos y está en parte influenciada por su alto valor de materia orgánica, sobre todo cerca de la superficie.

Cuadro 2.4. Densidad aparente, densidad real y porosidad total promedio de suelos de la zona Intermedia de Aysén.

0-10 cm	Densidad suelo (g/cm ³)		Porosidad total (%)
	DA (aparente)	DR (real)	
Promedios	0,82	1,88	6,6
Min	0,57	1,76	2,2
Max	1,12	2,20	15,3

10-30 cm	Densidad suelo (g/cm ³)		Porosidad total (%)
	DA (aparente)	DR (real)	
Promedios	0,83	1,98	58,1
Min	0,41	1,76	39,4
Max	1,20	2,11	79,3

En cuanto a la porosidad total, teniendo los valores de Da y Dr, es posible calcularla, obteniéndose un promedio de entre 57-58 % en ambos casos (profundidades). Ello significa que, en los primeros 30 cm de estos suelos, casi el 60 % del volumen del suelo corresponde a espacios porosos de diferentes diámetros.

Determinación de constantes hídricas

El suelo tiene espacios porosos de diferentes diámetros y características (macroporos, microporos, capilares), los que determinan el movimiento de agua en el suelo. Posterior a un evento intenso de precipitación o de un riego abundante, el suelo puede presentar el 100 % de su volumen poroso con agua, lo que corresponde al estado de saturación. En esta situación se ha desplazado todo el aire contenido en el suelo, por lo que las plantas no pueden funcionar y si esta situación continúa en el tiempo se puede llegar a problemas de hipoxia.

Producto del efecto de la gravedad, desde la saturación inicial, el agua comienza a moverse en profundidad, produciendo gradualmente un vaciado, particularmente rápido en los poros de mayor diámetro. El agua en los poros de menor diámetro es retenida por la matriz del suelo. Una vez transcurridas entre 24-48 horas de drenaje posterior a la saturación, el suelo se encuentra en un estado de humedad que se conoce como capacidad de campo (CC). A partir de este punto, las plantas comienzan a absorber agua y nutrientes desde la solución del suelo. En este punto, el agua es retenida en el suelo con un nivel de sólo 0,3 bares.

En la medida que pasa el tiempo y las plantas van absorbiendo agua, y el suelo se va secando (también por evaporación), las plantas deben ejercer una capacidad de succión creciente, ya que el agua está retenida en el suelo cada vez con una fuerza mayor. Llega un punto crítico en que ya no es posible para las plantas seguir absorbiendo agua porque ésta ya está retenida por el suelo con una presión de 15 bares. Este punto corresponde al porcentaje de marchitez permanente (PMP).

El rango de humedad entre la capacidad de campo del suelo y el porcentaje de marchitez permanente corresponde a la humedad aprovechable (HA) por las plantas. La CC y el PMP son constantes hídricas del suelo que determinan la HA. El conocer estas constantes es de gran importancia para el manejo hídrico del suelo.

Para determinar la CC y PMP de los suelos colectados en la zona intermedia de Aysén, en las calicatas se obtuvieron muestras con cilindros metálicos a dos profundidades (0-10 y 10-30 cm). Las constantes hídricas se determinaron en laboratorio mediante el uso de platos de presión, sometiendo las muestras a presiones de 0,3 y 15 bares. Los valores se expresan como porcentaje de humedad gravimétrica. La diferencia entre CC y PMP corresponde al porcentaje de humedad aprovechable (%HA).

En el Cuadro 2.5 se muestran constantes hídricas promedio de suelos de la zona intermedia de Aysén, a dos profundidades. En el estrato superficial (0-10 cm) la capacidad de campo promedio fue de 40,5 % y el porcentaje de marchitez permanente se situó en 23,9 %, dando una humedad aprovechable promedio del 16,6 %. Como se ve en el mismo cuadro, existe una muy amplia variabilidad en los resultados para los diferentes suelos. Considerando el volumen de suelo de los primeros 10 cm y la densidad aparente promedio de ese estrato (0,82), se puede calcular que en promedio la humedad aprovechable (volumétrica) es de 13,6 % (en los primeros 10 cm del suelo (= 100 mm) se tiene entonces que habría una humedad aprovechable de 13,6 mm, lo que equivale a 136 metros cúbicos por hectárea.

A mayor profundidad, en los siguientes 20 cm del perfil (10-30 cm) la CC promedio fue de 36,8 % y el PMP de 17,7 %, dando un %HA de 19,1 %. También se aprecia una muy amplia variabilidad entre los suelos, por lo que es importante determinar estos parámetros localmente a la hora de determinar requerimientos hídricos o planificar sistemas y criterios de riego de praderas. La humedad aprovechable en este estrato sería de 317 m³/ha en promedio.

Cuadro 2.5. Capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y humedad aprovechable (HA) promedio de suelos de la zona intermedia de Aysén, a dos profundidades (0-10 cm y 10-30 cm) (% humedad gravimétrica).

0-10 cm	%CC	%PMP	% HA	Humedad aprovechable (m ³ /ha) en primeros 10 cm
Promedios	40,5	23,9	16,6	136,1
Min	16,8	8,8		
Max	62,7	35,9		

0-10 cm	%CC	%PMP	% HA	Humedad aprovechable (m ³ /ha) en primeros 10 cm
Promedios	36,8	17,7	19,1	317,1
Min	10,9	5,7		
Max	67,0	33,0		

En base a estos valores promedio, la humedad aprovechable contenida en los primeros 30 cm del suelo sería de 453,2 m³/ha, equivalente a 45,2 litros por metro cuadrado o, lo que es lo mismo, 45,2 mm de lámina de agua.

Curva de retención de humedad

Las curvas de retención de humedad del suelo muestran la relación que existe entre el contenido de humedad y el potencial mátrico del suelo. Son de interés, ya que permiten caracterizar cómo el suelo retiene agua en función de la succión ejercida. La textura del suelo y las características de porosidad serán factores determinantes en la forma cómo responde el suelo. Estos suelos volcánicos (especialmente Andisoles) presentan texturas con alto contenido de arenas (texturas areno-francas a franco arenosas), gran porosidad total (en promedio cercana a 60 %, como se vio anteriormente) y baja densidad aparente, lo que los hace perder agua con mayor facilidad por acción de la gravedad. Sin embargo, el contenido de materia orgánica tiende a mejorar la retención de humedad en comparación a texturas similares de suelos de bajo contenido orgánico.

Para determinar las curvas de retención de humedad en la zona Intermedia, se colectaron 12 diferentes suelos, a dos profundidades (0-10 y 10-30 cm). Mediante los mismo platos de presión indicados anteriormente, se procedió a determinar la humedad volumétrica de la muestra a diferentes tensiones: 0,3 - 0,6 - 1,0 - 5,0 - 15,0 bares (=atm). De esta forma, para cada muestra se obtuvo su curva de retención de humedad (CRH). En la Figura 2.7 se muestra la CRH para diferentes suelos, además de la curva promedio en el estrato 0-10 cm.

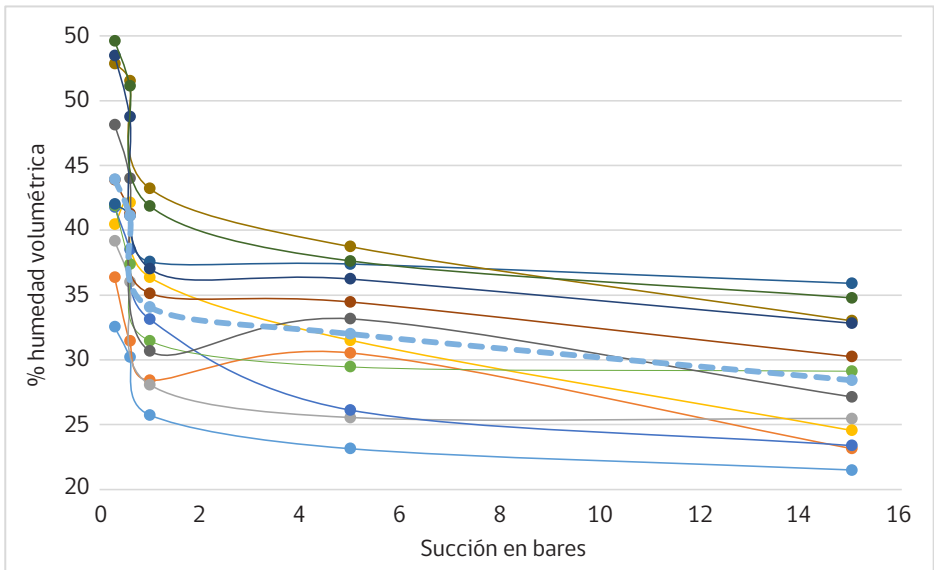


Figura 2.7. Curvas de retención de humedad de diferentes suelos de la zona intermedia de Coyhaique. La curva con línea punteada corresponde al promedio. Profundidad 0-10 cm.

Se observa una variabilidad bastante amplia, sobre todo en lo que se refiere al punto inicial, es decir a la capacidad de campo (0,3 bares). De ahí, la forma de la curva es en general similar, observándose una disminución pronunciada de la humedad entre 0,3 y 0,6 bares de succión, que indica una rápida pérdida de agua. Luego cambia la pendiente, con una declinación más lenta hacia los 5 bares de succión y posterior disminución aún más gradual hacia el punto de marchitez permanente (15 bares).

En la Figura 2.8 se observan las curvas de retención de humedad para el estrato 10-30 cm de los suelos analizados. Se observa una caída similar inicial al caso anterior (muy pronunciada entre 0,3 y 0,6 bares de succión) y luego una mayor gradualidad. En un suelo particular se observa una caída proporcionalmente mucho menor a los demás, manteniendo niveles de humedad hasta los 5 bares de succión y una declinación posterior, pero llegando a un PMP mucho más alto que todos los demás suelos.

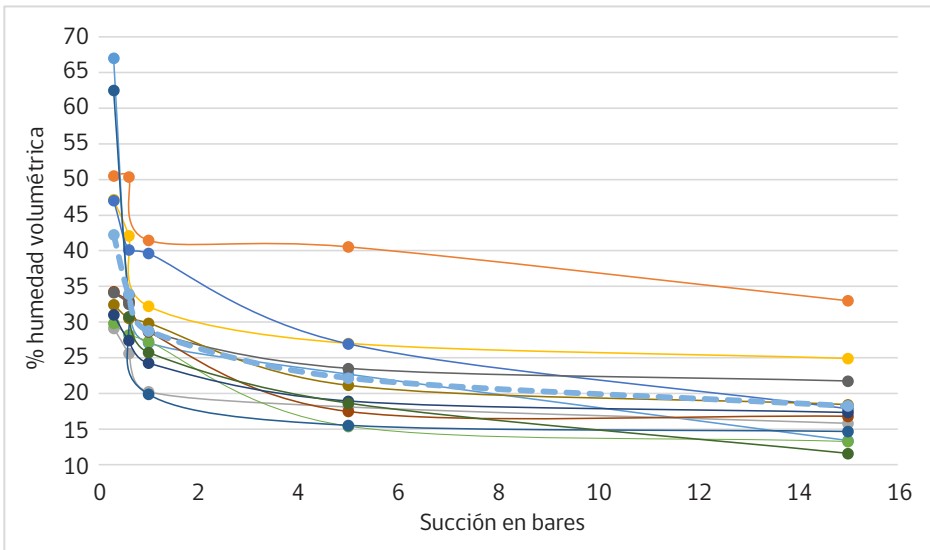


Figura 2.8. Curvas de retención de humedad de diferentes suelos de la zona intermedia de Coyhaique. La curva con línea punteada corresponde al promedio. Profundidad 10-30 cm.

En los primeros 30 cm del suelo se aprecia, en promedio, una curva de retención de humedad caracterizada por una disminución inicial muy pronunciada, característica de suelos con mayores contenidos de arena, como es el caso. Sin embargo, posteriormente se produce un cambio de pendiente en la curva, con una disminución gradual, aunque sostenida, del contenido de humedad volumétrica en el suelo.

Infiltración

Para conocer mejor el movimiento del agua en el suelo, es importante evaluar su capacidad de infiltración, que describe cómo el agua ingresa en el suelo y se mueve en profundidad. Interesa medir la velocidad de infiltración del agua en el suelo, la que está fuertemente determinada por la textura del mismo.

Para determinar la capacidad de infiltración en un suelo volcánico se utilizó el método de los anillos (Figura 2.9), realizando mediciones en suelos de dos condiciones de humedad (suelo seco y suelo húmedo, sometido a riego). Los anillos de infiltración se introdujeron en el suelo mediante un combo. Luego se agregó agua en el cilindro exterior y en el anillo interior. Se debe tomar la altura de agua inicial en el cilindro interior y luego se va midiendo la variación de dicha altura en el tiempo. En estos suelos se midió cada 1 minuto durante los primeros cinco minutos, y luego cada cinco minutos hasta llegar a los 60 minutos.



Figura 2.9. Medición de infiltración de agua en terreno (infiltrómetro de anillos).

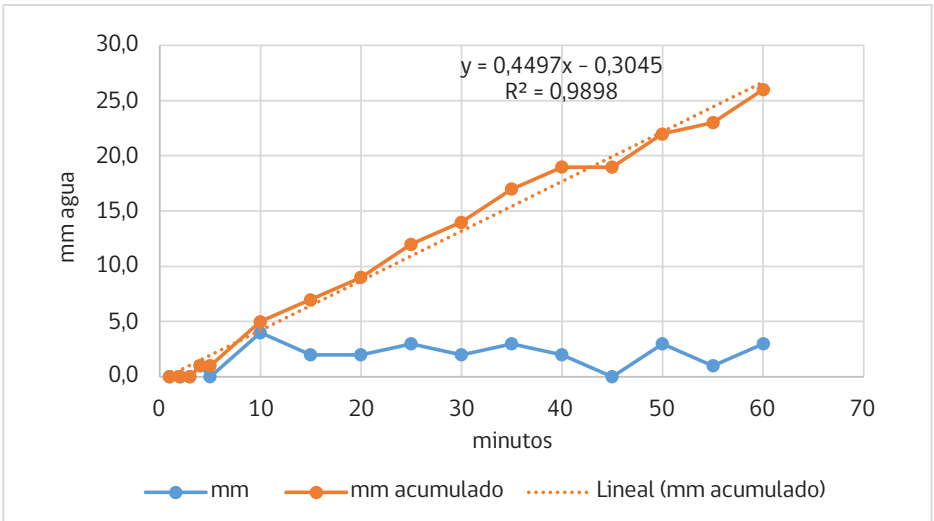


Figura 2.10. Infiltración acumulada de agua en un suelo volcánico de la zona intermedia en condiciones de sequo.

La Figura 2.10 muestra la curva de infiltración acumulada en un suelo seco, con un historial de manejo en seco (nunca regado). Se observa inicialmente, durante los primeros minutos, una baja infiltración, lo que puede estar relacionado con algunas propiedades hidrofóbicas de estos suelos, particularmente cuando se encuentran muy secos. Se señala que producto de acumulación de compuestos orgánicos hidrofóbicos a nivel superficial, se reduciría la infiltración y se limita así la disponibilidad de agua para las plantas, llegando incluso a aumentar la escorrentía en condiciones de pendiente y así la susceptibilidad a la erosión.

Pasados los primeros minutos, se inicia la infiltración y ésta sigue un comportamiento prácticamente lineal. Este suelo llega a tener una infiltración acumulada de aproximadamente 25 mm en una hora.

Para el mismo suelo, la Figura 2.11 muestra la tasa de infiltración durante el proceso de ingreso de agua en el suelo. Según lo que se observa, la velocidad de infiltración es inicialmente alta (descontando los minutos iniciales en que no hay infiltración) a razón de cerca de 60 mm/h, para tender a estabilizarse a partir de los 20 minutos aproximadamente en valores cercanos a 25-35 mm/h.

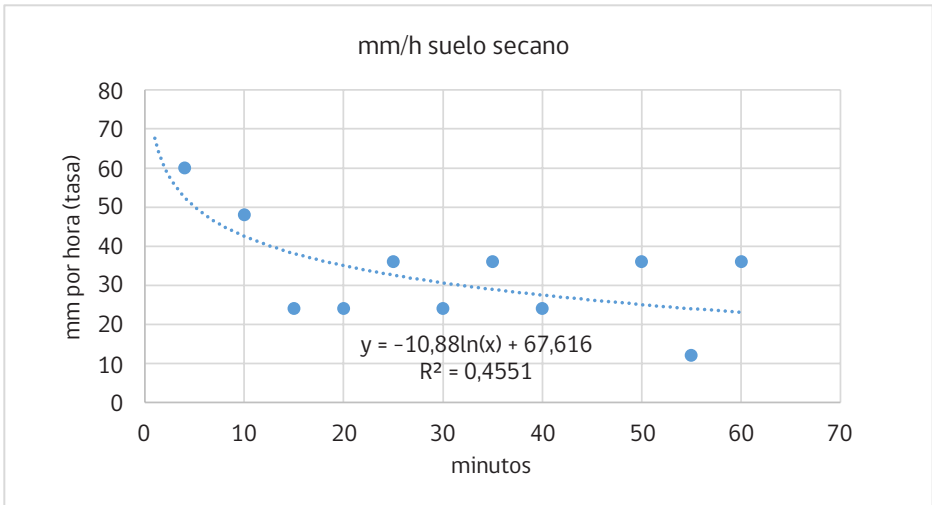


Figura 2.11. Tasa de infiltración de agua en un suelo volcánico de la zona intermedia en condiciones de seco.

En la Figura 2.12 se observa la curva de infiltración acumulada de un suelo húmedo (cercano a capacidad de campo) y con un historial de riego. A diferencia del suelo anterior, en este caso la infiltración se inicia de inmediato y presenta un comportamiento prácticamente lineal, hasta llegar a acumular una infiltración de 50 mm en 60 minutos.

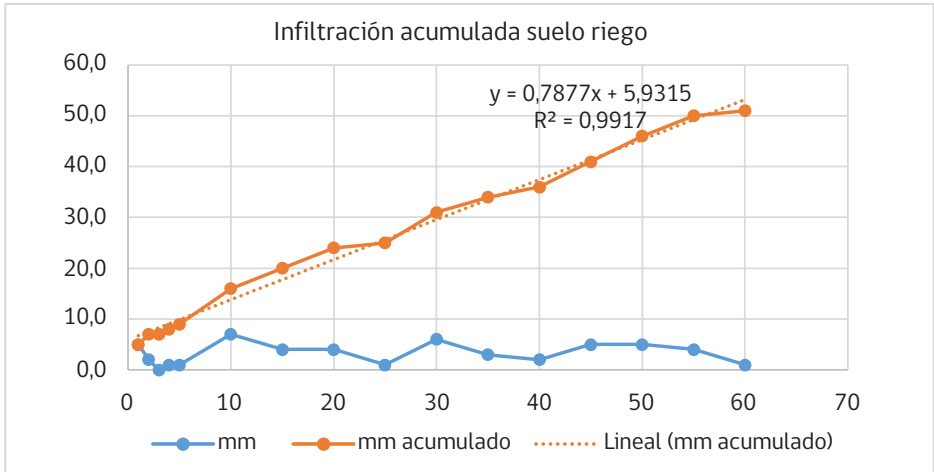


Figura 2.12. Curva de infiltración acumulada de agua en un suelo volcánico de la zona intermedia en condiciones húmedas.

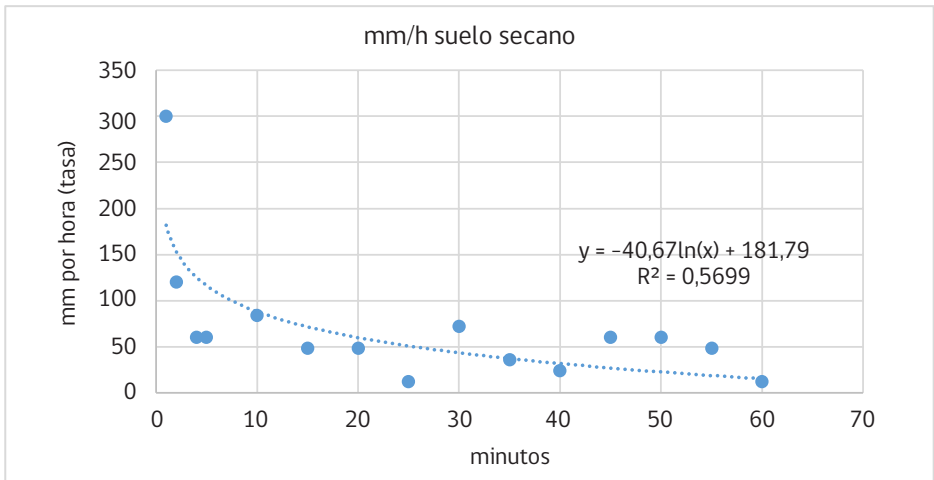


Figura 2.13. Tasa de infiltración de agua en un suelo volcánico de la zona intermedia en condiciones húmedas.

Para el mismo suelo, con historial de riego y a capacidad de campo, la Figura 2.13 muestra la curva de variación de la tasa de infiltración del agua. La velocidad inicial de infiltración es elevada en los primeros minutos, con casi 120-300 mm/h, llegando a cerca de 50 mm/h a los 5 minutos. Tiende a estabilizarse posteriormente hasta llegar a cerca de 30 mm/h a los 60 minutos.

Las mediciones anteriores muestran que estos suelos tienen una gran capacidad de infiltración, siendo inicialmente muy rápida y tendiendo a estabilizarse en el tiempo. Los valores iniciales obtenidos caen en una categoría de “muy rápida” (sobre 250 mm/h), mientras que la velocidad estabilizada de infiltración se consideraría “moderada” (20-60 mm/h). Según la FAO, valores típicos de velocidad de infiltración para suelos franco arenosos fluctuarían entre 20-30 mm/h.

En la Figura 2.14 se aprecia la tasa de infiltración en un suelo del sector de Lago Largo (Estepa). Ésta es inicialmente alta, del orden de 6 mm/minuto y cae rápidamente y ya a los 10 minutos se estabiliza en valores de cerca de 0,3 mm/minuto. La infiltración acumulada a la hora y media de evaluación aún no se estabiliza.

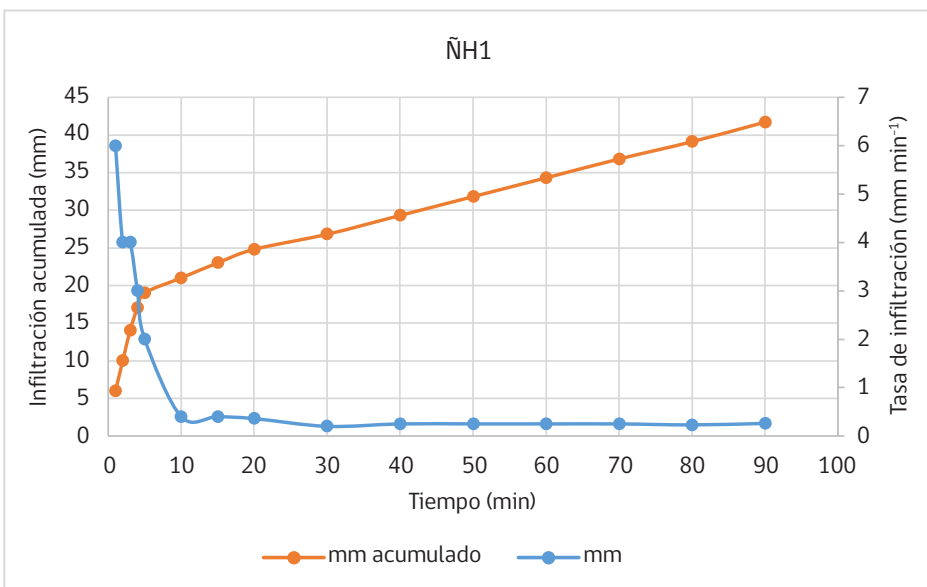


Figura 2.14. Tasa de infiltración e infiltración acumulada en un suelo de la zona de Estepa, Lago Largo (Ñirehuao). Medición con anillos infiltración.

Por otra parte, la Figura 2.15 muestra una infiltración similar para un suelo de la localidad de El Blanco (zona transicional a estepa). Sin embargo, allí la tasa de infiltración inicial es de cerca de 2 mm/min y se estabiliza luego en alrededor de 0,5 mm/min. La infiltración acumulada es prácticamente lineal, llevando cerca de 100 mm a las dos horas de medición.

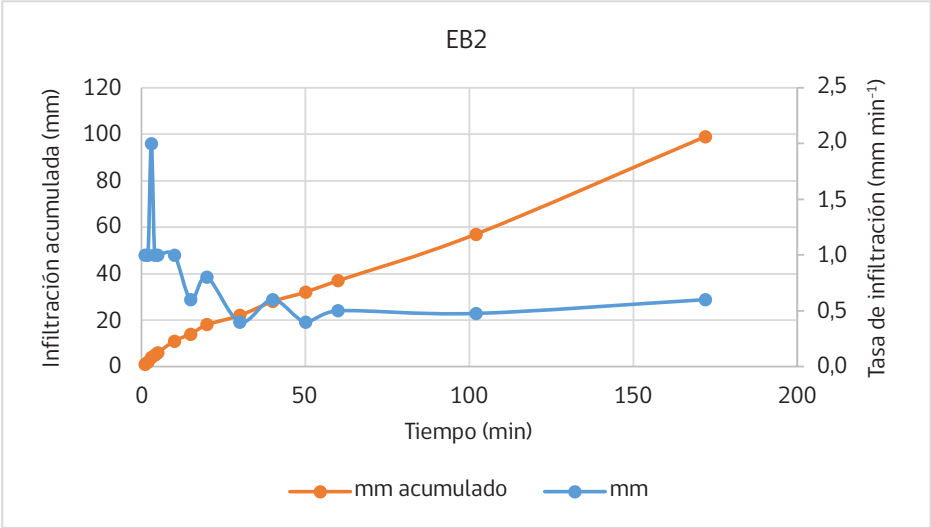


Figura 2.15. Tasa de infiltración e infiltración acumulada en un suelo de la zona Intermedia Transicional a Estepa, El Blanco. Medición con anillos infiltración.



Figura 2.16. Minidisk para determinación de conductividad hidráulica.

En estos suelos también se midió la conductividad hidráulica saturada, utilizando la metodología de *Minidisk*. Ésta representa la capacidad del suelo para transportar el agua en profundidad, siendo también un indicador de la estructura y compactación del suelo. Los valores encontrados para la conductividad hidráulica variaron de 16,3 – 44,6 mm/h, con un promedio de 35,5 mm/h. Estos valores están en línea con los niveles de estabilización observados en algunas de las curvas de infiltración. Sin embargo, son superados ampliamente en otros casos.

Compactación del suelo

Otro aspecto que influye en la dinámica del agua en el suelo es la compactación del mismo, por la influencia que tiene sobre la porosidad total y afectando también la densidad aparente de éste. La compactación implica una deformación plástica del suelo, provocando una alteración del sistema poroso, que significa desplazar el aire y el agua contenida en los poros. La compactación afecta principalmente a los macroporos, importantes en aspectos como el crecimiento radicular, el agua y el aire, permitir el intercambio gaseoso y dar, además, un hábitat para la vida biológica del suelo.

En sistemas agropecuarios, la compactación del suelo puede producirse por uso de maquinaria de cultivo, tránsito de tractores, equipos de conservación de forrajes o incluso por el propio efecto de la carga animal, entre otros. El estado hídrico del suelo será importante, favoreciéndose la compactación con suelos húmedos.



Figura 2.17. Uso del penetrómetro para medir la compactación en el suelo.

Para la determinación de la compactación en los suelos definidos, se utilizó un penetrómetro (Figura 2.17), instrumento digital que introduce una sonda con una punta cónica y que registra la presión que es necesario ejercer para ir penetrando el perfil. Va entregando lecturas cada 1 pulgada, permitiendo llegar hasta las 18 pulgadas (aproximadamente 45 cm de profundidad).

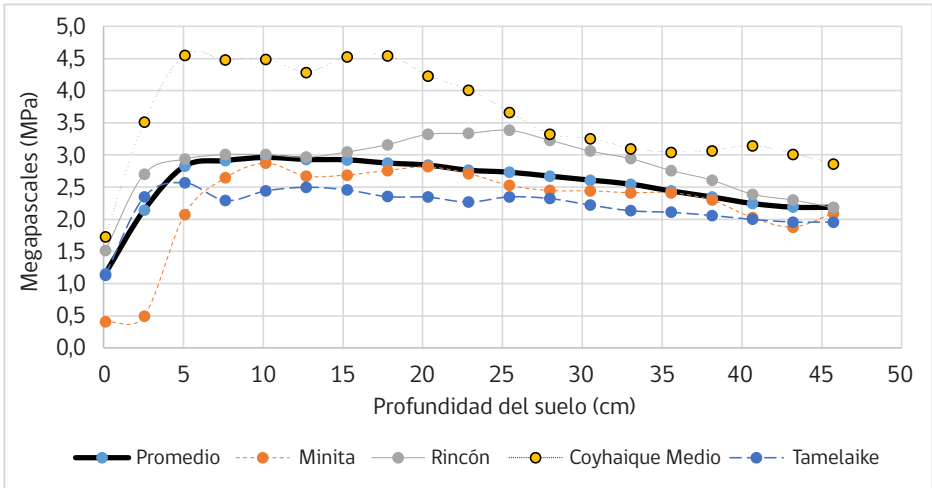


Figura 2.18. Curva de resistencia a la penetración (penetrómetro) de varios suelos medidos en la zona intermedia de Aysén en condiciones de sequía, en los primeros 45 cm del perfil. Datos en MPa.

Las lecturas que muestra la Figura 2.18 se realizaron durante el mes de febrero en diferentes suelos, época en que éstos se encontraban con escasa humedad. También se muestra una curva promedio de los sitios medidos. Se aprecia una menor compactación en superficie, la que aumenta hacia los 5-20 cm de profundidad, para luego decaer lentamente. Los valores iniciales de algo más de 1 MPa y hasta 2 MPa son considerados “medios”. Los valores de casi 3 MPa que se muestran como máximos son considerados “altos” si se midieran en condiciones de capacidad de campo, situación que, como se indicó, acá no ocurrió (los suelos estaban con muy bajo contenido de humedad). La misma Figura muestra que en algunos suelos la resistencia a la penetración fue aún superior, llegando a 4,5 MPa en las lecturas máximas.

Para medir la resistencia a la penetración en condiciones diferentes de humedad del suelo (Figura 2.19), se realizó una medición en un suelo sometido a diferentes cargas de agua, posterior al riego. En este caso, se midió en una condición con un lámina de riego de 20 mm (R100), 15 mm (R75), 10 mm (R50), 5 mm (R25) y sin riego (0 mm R0). La medición también se desarrolló en febrero.

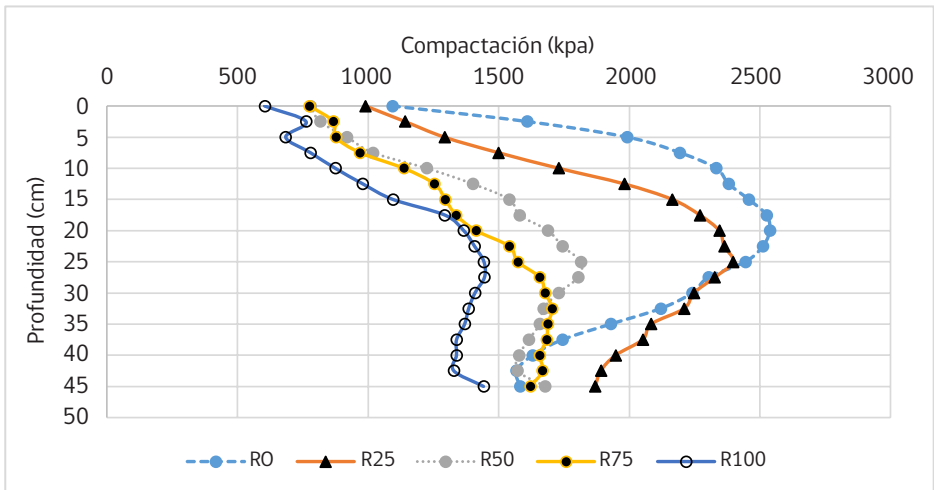


Figura 2.19. Curvas de resistencia a la penetración (penetrómetro) de un suelo con diferentes niveles de humedad, luego de un riego de 20 mm (primeros 45 cm del perfil). Datos en MPa. R0 sin riego, R100 con aplicación de 20 mm de lámina, R75: 15 mm; R50: 10 mm; R25: 5 mm). Febrero 2024.

En la Figura 2.19 se aprecia que hay diferencias en compactación según el nivel de humedad en el suelo. En el suelo más húmedo (R100) se observa la menor resistencia a la penetración, con valores inferiores a 1 MPa (=1.000 kPa) hasta aproximadamente los 15 cm de profundidad, aumentando luego, pero siempre se mantiene bajo los 1,5 MPa. Lo sigue el suelo R75, que se mantiene bajo 1,5 MPa hasta los 20 cm aproximadamente, para luego aumentar la resistencia a penetración. En la medida que el nivel de humedad del suelo es más bajo, tiende a haber más resistencia a la penetración, siendo ésta más extrema en el suelo seco. A mayor profundidad, donde probablemente las diferencias de humedad son menores, las diferentes condiciones tienden a acercarse al rango de 1,4-1,8 MPa, aproximadamente. Sólo en R0 y R25 (y en los primeros 40 cm) se llega a límites superiores a 2 MPa, lo que se consideraría como compactación más alta.

Curva de secado del suelo

Durante la segunda quincena de marzo de 2021 y principios del mes de abril, se realizó una prueba a nivel experimental en un suelo Andisol de la zona Intermedia, sometido a diferentes láminas de agua. En una pradera de ballica x trébol blanco se tenían varios tratamientos con cuatro diferentes aplicaciones de lámina de riego: 25 mm (100); 19,7 mm (75); 14,1 mm (50) y 7 mm (25). También se tenía un testigo sin riego.

Utilizando un equipo Time Domain Reflectometry (TDR) desde el día del riego se procedió a medir la humedad volumétrica en los primeros 12 cm del perfil de suelo, para obtener una curva que caracterice el “secado” gradual de este suelo volcánico.

En la Figura 2.20 se aprecia el nivel de baja humedad de la pradera sin riego, con valores cercanos o inferiores al PMP. Los demás tratamientos fluctúan el primer día entre 38-47% de humedad volumétrica, valores superiores a capacidad de campo. La humedad cae inicialmente rápido las primeras 48-72 horas y luego disminuye a una velocidad menor. Junto a las mediciones con TDR, en el tratamiento 100 se contaba con un tensiómetro (misma profundidad), el cual marcaba “cero” después del riego y empezó a subir ya a los 7 días, llegando a marcar sobre 30 kPa. En ese punto, los tratamientos con láminas R50, R75 y R100 tenían un contenido de humedad volumétrica aún sobre 20 %, mientras que el nivel R25 se encontraba entre 15 y 20 %, ya acercándose al PMP. Entre el 31 de marzo y el 1 de abril hubo una pequeña precipitación de 1,6 mm. El tensiómetro puede ser un instrumento práctico para la toma de decisiones de riego, así como también el TDR, que permiten en forma rápida definir el estado hídrico del suelo (Figura 2.21).

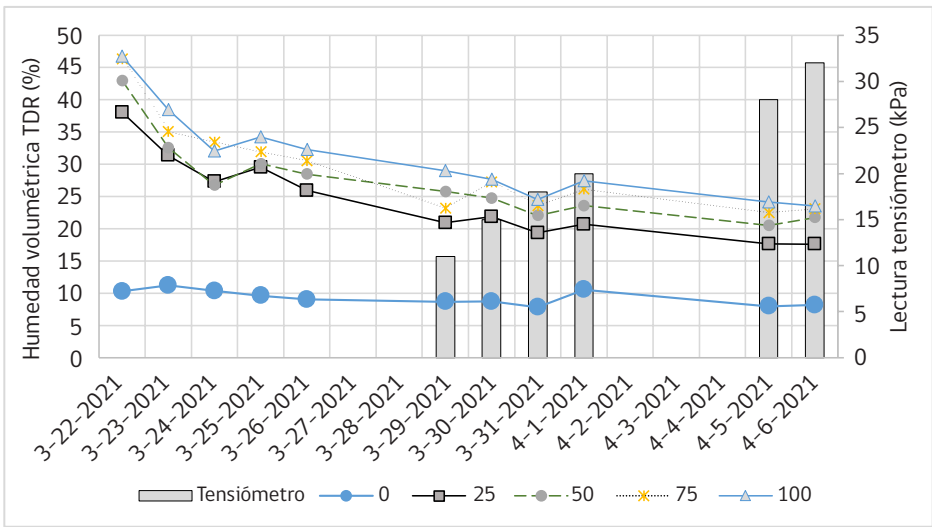


Figura 2.20. Curva de secado de un suelo volcánico de la zona intermedia, sometido a diferentes cargas de agua. Láminas de 0-25-50-75 y 100, relativas a un máximo de 25 mm aplicado en el tratamiento 100. Mediciones de humedad con TDR y valores relacionados de tensiómetro en el tratamiento 100.



Figura 2.21. Uso de tensiómetros para monitorear el estado hídrico de suelo.



Anexo

Caracterización física de los suelos en la zona intermedia, esteparia y transicional de la Región de Aysén

Muestreo Zona Intermedia (profundidad 0-10 cm)

		%	%	%	%	%	g/cm3	g/cm3	%	%	m3/ha/cm	m3/ha/10 cm
lugar	textura	% arena	% limo	% arcilla	% CC	% PMP	DA	DR	porosidad total	CC-PMP	(CC-PMP)*DA	Humedad aprovechable
Mallín Grande	franco arenoso	60,7	36,2	3,2	53,8	28,0	0,57	1,88	69,7	25,8	14,7	147,1
El Belga	areno francoso	76,5	21,3	2,2	23,3	12,1	1,09	1,88	42,0	11,2	12,2	122,1
Villa Castillo	franco arenoso	62,1	34,7	3,2	28,8	15,0	0,74	1,88	60,6	13,8	10,2	102,1
Bajada Ibáñez	franco arenoso	53,8	41,1	5,1	16,8	8,8	0,83	1,88	55,9	8,0	6,6	66,4
Puerto Ibáñez	franco arenoso	53,6	31,1	15,3	24,1	12,6	1,01	1,88	46,3	11,5	11,6	116,2
INIA Tamel Aike	franco arenoso	58,5	35,5	6,0	45,9	23,9	0,71	1,88	62,2	22,0	15,6	156,2
Lago Paloma	franco	45,8	43,0	11,2	40,9	21,3	1,12	1,88	40,4	19,6	22,0	219,5
Villa Frei	franco arenoso	56,5	36,1	7,4	42,5	22,1	0,75	1,88	60,1	20,4	15,3	153,0
Seis Lagunas	franco arenoso	63,0	31,0	6,0	62,7	32,6	0,68	1,88	63,8	30,1	20,5	204,7
El Claro	franco arenoso	74,0	21,5	4,5	31,4	16,3	0,73	1,88	61,2	15,1	11,0	110,2
Coyhaique	franco arenoso	63,0	28,6	8,4	56,4	29,3		1,88		27,1		
Mano Negra	franco arenoso	57,3	40,0	2,7	32,9	17,1	0,74	1,88	60,6	15,8	11,7	116,9
Coyhaique	franco arenoso	60,5	27,4	12,1	24,2	12,1	0,90	1,88	52,1	12,1	10,9	108,9
Lago Verde	franco arenoso	58,3	31,7	10,0			0,69	1,88	63,3			
Pollux	franco	50,4	39,3	10,3	43,1	28,1	0,70	1,88	62,8	15,0	10,5	105,0
El Blanco	franco arenoso	64,0	29,2	7,0	32,5	21,5	0,82	1,87	56,2	11,0	9,1	90,7
Coyhaique Medio	franco arenoso	69,6	20,7	9,7	36,4	23,2	1,04	2,20	52,7	13,2	13,7	137,5
El Rincón	franco arenoso	70,0	22,9	7,1	39,2	25,5	0,85	1,84	53,8	13,7	11,6	116,1
Minita 1	areno francoso	75,0	21,5	3,5	40,5	24,6	0,72	1,91	62,3	15,9	11,5	115,4
Ensenada					41,8	23,4	0,86	1,90	54,7	18,4	15,8	157,7
Escuela Agrícola	franco arenoso	72,8	18,4	8,8	41,9	29,1	0,84	1,76	52,3	12,8	10,7	107,2
Teniente Vidal	franco arenoso	72,8	18,4	8,8	42,0	35,9	0,79	1,96	59,7	6,1	4,8	48,0
Seis Lagunas 1	areno francoso	83,7	13,7	2,6	43,9	30,3	0,89	1,83	51,4	13,6	12,1	120,8
Villa Frei 1	franco arenoso	77,8	19,6	2,6	48,2	27,2	0,83	1,83	54,6	21,0	17,4	174,4
Villa Frei 2	areno francoso	80,8	16,5	2,7	52,9	33,0	0,79	1,80	56,1	19,8	15,8	157,7
Lago Frio	franco arenoso	69,4	22,7	7,9	53,5	32,8	0,73	1,82	59,9	20,7	15,1	150,7
Minita 2	franco arenoso	71,9	24,6	3,5	54,6	34,8	0,78	1,79	56,4	19,8	15,5	155,4

Muestreo zona intermedia (profundidad 10-30 cm)

lugar	textura	%	%	%	%	%	g/cm3	g/cm3	%	%	m3/ha/cm	m3/ha/10 cm
		% arena	% limo	% arcilla	% CC	% PMP	DA	DR	porosidad total	CC-PMP	(CC-PMP)*DA	Humedad aprovechable
Mallín Grande	franco arenoso	51,6	42,9	5,5	41,2	21,4	0,41	1,98	79,3	19,8	8,1	162,4
El Belga	areno francoso	82,9	13,9	3,1	10,9	5,7	1,02	1,98	48,5	5,2	5,3	106,1
Villa Castillo	franco arenoso	61,4	32,0	6,5	26,2	13,6	0,9	1,98	54,5	12,6	11,3	226,8
Bajada Ibáñez	areno francoso	75,2	20,7	4,1	17,2	9,0	0,99	1,98	50,0	8,2	8,1	162,4
Puerto Ibáñez	franco arenoso	59,7	28,0	12,3	16,3	8,5	1,2	1,98	39,4	7,8	9,4	187,2
INIA Tamel Aike	franco arenoso	58,1	36,0	5,9	40,1	20,9	0,75	1,98	62,1	19,2	14,4	288,0
Lago Paloma	franco arenoso	56,5	35,1	8,4	41,1	21,4	0,77	1,98	61,1	19,7	15,2	303,4
Villa Frei	franco arenoso	64,9	30,5	4,9	43,8	22,8	0,95	1,98	52,0	21,0	20,0	399,0
Seis Lagunas	franco arenoso	72,3	23,1	4,6	62,9	32,7	0,72	1,98	63,6	30,2	21,7	434,9
El Claro	franco arenoso	79,6	18,3	2,2	24,0	12,5	0,76	1,98	61,6	11,5	8,7	174,8
Coyhaique	franco arenoso	63,5	28,3	8,3	41,2	21,4	0,84	1,98	57,6	19,8	16,6	332,6
Mano Negra	areno francoso	76,3	20,5	3,1	33,6	17,5	0,82	1,98	58,6	16,1	13,2	264,0
Coyhaique	franco arenoso	60,4	26,6	13,0	23,8	10,8	0,9	1,98	54,5	13,0	11,7	234,0
Lago Verde	franco arenoso	72,4	20,4	7,2			1,12	1,98	43,4			
Pollux	franco arenoso	55,9	36,8	7,3	31,9	22,0	0,77	1,98	61,1	9,9	7,6	152,5
Minita 1	areno francoso	75,2	23,9	0,9	67,0	13,4	0,67	2,03	66,8	53,6	36,1	722,5
Minita 2	areno francoso	80,7	16,6	2,7	50,5	33,0	0,70	1,76	60,2	17,5	12,3	246,0
Seis Lagunas	areno francoso	81,3	16,1	2,6	29,1	15,8	0,80	2,02	60,4	13,3	10,7	213,4
Villa Frei 1	areno francoso	72,1	24,4	3,5	47,2	24,9	0,83	1,87	55,4	22,3	18,5	370,9
Villa Frei 2	areno francoso	78,0	19,4	2,6	47,1	17,9	0,83	1,83	54,8	29,2	24,2	483,3
Teniente Vidal	franco arenoso	75,7	17,5	6,8	29,8	13,3	0,75	2,04	63,2	16,6	12,4	248,7
Lago Frío	NA				62,5	14,7	0,65	2,04	68,3	47,8	31,0	619,1
Coyhaique Medio	franco arenoso	70,5	20,8	8,7	34,3	16,8	0,92	2,08	55,9	17,5	16,0	320,6
Escuela Agrícola	NA				34,1	21,7	0,87	2,11	58,7	12,4	10,8	216,3
El Rincón	franco arenoso	72,1	20,8	7,1	32,4	18,4	0,79	2,05	61,7	14,0	11,0	219,8
El Blanco					31,1	17,3	0,85	1,97	57,1	13,7	11,6	232,1
Ensenada						11,6	0,81	2,01	59,9			

Muestras Zona Estepa y Transicional (10 cm)

		%	%	%	%	%	g/cm3	g/cm3	%	%	m3/ha/cm	m3/ha/10 cm
lugar	textura	% arena	% limo	% arcilla	% CC	% PMP	DA	DR	porosidad total	CC-PMP	(CC-PMP)*DA	Agua aprovechable
Cochrane	areno franca	75,1	22,6	2,4	25,1	13,0	0,95			12,1	11,5	2299
Lago Cochrane	franco arenoso	58,4	40,3	1,3	40,7	21,1	0,75			19,6	14,7	294,0
Bahía Silva	franco arenoso	57,2	34,2	8,6	24,1	12,5				11,6		
Balsa Baker	franco arenoso	53,3	36,5	10,2	40,0	20,8				19,2		
El Ceballo	franco arcillo arenoso	54,3	20,4	25,3	22,6	11,8				10,8		
Bajada Ibáñez	franco arenoso	53,8	41,1	5,1	16,8	8,8	0,83			8,0	6,6	132,8
Galera Chico	franco arenoso	67,1	27,8	27,8	17,5	9,1	1,08			8,4	9,1	181,4
Ñorehuao Alto	franco	47,0	30,8	22,2	34,2	18,8	0,88			15,4	13,6	271,0
La Estancia	arcilloso	23,4	33,3	43,3	31,2	17,2	1,13			14,0	15,8	316,4
La Estancia	franco	47,2	31,7	21,1			1,17					
La Tapera	franco arenoso	55,5	29,4	15,1			0,77					
Portezuelo	franco arenoso	65,6	24,0	10,4	17,6	11,5	0,95			6,1	5,8	115,9
Puesto Viejo	franco arenoso	68,7	20,1	11,2			1,45					
Lago Largo 1	franco	27,8	46,8	25,3	54,1	30,4	0,63	2,60	75,8	23,7	14,9	298,6
Lago Largo 2	franco arenoso	67,7	20,8	11,5	46,0	24,8	0,64	2,58	75,2	21,2	13,5	270,8
Lago Largo 3	franco arenoso	61,0	27,3	11,7	45,4	23,9	0,67	2,58	74,0	21,5	14,4	288,6
El Blanco 1	franco arenoso	59,9	28,3	11,8	51,4	27,1	0,71	2,56	72,3	24,3	17,2	344,9
El Blanco 2	franco arenoso	59,2	30,3	10,5	50,5	27,3	0,74	2,53	70,9	23,2	17,2	343,7

Capítulo 3

Parámetros para la gestión del riego en praderas

Homero Barría O.

Introducción

El riego de praderas es una herramienta estratégica, considerando la variabilidad climática actual, que obliga a disponer del recurso hídrico suficiente para poder mantener una producción ganadera en base a forrajes frescos y de buena calidad. El riego permite, fundamentalmente, extender el periodo vegetativo de la pradera, mejorar su palatabilidad, obtener mejores características nutricionales del forraje y, por supuesto, aumentar la producción de materia seca en cada temporada.

El uso de riego en praderas implica el uso de suficiente cantidad de agua y, además, de disponer de energía para impulsarla, ya sea mediante equipos que operan con electricidad o mediante combustibles fósiles y, en algunos casos más favorables, sólo aprovechando la diferencia de topografía que entrega la energía potencial (gravitacional) suficiente para impulsar los sistemas de riego.

El uso de agua y energía, está asociada a costos importantes de la producción de praderas, por lo tanto, debe ser permanentemente evaluado para realizar un uso eficiente de estos recursos, de manera de alcanzar buenos índices de rentabilidad en la producción ganadera.

Para alcanzar la eficiencia en el uso de agua y energía, es fundamental obtener información de lo que está ocurriendo con estos recursos en la producción ganadera y para ello se debe constantemente realizar un seguimiento de los parámetros esenciales en la aplicación de agua de riego. Debido a lo anterior, en este capítulo se abordarán los parámetros que determinan el manejo del riego y cómo su monitoreo permite una gestión más precisa y eficiente.

Relación suelo, planta, clima

En este documento se comenzará explicando principios básicos para determinar un régimen de riego, considerando tres factores principales: suelo, planta y clima (Figura 3.1). Ellos se relacionan a través del flujo de agua que ocurre desde el suelo hacia la

atmósfera, conjugándose múltiples parámetros que determinan los requerimientos hídricos de la planta.

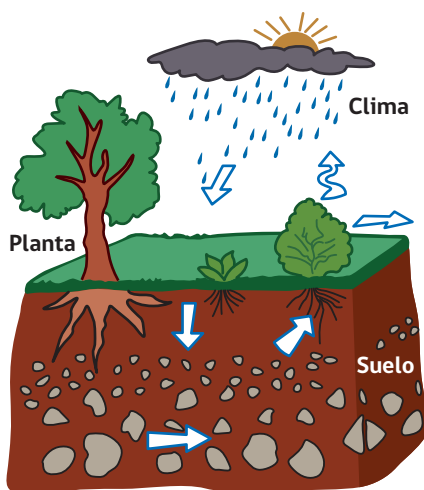


Figura 3.1. Esquema de los factores Suelo, Clima y Planta. Fuente: elaboración propia.

Parámetros del cultivo

Dependiendo del tipo de cultivo que se va a regar, habrá que considerar algunos elementos esenciales para la toma de decisiones en el manejo del agua.

Los cultivos pueden regarse mediante diversos métodos, ya sea de forma gravitacional (surco) o presurizada (tecnificados por aspersión y goteo). En el caso de las praderas, se aplican principalmente los métodos tecnificados, principalmente por aspersión. El tipo de cultivo o pradera, las distancias de plantación (si corresponde), el desarrollo fenológico o también conocido como las etapas de crecimiento de un cultivo (Figura 3.2), la profundidad de raíces, el manejo agronómico, entre otros factores, repercuten en la distribución del agua en el suelo. Un factor de importancia es el bulbo mojado o la zona a la cual llega el agua en el suelo, ya que ésta determina la utilización adecuada en la zona de las raíces. Por ejemplo, un tipo de cultivo con los emisores de agua (dispositivo que controla la salida del agua) demasiado espaciados, puede provocar una insuficiente entrega de agua en la plantación y con ello la entrega por parte del emisor (goteo o aspersor) de un caudal menor al requerido. Esto repercutirá en el desarrollo de una planta en sus estados iniciales y, en el caso de praderas, los traslapes de los emisores debe ser al menos del 60 % para una uniformidad adecuada del riego.

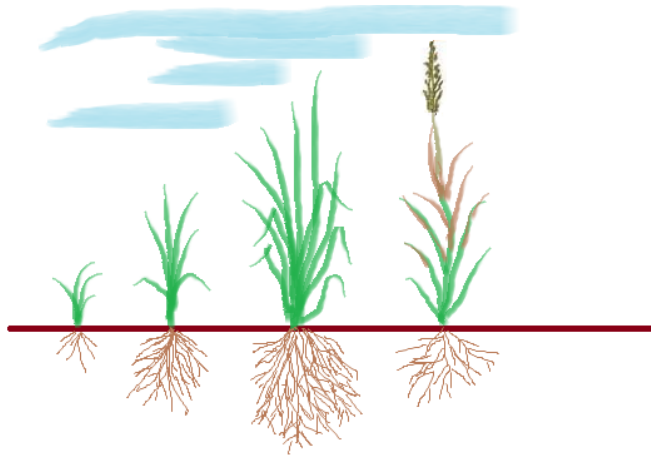


Figura 3.2. Diferentes estados fenológicos o de desarrollo de las plantas implican distintos requerimientos de agua.

Parámetros climáticos

En la actualidad existen múltiples datos meteorológicos disponibles para el agricultor y en el caso del riego, la variable de evapotranspiración de referencia (E_{To}), es esencial para la toma de decisiones en torno al manejo del agua. La evapotranspiración es la sumatoria de la humedad evaporada del suelo y desde la superficie del follaje de una planta, más la transpiración que emiten las plantas a la atmósfera. La evapotranspiración de referencia, es la tasa de evapotranspiración de una superficie, que ocurre sin restricciones de agua y la superficie corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas.

La Red Agrometeorológica del INIA (www.agrometeorologia.cl) posee estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) distribuidas a lo largo de todo Chile, proporcionando información agrometeorológica, incluida la variable **E_{to}**, con una frecuencia diaria. De esta forma, los agricultores pueden localizar la EMA más cercana a su predio y obtener la **E_{to}**, lo que entrega un primer acercamiento al valor de agua requerida en un prado de referencia con crecimiento activo en una zona determinada (Figura 3.3)

Por ejemplo, para la EMA ubicada en INIA Remehue (Osorno), en el mes de enero, se registró una **E_{to}** de 110,1 mm ($110\text{ L/m}^2/\text{mes} = 3,5\text{ mm/d}$, equivalente a 3,5 litros por metro cuadrado al día, o bien, $1.100\text{ m}^3/\text{ha}/\text{mes}$). Es decir, ese valor indica una referencia que se puede traducir en un requerimiento preliminar de **E_{to}**. Este valor es referencial y se debe contrastar con los valores de requerimiento del cultivo específico y con la capacidad del suelo de almacenar y tener disponible esa cantidad de agua para las plantas.

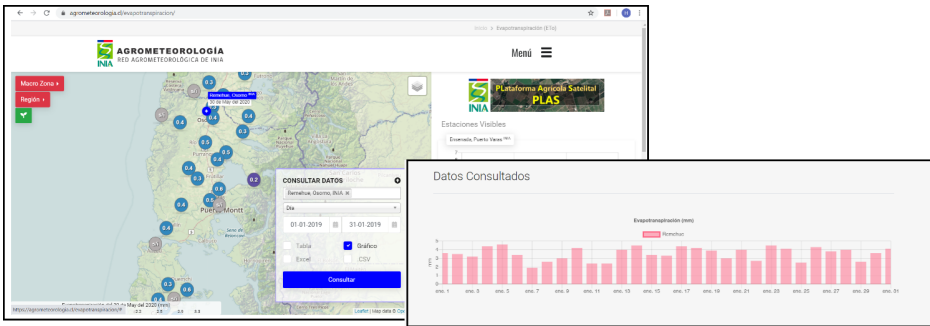


Figura 3.3. Sitio web www.agrometeorologia.cl con datos de Evapotranspiración de referencia diaria, en el mes de enero. Fuente: elaborado en base a datos obtenidos del sitio www.agrometeorologia.cl

Hay otro dato meteorológico relevante para el cálculo de demanda o requerimiento de agua, que son las precipitaciones efectivas. Ellas se definen como aquella fracción de las precipitaciones totales que es aprovechada por las plantas, lo que depende de varios factores como, por ejemplo, la intensidad de lluvia, la pendiente del terreno, etc.

Existen diferentes estudios para calcular una precipitación efectiva, pero en general se puede estimar que una lluvia superior a 10 mm en temporada estival, es considerada efectiva, pero, como ya se indicó, esto varía de acuerdo a algunos factores. Asimismo, es importante considerar las precipitaciones, porque también constituyen un aporte de agua al perfil de suelo y, por lo tanto, influirán en la programación del riego.

La velocidad del viento es otra variable relevante, particularmente en el caso de los sistemas de riego por aspersión y en especial en la región de Aysén, ya que influye en los patrones de distribución de la lluvia del emisor. Esto puede afectar significativamente la entrega del agua que requiere el cultivo (Figura 3.4). Debido a ello, es importante conocer la tendencia de la velocidad del viento para realizar las aplicaciones de riego, consultando la EMA más cercana al lugar a través de la página www.agrometeorologia.cl. Por esta razón, se recomienda que las aplicaciones se realicen en la mañana o incluso la noche, cuando generalmente hay menos viento, evitando así las pérdidas excesivas por evaporación o deriva.



Figura 3.4. Efecto del viento en un riego por aspersión sistema de Pivote.

Parámetros de suelo

El suelo es considerado como un estanque de humedad disponible para que la planta se desarrolle en condiciones óptimas. Los suelos no son todos iguales y varían desde niveles macro a niveles micro. Existen variaciones entre predios, también al interior de un predio, o al interior de un potrero, pero además hay variaciones según la profundidad en su perfil. Todo lo anterior influye en cómo ingresa el agua al suelo, cómo circula en su interior y cómo es captada por las raíces y pelos radiculares de las plantas o cultivos.

En el sur de Chile predominan los suelos de origen volcánico (Andisoles) que en general presentan valores altos de retención de humedad, sin embargo, en la Región de Aysén, trabajos realizados por INIA Tamel Aike dan cuenta de una gran diversidad de suelos y con baja capacidad de retención de humedad y variabilidad de densidad aparente. Esto se explica porque son suelos de una evolución más reciente, muy ricos en arenas. Debido a las condiciones climáticas, el proceso de formación y evolución de las fracciones arcillosas ha sido lento y escaso, es decir, estos suelos no han alcanzado su madurez edáfica. Es importante continuar investigando sobre este tema, ya que hay

estudios que revelan la fragilidad de estos suelos ante manejos intensivos, erosión hídrica y eólica. Estos procesos modifican las propiedades de porosidad y penetración, factores fundamentales para el almacenamiento y entrega de agua a las raíces de las plantas.

Lo recomendable en un manejo del riego, es enviar una muestra de suelo a un laboratorio para un análisis físico-hídrico, para obtener información de la capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y densidad aparente (D_a), y de acuerdo a estos valores, poder determinar la capacidad de almacenamiento de agua del suelo.

Un método práctico, mientras se esperan los resultados de la física de suelos, es tomar una muestra de suelo desde el área (profundidad) donde se concentran las raíces y moldearla hasta formar una masa uniforme. Luego debe ser lanzada en el aire sobre la palma de la mano y registrar si se rompe o se mantiene. Si no se rompe, la humedad del suelo se estima que se encuentra a una condición de capacidad de campo, al contrario, si la masa de suelo se rompe al regresar a la palma de la mano, el suelo estaría deficitario de humedad (Figura 3.5). Esta metodología ha sido elaborada por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

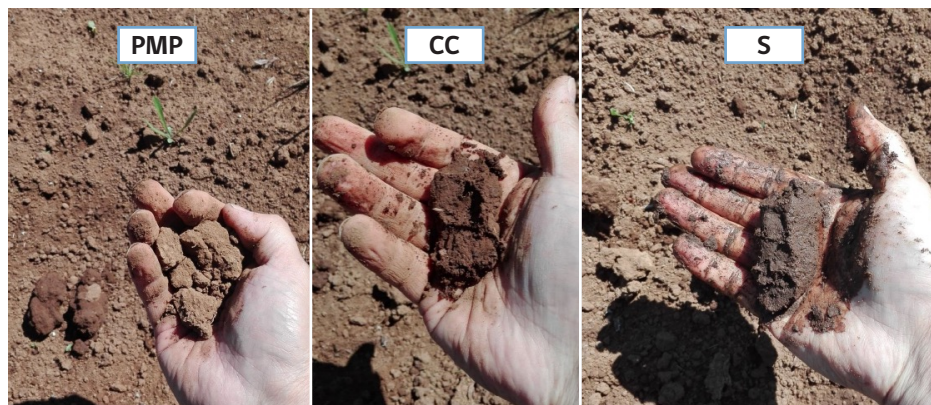


Figura 3.5. Muestras de suelo franco arcillo limoso en condición de Punto de Marchitez Permanente (PMP), Capacidad de Campo (CC) y Saturación (S). Fuente: elaboración propia.

Demanda y oferta de agua

El micro ciclo hidrológico que ocurre a través de la planta, al movilizar agua desde el suelo a la atmósfera, está caracterizado por una constante interacción entre la oferta y la demanda de agua. A continuación, se revisan los principales elementos a considerar en esta relación.

La oferta de agua se refiere a la cantidad disponible en el suelo, el que actúa como un estanque o reservorio, desde el cual la planta extrae la cantidad necesaria. Esto es influenciado por las condiciones ambientales, como la temperatura y viento, que afectan la transpiración y evaporación del agua en la planta. Lo anterior provoca un flujo de agua que permite la extracción de nutrientes desde el suelo para el proceso fisiológico que se llevará a cabo en la planta para la producción fundamentalmente de azúcares (fotosíntesis).

Para determinar esa capacidad de estanque del suelo y, por lo tanto, la oferta de agua, es necesario tomar muestras de suelo para un análisis físico que se realiza en laboratorio. Allí se obtienen los datos de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), con los cuales se determina la humedad aprovechable (HA) y, consiguientemente, la capacidad de retención de agua del suelo.

Los suelos de una zona determinada de una comuna son espacialmente variables e incluso, si se observa a una escala a nivel intrapredial o en un potrero, se pueden encontrar diferencias, es decir, existe una heterogeneidad espacial importante. En la actualidad se dispone de diversos métodos y equipos para determinar esta heterogeneidad, por ejemplo, una rastra electromagnética, uso de imágenes de drones o satélites, etc. Sin embargo, ello sólo permite resolver una parte de lo que interesa, pues para el riego es fundamental conocer el comportamiento que tendrá el agua en el perfil de suelo y para ello se utilizan análisis de laboratorio que comienzan con la adecuada toma de muestra.

Muestreo de suelo

Para el muestreo de suelos, lo primero es delimitar claramente el área de riego, establecer su heterogeneidad (Figura 3.6) y, de acuerdo a ello, determinar dónde y cuántas muestras se deben tomar y enviar al laboratorio.



Figura 3.6. Heterogeneidad de suelo en un área de riego. Fuente: elaboración propia.

Luego, se debe determinar la profundidad a la cual tomar la muestra, lo que depende de la especie que se está trabajando. Por ejemplo, si es una pradera y la especie predominante es ballica perenne, el 80 % de las raíces se ubican alrededor de los primeros 15 cm del perfil, esa sería la profundidad a considerar. Si la especie o cultivo que se debe regar posee una estructura radicular más profunda (ej. alfalfa), entonces se debe conocer la zona donde se ubica la mayor proporción de raíces (Figura 3.7).

Ballica p. con riego



Mayor concentración de raíces

Figura 3.7. Profundidad en la cual se concentra la mayor cantidad de raíces. Fuente: elaboración propia.

La metodología para extraer una muestra es muy relevante, pues en general, lo más recomendable es que la muestra no sea disturbada. Para determinar algunos parámetros sensibles en el riego, como la densidad aparente, el método más apropiado es el del cilindro, que consiste en extraer la muestra mediante un cilindro de acero inoxidable y, en algunos casos, de PVC (Figura 3.8), que se inserta en el perfil de suelo mediante un procedimiento estandarizado. Más detalles son proporcionados por los mismos laboratorios donde se envían las muestras.



Figura 3.8. Toma de muestra con cilindro. Fuente: Laboratorio de Suelos INIA Quilamapu.

También existe, para el resto de los parámetros de la curva de retención de humedad, como la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, el método del terrón, que es posible en suelos más estructurados. Sin embargo, esto debe ser previamente acordado con el laboratorio, para saber si pueden obtener todos los parámetros que se requieren para el riego desde una muestra de este tipo.

Análisis en el laboratorio

Los laboratorios que realizan este tipo de análisis disponen de diversas metodologías y protocolos que están estandarizados. Lo importante es indicar claramente lo que se solicitará para que responda las interrogantes relacionadas con el riego.

Uno de los procedimientos que se realiza a las muestras y es esencial para conocer la retención de humedad de los suelos, es la medición de tensión con la que el agua se encuentra retenida en la matriz del suelo. Para ello la muestra se coloca en un plato de presión (especie de olla a presión; Figura 3.9) a una tensión de 0,33 bares la cual representará la tensión de **capacidad de campo (CC)**, y en otro plato se aplica una tensión de 15 bares, que representa la tensión en **punto de marchitez permanente (PMP)**. Con estos dos valores se puede conocer posteriormente la humedad aprovechable para las plantas.



Figura 3.9. Instrumento de medición de tensión de humedad en el suelo. Fuente: INIA Quilamapu.

Mediante el uso de estos platos (ollas) se puede obtener también datos intermedios (entre CC y PMP), de modo de obtener la curva de retención de humedad del suelo. El laboratorio entrega finalmente un informe con la información solicitada (Figura 3.10).

INIA		LABORATORIO DE DIAGNÓSTICO NUTRICIONAL DE SUELO Y PLANTAS						Laboratorio Suelos INIA		
INFORME RESULTADOS ANÁLISIS FÍSICO DE SUELO										
1 IDENTIFICACIÓN DEL AGRICULTOR										
Número :						Ciudad :				
R.U.T. :						Fono :				
Dirección :						Fax :				
2 IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA										
Predio :						Comuna :				
Rol :						Provincia :		Región :		
3 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS										
Número Lab.	Identif. Muestra	Valores de		Textura según Sist. USDA (40° y 42°)			Densidad Aparente (Cilindro)	Densidad Real (Picnometro)		
		pH	% M.O.	Limó (0,002mm a 0,05mm)	Arcilla (< 0,002mm)	Clase Textural del Suelo				
				---(%)---			g/cm ³	g/cm ³		
11217	20 CMS.	5,42	5,71	14,33	48,59	37,08	FRANCO ARCILLO LIMOSO	1,15	2,37	
11218	50 CMS.	5,80	2,16	13,56	41,02	45,42	ARCILLO LIMOSO	1,21	2,44	
11219	70 CMS.	5,75	1,48	33,64	34,04	31,41	FRANCO ARCILLOSO	1,33	2,40	
11220	90 CMS.	6,26	0,60	60,68	26,51	12,81	FRANCO ARENOSO	1,38	2,46	
4 RETENCIÓN DE HUMEDAD (10-15 ATM) / CURVA CARACTERÍSTICA (10-1-5-10-15 ATM)										
Número Lab.	Identif. Muestra	CURVA RETENCIÓN DE HUMEDAD						Espacio Poroso Total (Porosidad) EP %	Número Poroso e	
		0,1 ATM (%)	10 ATM CC (%)	1 ATM (%)	5 ATM (%)	10 ATM (%)	15 ATM PMP (%)			10-1-5-10-15 ATM
CURVA DETERM. POR TERRÓN										
11217	20 CMS.	39,85	36,11	29,80	26,48	-	25,75	10,36	51,35	1,06
11218	50 CMS.	49,61	39,73	33,90	35,46	-	33,26	6,47	50,64	1,02
11219	70 CMS.	34,41	31,49	31,67	30,13	-	29,20	3,29	48,76	0,98
11220	90 CMS.	26,87	26,52	23,62	13,64	-	11,96	14,86	43,74	0,78

Figura 3.10. Informe del laboratorio de suelos de INIA Quilamapu. Fuente: INIA Quilamapu.

Aplicación de los resultados en riego

Se utilizan los datos de la capacidad de campo (CC), que corresponde al contenido de humedad que existe en el suelo después de un riego o una lluvia, previo drenaje del exceso de agua en el perfil de suelo (24-48 horas). También se utiliza el valor de punto de marchitez permanente (PMP), que corresponde al límite inferior de humedad aprovechable por las plantas. Si los valores anteriores están expresados en porcentaje base peso seco, se utiliza la densidad aparente (Da) para convertir la humedad gravimétrica a humedad volumétrica. Además y para vincular estos cálculos a la especie correspondiente, se considera también la profundidad efectiva de las raíces (Prof).

A continuación, como ejemplo, se utilizan los resultados de un muestreo de suelo en la serie Osorno, en una pradera donde predomina la ballica perenne y utilizada para producción de leche. Cuenta con riego mediante Pivote Central y las muestras fueron enviadas al laboratorio con los siguientes valores resultantes:

CC = 44,9 % base peso seco

PMP = 30,7 % base peso seco

Da = 0,64 g/cm³

Prof raíces = 0,15 m (15 cm)

Con esta información se puede obtener la humedad aprovechable (HA) y para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$HA = (CC - PMP) \times Da \times Prof \times 10$$

$$HA = (44,9 - 30,7) \times 0,64 \times 0,15 \times 10 = 13,6 \text{ mm}$$

Una vez que las raíces comienzan a extraer el agua aprovechable y el nivel de humedad comienza a descender desde CC, se establece un umbral de riego hasta el cual las plantas pueden mantener su nivel de rendimiento óptimo. Ello, debido a que si se llevan a niveles muy cercanos a PMP, las plantas se van estresando gradualmente. El umbral de riego se conoce también como "criterio de riego" (CR) y en el caso de las praderas se estima entre un 40-60 %. Para el caso del ejercicio realizado con la muestra de suelo de praderas, se considera un valor de 50 %. Aplicando la ecuación siguiente, se obtiene la lámina neta (LN) que se debe aplicar con riego.

$$LN = HA \times CR \text{ es decir } LN = 13,6 \text{ mm} \times 0,5 = 6,8 \text{ mm}$$

Sin embargo, esta lámina se debe aplicar con un sistema de riego que presenta cierto grado de eficiencia. Para conocer la real lámina aplicar, conocida también como lámina bruta (LB), se incorpora en este caso una eficiencia (Ef) de los sistemas de riego por aspersión, correspondiente a un 75 %, que, incorporada en la siguiente ecuación, permite conocer la lámina de agua que se debe aplicar con el sistema de riego:

$$LB = LN/Ef \text{ es decir } LB = 6,8 \text{ mm} / 0,75 = 9,0 \text{ mm}$$

La demanda de agua para riego, como se mencionó anteriormente, está determinada por las condiciones climáticas. El dato que reúne esas condiciones ambientales se denomina evapotranspiración, que considera valores de diferentes parámetros ambientales como radiación solar, temperatura, humedad ambiental, viento, entre otros. Actualmente, se dispone de la evapotranspiración de referencia (ET_o), la cual es calculada automáticamente en las estaciones meteorológicas que posee el INIA a lo largo de todo Chile, utilizando la ecuación de Penman Monteith.

La lámina bruta (LB) calculada anteriormente será aplicada con una cierta distancia de fechas entre un riego y otro, conocida como frecuencia de riego (FR) y que se obtiene mediante la LN. Para ello se debe conocer la evapotranspiración del cultivo (ET_c) que requiere de datos de la evapotranspiración de referencia (ET_o) obtenida de una estación meteorológica y el coeficiente de cultivo (K_c). Estos conceptos y antecedentes pueden ser revisados en otros documentos publicados por el INIA.

En el caso del muestreo de pradera que se ha presentado como ejemplo para realizar los cálculos, se asume un valor de ET_c de 4 mm/día y aplicando la siguiente ecuación se obtiene la frecuencia de riego (FR).

$$FR = LN / ETc \text{ es decir } FR = 6,8 \text{ mm} / 4 \text{ mm} = 1,7 \text{ días}$$

Lo anterior implica que se deberá volver con riego al mismo potrero cada 2 días aproximadamente. Esto depende de la evapotranspiración que se registra diariamente y, por lo tanto, deberá ser monitoreado y ajustado a los valores que se vayan presentando en el transcurso de la temporada de riego.

Monitoreo del riego

Si se conocen los parámetros que determinan la lámina de agua a aplicar y la frecuencia de riego, se puede verificar información que indique los rangos y valores adecuados para una gestión del riego más eficiente.

Un factor importante es el contenido de humedad en el suelo, el cual puede monitorearse mediante un muestreo básico, como el descrito anteriormente, sacando muestras de suelo y realizando una masa que permita conocer la forma y estabilidad de la misma. Sin embargo, hoy también existen sensores de humedad, que permiten una mayor precisión en la aplicación del riego.

La capacidad de estanque del suelo depende de sus propiedades y son tres las más importantes: textura, estructura y porosidad. Cada suelo posee características

distintas, dependiendo de estas propiedades, sin embargo, es posible resumir en dos grandes características que determinan cómo la planta aprovecha el agua en el suelo: contenido del agua en el suelo y el estado energético del agua.

Que exista agua en el perfil de suelo no necesariamente implica que está totalmente disponible para las plantas, por ello es importante evaluar estas dos condiciones. Si se desea realizar un monitoreo del riego existen básicamente dos tipos de sensores que abordan estas condiciones. Por una parte están los Sensores de Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia (FDR), que miden el coeficiente dieléctrico de la matriz de suelo, lo que permite estimar el contenido de agua en el suelo. También están los Sensores de Reflectometría en el Dominio del Tiempo, TDR, que también miden el coeficiente dieléctrico, pero a través de un pulso electromagnético (Figura 3.11).



Figura 3.11. Dispositivos de Reflectometría en el Dominio del Tiempo (TDR).

Por otra parte, están los tensiómetros (Figura 3.12), instrumentos que permiten la medición de la tensión con la cual se encuentra retenida el agua en el suelo, es decir, qué tan fácil o difícil será para las raíces extraer esa agua del perfil de suelo. Los tensiómetros más comunes corresponden a un tubo transparente que en uno de sus extremos posee una cerámica porosa que permite la entrada o salida de agua, y en el otro extremo está el registrador (manómetro), que indica a qué tensión se encuentra el agua. Esto ayuda al productor a conocer si es necesario o no activar el riego.

Cabe señalar que todos los instrumentos tienen sus restricciones de medición, y su rango de representatividad está acotado muchas veces a pocos centímetros desde



Figura 3.12. Tensiómetro.

donde se ubican. Por lo tanto, la complementariedad con otro tipo de información es fundamental para abarcar el o los potreros de riego, así como para poder monitorear diferentes sectores del área de riego.

En cuanto a los sensores de humedad FDR, los más utilizados hoy día a nivel predial son los Sensores de Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia (FDR). Éstos se basan en las propiedades del suelo como conductor eléctrico y miden el coeficiente eléctrico aparente de éste y que varía fundamentalmente en función del contenido de agua del suelo, puesto que su valor es muy superior a los que presenta el aire y los sólidos que componen el suelo. En general, un sensor de capacitancia se compone de un cuerpo que contiene varillas o agujas que se entierran en el suelo y un cable para transmitir la información a un registrador (Figura 3.13).



Figura 3.13. Sensor tipo FDR marca Meter, modelo Teros12.

Para el registro de los datos que obtienen los sensores, se utiliza un registrador o data logger, que almacena y, eventualmente, transmite la información a distancia. Por ejemplo a un servidor, desde donde se descarga o también una descarga directa mediante una conexión data logger-notebook.

Para la utilización de sensores se requiere de una calibración que implica la toma de muestras de suelo para elaborar una curva de retención de humedad, que identifique el punto de capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP), lo que a su vez permite identificar un valor de umbral de riego con el cual establecer el momento de riego.

Adicionalmente, una vez instalados los sensores, se realiza un seguimiento a los datos que genera el registrador producto de la información que entregan los sensores, con ello se puede obtener un patrón de datos que confirman una información coherente e interpretable (Figura 3.14).

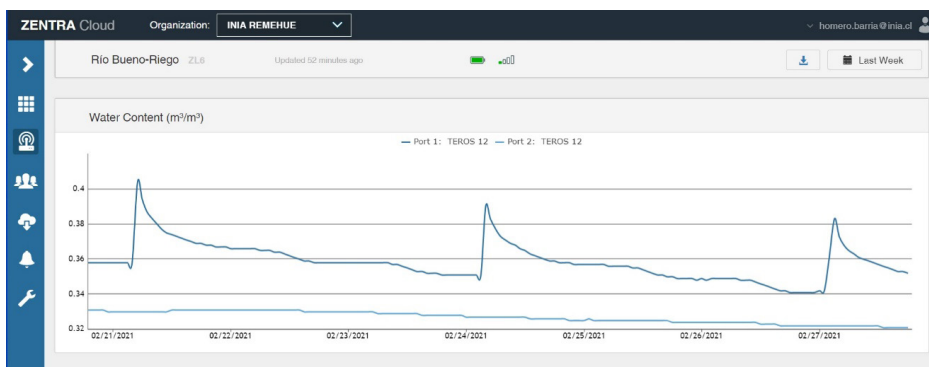


Figura 3.14. Patrón de humedad en el suelo luego de aplicación de riego.

Calidad de riego

La calidad del riego, se refiere a cómo el agua de riego cumple con los requisitos necesarios para su uso eficiente y óptimo en la agricultura, generándose de acuerdo a estos dos conceptos: la uniformidad del riego y la eficiencia del riego.

Uniformidad de riego

La uniformidad del riego, se refiere a la aplicación de una lámina de agua similar en todos los puntos del potrero a regar (Figura 3.15). Una adecuada uniformidad garantiza que todas las plantas reciban la cantidad necesaria de agua, evitando así el estrés hídrico y asegurando un crecimiento saludable. Existen diversas técnicas para mejorar la uniformidad en el riego, siendo una de ellas la selección adecuada del sistema de riego, que considera factores como el tipo de cultivo, las condiciones climáticas y la topografía del terreno. Por otra parte, otro aspecto clave es tener un buen diseño y distribución de los emisores o aspersores, asegurando una correcta instalación y ajustado para garantizar una cobertura homogénea del agua. Asimismo, se recomienda realizar una adecuada programación y control del riego, lo que implica establecer horarios y duraciones óptimas para evitar excesos o deficiencias en el suministro de agua. Es fundamental llevar a cabo un monitoreo constante del sistema de riego, lo que permitirá identificar posibles problemas como obstrucciones o fugas que pueden afectar negativamente la uniformidad en el riego.

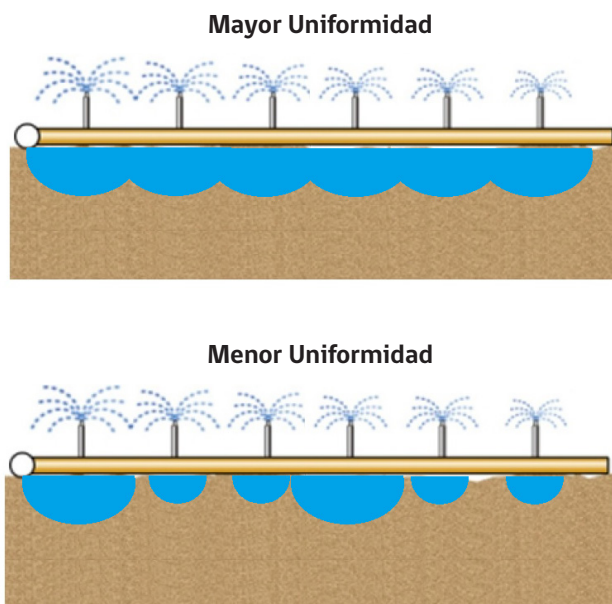


Figura 3.15. Esquema de mayor y menor uniformidad del agua infiltrada en la aplicación de un riego.

Eficiencia de riego

El concepto eficiencia en el riego se refiere a que la fracción del agua aplicada se utilice efectivamente para responder a la demanda del cultivo o la planta. La eficiencia del riego es fundamental para maximizar el uso eficiente del agua y minimizar las pérdidas en la agricultura. Algunas consideraciones para lograr eficiencia están vinculadas al programa de riego establecido, de acuerdo a las necesidades específicas de cada cultivo, que dependen del tipo de suelo, clima y desarrollo vegetativo del cultivo. También se ha señalado la importancia del monitoreo constante del riego, por ejemplo, mediante sensores que permiten determinar la cantidad precisa de agua que necesita la planta.

Otro ámbito de relevancia para un riego eficiente son los equipos utilizados, la pertinencia técnica de uno u otro sistema, como también la mantención, calibración y seguimiento de la operación de los diferentes equipos y elementos de los sistemas de riego. Cualquier fuga o desperfecto puede generar pérdidas significativas de agua y también de energía. Un factor poco resaltado en diferentes documentos y textos técnicos de riego, pero que es de gran importancia, es la necesidad de estar constantemente capacitándose en las nuevas tecnologías asociadas a un uso eficiente del agua de riego.

Evaluación de los equipos de riego

Como se mencionó en los párrafos anteriores, la correcta evaluación de los equipos y elementos de un sistema de riego, permiten lograr una alta calidad del riego. En el riego de praderas, los sistemas de riego utilizados son fundamentalmente de aspersión, cuyas características es necesario destacar para conseguir un uso óptimo. El comportamiento del agua que emite un emisor de riego por aspersión (un aspersor), en esencia es poco uniforme, por su sensibilidad al viento. Por esta razón, los fabricantes recomiendan en sus catálogos diferentes configuraciones de emplazamiento de los aspersores y los tamaños de boquillas que deben utilizarse, todo lo cual está vinculado además a los caudales y presiones de diseño del proyecto de riego.

Si bien hay varios factores que intervienen en la definición de la disposición de los aspersores, como del tipo y tamaño del emisor, existen dos factores principales que se deben tener en consideración cuando se está regando con aspersores.

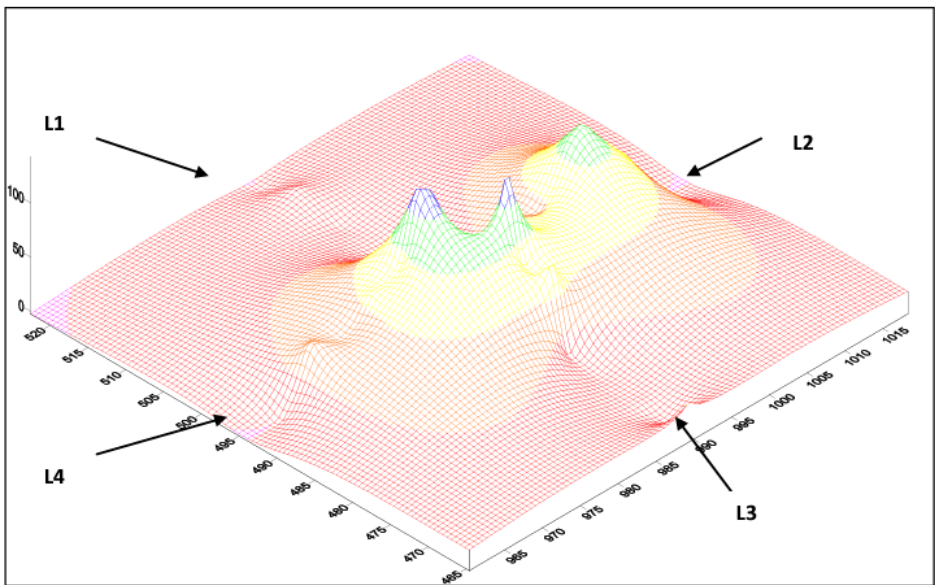


Figura 3.16. Patrón de distribución de la precipitación de un aspersor tipo cañón en un sistema de carrete de riego. L1, L2, L3 y L4 corresponden a las líneas de pluviómetros utilizados para determinar el patrón de distribución. Fuente: U. Autónoma Agraria Antonio Narro, México (2015).

Por una parte, cada aspersor posee emisores que entregan una precipitación definida por el fabricante, bajo ciertas condiciones de caudal y presión. Dicha precipitación, en segundo lugar, debe relacionarse con la capacidad de infiltración del suelo, es decir,

la capacidad que tiene el suelo de recibir e infiltrar esa precipitación o pluviometría. Por ejemplo, con un emisor que entrega 14 mm/hora y está regando un suelo que presenta una infiltración de 8 mm/hora, probablemente el agua no podrá ser absorbida adecuadamente en el perfil de suelo y puede presentarse encharcamiento e, incluso, falta de oxígeno en las raíces. Obviamente hay otros factores que revisar, pero es importante por lo menos hacer el ejercicio de comparar la precipitación del aspersor y la capacidad del suelo de infiltrar.

Se recomienda que en terreno se realicen al menos evaluaciones básicas en riegos por aspersión. Por una parte, conocer la precipitación que entregan los aspersores, para ver por la distribución espacial (ancho o radio de acción) y la pluviometría de los emisores (mm/h). Asociado a lo anterior, la medición de la velocidad de infiltración del suelo, debe ser un factor muy importante en las evaluaciones que se realicen.

Infiltración del agua en el suelo

La infiltración es el proceso de paso del agua desde la superficie del suelo hacia el interior del mismo. El proceso está dominado por procesos cerca de la superficie del suelo, pero también por el movimiento del agua en el perfil. Para explicar la infiltración del agua, se debe considerar que el suelo está compuesto por poros, en los cuales hay aire y agua. Por lo tanto, luego de una lluvia o riego, el agua se desplaza a través de los poros, llenando parte o incluso la totalidad de los poros existentes y avanzando en profundidad de mojado. Cuando se ha llenado la totalidad de los poros de la capas superiores que se considera el reservorio de humedad para las raíces de las planta, el suelo está en saturación. La cantidad de agua por unidad de tiempo (velocidad de infiltración) que entra al suelo depende no sólo de la capacidad de éste de almacenar agua, sino también de la velocidad con que el agua se transmite a las demás capas del perfil de suelo. Entre la zona seca y húmeda hay una zona que se conoce como frente de humectación, donde el movimiento del agua está influenciado por diversas fuerzas que interactúan allí.



Figura 3.17. Encharcamiento de agua, cuando la velocidad de infiltración del suelo es menor a la precipitación que entrega el emisor.

En el diseño de los equipos de riego, principalmente en aquellos que contemplan la aspersión, se debe considerar, que a objeto de evitar tanto el empozamiento (Figura 3.17) y escurrimiento superficial del agua de riego, la precipitación provocada por el aspersor ha de ser inferior a la velocidad de infiltración básica del suelo.

Existen varios factores que influyen en la infiltración del agua en el suelo, tales como el contenido de humedad en el suelo, su textura y estructura, la pendiente del terreno, el tipo de preparación del suelo, la compactación, la cobertura que posee el suelo, el contenido de materia orgánica, las sales y el sistema de riego, entre otros.

En el perfil de suelo, el agua está sometida a diferentes energías provocadas por la gravedad, la capilaridad, la adsorción y la osmosis, en una permanente búsqueda de equilibrio, que finalmente determina el movimiento del agua en una dirección y con una velocidad determinada.

Los suelos con una mayor proporción de arena presentan una infiltración más rápida, debido a mayor proporción de macroporos. Por el contrario, los suelos con alto

contenido de arcilla tienen una infiltración lenta, con mayor microporosidad. En suelos con pendiente, el agua en vez de infiltrar tiende a escurrir sobre la superficie, mientras que en terrenos planos, pero que han soportado un intenso pisoteo de ganado o movimiento de maquinaria, es posible que la compactación impida una adecuada infiltración y se produzca una acumulación del agua sobre la superficie. En un mismo predio, se podría encontrar variabilidad en la velocidad de infiltración, según el potrero que se requiera evaluar.

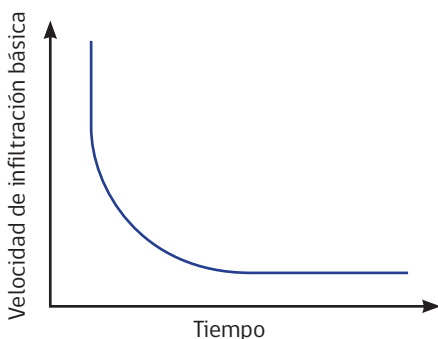


Figura 3.18. Velocidad de infiltración del suelo según el tiempo transcurrido.

El comportamiento del agua en el suelo es variable. Sin embargo, la velocidad de infiltración en un punto del suelo, en general disminuye con el tiempo, inicialmente más rápido, decreciendo hasta alcanzar un nivel mínimo estable conocido como infiltración básica (Figura 3.18).

Medición de la velocidad de infiltración

Existen varios métodos para medir la velocidad de infiltración, siendo el más conocido y utilizado en diseños de riego, el Infiltrómetro de doble anillo (Figura 3.19).

El instrumento consiste en dos anillos metálicos, en este caso el anillo interior mide 30,5 cm de diámetro y el anillo exterior 54 cm de diámetro. El espacio de medición corresponde a la zona interior del



Figura 3.19. Infiltrómetro de doble anillo.

anillo de menor diámetro, mientras que el anillo exterior, tiene por objetivo crear una zona de amortiguación, para que el agua infiltrada del anillo interior no sea afectada por flujos laterales u otra distorsión de la medición (Figura 3.20).

Mediante un protocolo de medición que contempla registrar el movimiento de la varilla graduada, cada cierto intervalo de tiempo, se genera una curva de infiltración que al estabilizarse proporciona la velocidad de infiltración básica.

Una vez seleccionado el sector donde se medirá, que debe ser lo más representativo de las condiciones generales de la superficie de riego, se introducen los cilindros en el suelo lo más concéntrico posible y con la menor perturbación de suelo.

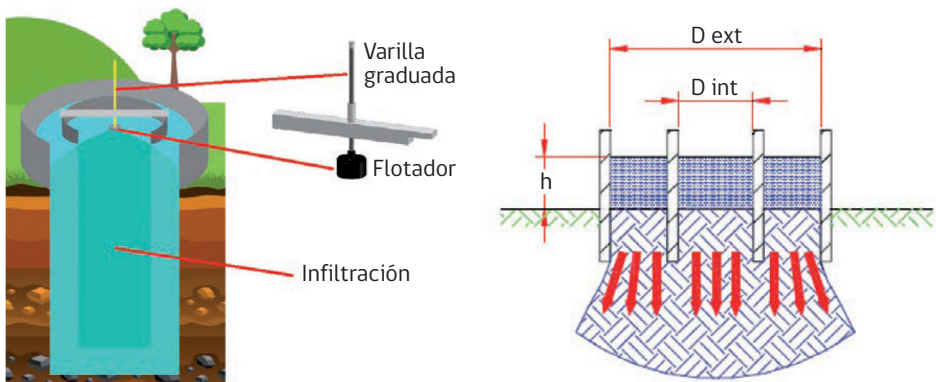


Figura 3.20. Medición con infiltrómetro.

Para los cálculos de velocidad de infiltración se considera el modelo de Kostiakov (1932), modificado por Lewis (1979) y para el caso del infiltrómetro de doble anillo se utiliza una planilla, en la cual se ingresan fundamentalmente los datos de recarga de agua y tiempo transcurrido.

A continuación, si se observa el Cuadro 3.1, en la columna 2 se anota el tiempo que se utilizará para ir midiendo el movimiento del agua en el cilindro. En la columna 6 se registra la variación que se observa en la varilla graduada o regla mientras transcurre el tiempo, la columna 7 indica la diferencia acumulada registrada o la lámina infiltrada. La columna 8 es la velocidad de infiltración, obtenida del cociente entre los valores de las columnas 6 y 2, que multiplicada por 60 minutos, entrega un valor en centímetros por hora (cm/h).

Cuadro 3.1. Planilla para ingreso de datos de infiltrómetro.

Hora	Tiempo parcial (min)	Tiempo acumulado (min)	Carga agua inicial (cm)	Carga agua final(cm)	Lámina infiltrada parcial (cm)	Lámina infiltrada acumulada (cm)	Velocidad de infiltración (cm/h)
9:00	0		6.5				
9:05	5	5	6.5	6.7	0.2	0.2	2.40
9:10	5	10	6.7	7.2	0.5	0.7	6.00
9:20	10	20	7.2	7.7	0.5	1.2	3.00
9:30	10	30	7.7	8.1	0.4	1.6	2.40
9:45	15	45	8.1	8.7	0.6	2.2	2.40
10:00	15	60	8.7	9.2	0.5	2.7	2.00
10:30	30	90	9.2	9.9	0.7	3.4	1.40

Automatización de los sistemas de riego

En la búsqueda de datos que otorguen mayor precisión y seguridad de una oportuna y adecuada aplicación de agua de riego, surgen los equipos automatizados, los cuales de manera autónoma y evaluando los datos que entregan diferentes sensores y fuentes de información, actúan sobre el cultivo, realizando la aplicación de agua y nutrientes más adecuada, logrando ahorro en agua, fertilizantes y energía.

En la actualidad, los sistemas de riego inteligente se han convertido en una herramienta esencial para optimizar el riego y la fertilización en los cultivos. Gracias a los avances tecnológicos, ahora es posible implementar el control automatizado del riego, utilizando sensores que monitorean constantemente las condiciones del suelo y las necesidades hídricas de las plantas.

La transmisión de datos desde los sensores a un punto donde el agricultor y/o asesor pueden tomar decisiones, hoy se produce de manera instantánea y a distancia, sin necesidad de requerir necesariamente la presencia de quien gestiona la producción. Los equipos utilizan la telemetría, que esencialmente se trata de transmisión de datos vía protocolos de comunicación, que cada vez son más sofisticados, pero que facilitan el acceso instantáneo de información. Esta información puede luego ser procesada e integrada para entregar un producto/resultado para decidir qué acciones tomar respecto del desarrollo de un cultivo.

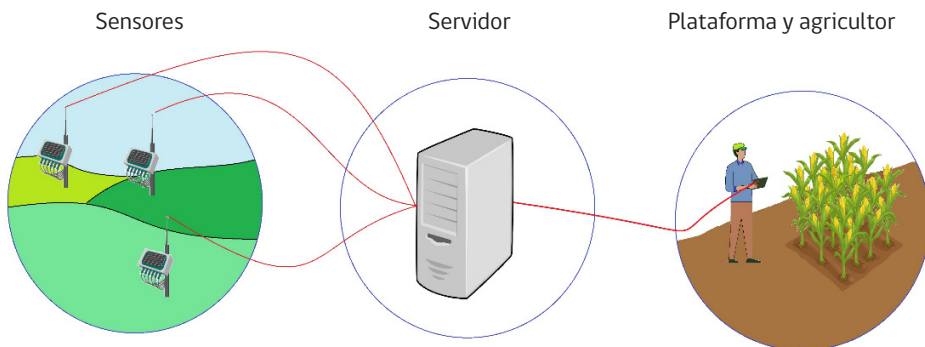


Figura 3.21. Esquema de un sistema de transmisión de datos de sensores y utilización por usuarios.

Los sensores detectan variaciones de los parámetros monitoreados y, por ejemplo, permiten una dosificación precisa de fertilizantes, evitando así el desperdicio de recursos y asegurando que las plantas reciban exactamente lo que necesitan para un crecimiento saludable. Además, al tener información en tiempo real sobre la humedad del suelo y otros parámetros relevantes, los agricultores pueden tomar decisiones informadas sobre cuándo regar y cuánta agua aplicar (Figura 3.21).

Conclusiones

En la medida que más tecnología se incorpora al monitoreo del agua en el suelo y la planta, se dispone de mejores datos e información para la toma de decisiones, que pueden ser más precisas y eficientes.

La tecnología debe ir acompañada de observación en terreno con muestreos en el lugar que está monitoreando. Esto permitirá confirmar la interpretación que se ha realizado con los diversos equipos instalados en el campo.

La eficiencia hídrica en la agricultura es cada vez más importante debido a la escasez de agua. Los sistemas de riego inteligente ayudan a reducir el consumo excesivo de agua al ajustar automáticamente los tiempos y volúmenes de riego según las necesidades reales de las plantas, lo que no sólo beneficia al medio ambiente, sino también a los agricultores al reducir sus costos operativos.

Capítulo 4

Sistemas de riego por aspersión para uso en praderas

Homero Barría O.

Introducción

La producción ganadera en la zona sur y austral de Chile, se sustenta en la producción de praderas, en el pastoreo de distintas especies forrajeras. En particular, en la Región de Aysén la ganadería utiliza principalmente zonas con praderas, matorrales y estepas. La existencia de nuevas praderas, basadas en mejores especies, uso más generalizado de fertilizantes y manejos más eficientes, ha ido abriendo camino a evaluar alternativas de sistemas de riego, que permitan aprovechar mejor el potencial productivo de estas praderas.

En la Región de Aysén se usan principalmente los sistemas de aspersión, que son los más utilizados y recomendados en el riego de praderas. Sin embargo, estos sistemas son exigentes en energía, que es la que aporta la presión suficiente para que los emisores logren operar adecuadamente y distribuyan el agua de riego en las praderas.

Existen diversas fuentes de energía y equipos de impulsión que pueden resolver los requerimientos o necesidades de presión de los sistemas de riego.

En este capítulo se abordan los principales sistemas de riego utilizados en praderas y los sistemas de impulsión con las fuentes de energía que abastecen a estos sistemas.

Sistemas de riego por aspersión

No existe un “mejor” sistema de riego, ya que no todos tienen las características para cumplir con los diversos requerimientos que exigen los cultivos, las zonas donde se implementan los sistemas de riego e, incluso, las estrategias particulares de los productores o de sus asesores.

Los sistemas de riego se diseñan para ciertas condiciones de operación, teniendo en consideración algunos de los siguientes factores:

- El cultivo a regar: donde se contempla la morfología radicular, densidad de la especie, el tipo de crecimiento, susceptibilidad a enfermedades, entre otras variables.
- Disponibilidad de agua: ¿qué fuente de agua abastece la zona a regar?, ¿qué caudal existe?, ¿existe la seguridad jurídica del agua?, ¿cuál es la calidad del agua?, ¿cuáles son las distancias involucradas?, entre otros.
- El suelo: las características de textura y estructura, topografía, velocidad de infiltración y otras variables.
- El recurso humano: la mano de obra requerida y su disponibilidad, asesoría especializada en riego al alcance del productor, las capacitaciones y actualizaciones en el uso de los sistemas de riego, etc.

En este contexto, el riego de praderas ha utilizado desde hace ya muchas décadas los sistemas de aspersión, puesto que consiste en una lluvia emitida desde un emisor, que se distribuye en una amplia superficie. Esto es especialmente recomendable para especies de alta densidad de siembra como las forrajeras.

En la zona sur y austral de Chile, mayoritariamente se utilizan sistemas de riego tecnificado por sobre los sistemas de riego gravitacional, debido a las características de suelo y topografía existentes. Dada la importancia de la ganadería en esta parte del país, los sistemas de riego por aspersión tienen una gran aplicación y han permitido el desarrollo productivo de ciertas zonas de la Región de Aysén. Según el Censo Agropecuario y Forestal del año 2022, hoy se estima que hay más de 1.000 ha regadas por aspersión.

Las praderas ocupan grandes extensiones de terreno, especialmente en la Región de Aysén, por lo tanto, los sistemas de riego requieren considerar el factor de superficie a regar. En cuanto a topografía, las zonas de riego en esta región poseen áreas bastante planas, pero también hay extensiones de praderas en terrenos ondulados, lo que determina los principales sistemas de riego que se utilizan en esta zona.

Los sistemas de riego por aspersión se pueden clasificar de varias formas, por ejemplo, por la envergadura de los equipos, pero la clasificación más conocida es por su tipo de desplazamiento. De acuerdo a ello, existen los sistemas estacionarios, los cuales permanecen fijos mientras riegan y los de desplazamiento continuo, es decir, se mueven mientras aplican el agua. A partir de esta clasificación se encuentran los diversos tipos de equipos y máquinas de riego, como se indica en la Figura 4.1.

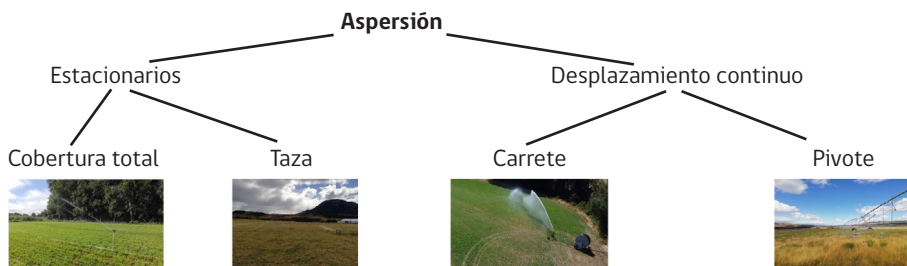


Figura 4.1. Clasificación sistemas de riego por aspersión.

Consideraciones generales de los sistemas de riego por aspersión

Estos sistemas se adaptan muy bien a terrenos con topografía irregular, ondulados y de pendientes fuertes. No se requiere nivelación de terrenos y se recomiendan en suelos que presentan mayor velocidad de infiltración. En general, presentan mayores costos de inversión en equipos, vinculado principalmente a las necesidades de presión.

También poseen mayores costos de operación cuando están asociados a equipos de impulsión mecánica. Su uso se ve limitado en zonas de excesivo viento, lo que afecta la uniformidad de distribución y la eficiencia de aplicación, aunque existen aspersores y sistemas de ubicación de los mismos que pueden ayudar a disminuir el efecto del viento.

En general, cualquier sistema de riego por aspersión está compuesto por un equipo de bombeo, tuberías, equipos de aspersión y accesorios. Sin embargo, si el predio a regar se encuentra en un área de cota inferior a la cota desde donde se obtiene el agua para riego y es suficiente para generar la energía que requieren los equipos de aspersión, entonces en ese caso el bombeo no existe, y en su lugar, sólo la fuerza de gravedad será la que otorgue la energía necesaria.

A continuación, se presentan las características más importantes de estos componentes, en una condición de impulsión mediante sistemas de bombeo.

Centro de impulsión

El centro de impulsión (centro de control del riego) contiene habitualmente las bombas, que son los elementos esenciales en esta parte del sistema. Deben ir acompañadas de otros elementos accesorios, que no por eso son menos importantes, por ejemplo, un sistema de filtrado, válvulas de aire, válvulas de control y, en la actualidad, los elementos de automatización y fertirriego.

Bombas

Las bombas, en general, están compuestas por dos elementos: el motor y la bomba propiamente tal, como se indica en la Figura 4.2.



Figura 4.2. Componentes de una bomba de riego.

Las bombas son máquinas capaces de transmitir energía a un fluido, transformando la energía mecánica (procedente del motor) en energía hidráulica, fundamentalmente en forma de energía cinética y de presión.

La diversidad de bombas existentes para distintos tipos de trabajo es amplia y se pueden clasificar dependiendo de diferentes factores (Cuadro 4.1).

Cuadro 4.1. Clasificaciones de bombas.

Según el tipo de flujo o rodete	Según la disposición del eje	Según el número de impulsores	Según el tipo de aspiración	Según el tipo de motor
Bomba radial o centrífuga pura	Bombas de eje vertical	Bombas monocelulares	Bombas de simple aspiración	Bombas de motor seco
Bomba de flujo mixto	Bombas de eje horizontal	Bombas multicelulares o multietapa	Bombas de doble aspiración	Bombas de motor sumergido
Bomba axial o de hélice				

Para las bombas más utilizadas en riego se puede usar la clasificación según el tipo de flujo:

- Radiales o centrífugas: el agua hace un giro perpendicular al eje de rotación del rodete.
- Axiales o helicoidales: el agua gira en el sentido del eje, es decir, el agua sale paralelo al eje de rotación del impulsor.
- De flujo mixto: como su nombre lo indica, aprovechan características de las bombas radiales y axiales. Su diseño permite integrar movimientos rotacionales y lineales para impulsar el agua.

La gran mayoría de las bombas utilizadas en riego son del tipo radial o centrífuga, existiendo diferentes modelos que son específicos para caudal o presión, dependiendo de los requerimientos que se tengan en el campo.

Parámetros de funcionamiento (altura manométrica total)

Para medir el funcionamiento o la operación de una bomba se consideran diferentes parámetros:

- Caudal: se refiere a la descarga de un volumen por unidad de tiempo y que logra la bomba, según su diseño de fábrica y las unidades utilizadas. Pueden ser litros por minuto (l/min), litros por segundo (l/s), metros cúbicos por hora (m³/h).
- Presión: es la energía mecánica transmitida al agua que es capaz de vencer los siguientes factores:
 - Altura estática (carga estática total): es la diferencia de altura entre el punto (cota) de toma de agua y el punto de entrega. Se divide en carga estática de aspiración (succión) y carga estática de elevación.
 - Pérdidas de carga en la tubería: se producen cuando el agua fluye a través de la tubería y experimenta resistencia por fricción con las paredes internas del tubo y/o cambios de dirección de flujo. Provoca pérdida parcial o gradual de la energía cinética.
 - Pérdidas singulares o de accesorios: provocadas por equipos o fittings del sistema de conducción (válvulas, codos, curvas, etc.).

La sumatoria de estas cargas se conoce como altura manométrica total y determina las características de la bomba que se debe implementar en el sistema de riego.

Los factores a considerar en la bomba son:

- Potencia. Es la energía que el motor entrega a la bomba para mover el agua, y dependiendo de la eficiencia del equipo, corresponde a lo que se necesita para elevar una determinada masa de agua por unidad de tiempo, es lo que comúnmente se conoce como los HP que tiene la bomba.

- NPSH. Es la altura neta de succión positiva, corresponde a la energía que necesita una bomba para no cavititar, fenómeno que ocurre cuando se producen burbujas de vapor que, al ingresar a zonas de mayor presión, colapsan y si esto ocurre con cierta frecuencia, se daña el equipo. Las fábricas realizan pruebas y determinan los valores de NPSH recomendados para evitar este problema.

Curvas características para diseño

Lo ideal sería contar con bombas diseñadas específicamente para cada situación, sin embargo, eso es muy difícil. Por lo tanto, se fabrican modelos estándar de bombas y que dependiendo del requerimiento para riego que se tenga, deben evaluarse las características según los parámetros anteriormente señalados.

Cada bomba posee su curva característica (Figura 4.3), que presenta los principales parámetros de selección de acuerdo a los requerimientos particulares de un sistema de riego.

Las curvas características de las bombas entregan información de la presión de operación, respecto del caudal, el valor de NPSH, el tipo de rodete y la eficiencia. Hay distintas formas de presentar esta curva característica, pero son fundamentales en todas ellas, la relación caudal, presión y eficiencia.

Energía

Los diferentes informes de organismos internacionales señalan un incremento en la demanda de energía a nivel mundial, para satisfacer las necesidades económicas y el crecimiento de la población.

Las Naciones Unidas manifiestan, en tanto, un aspecto muy relevante para el ámbito agrícola, donde el agua, la energía y la alimentación están estrechamente vinculadas. Esto implica que es necesario considerar todos los aspectos, ya que la intervención

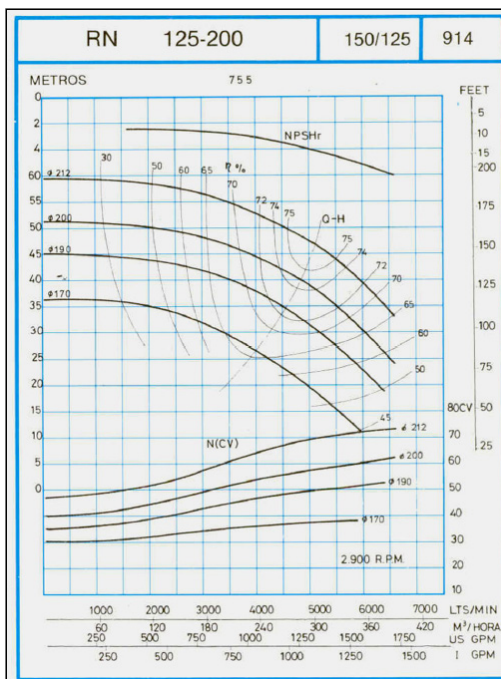


Figura 4.3. Curva característica de una bomba.

en alguno de ellos afecta al otro y, en este sentido, por ejemplo, el incremento de la superficie de riego permite mayor producción de alimentos, pero incrementa también la demanda de energía.

Aumentar la eficiencia del uso del agua y la energía es fundamental para mejorar los indicadores de un aprovechamiento más sostenible de nuestros recursos. Algunos antecedentes importantes a destacar en estrecho vínculo de agua y energía son:

- Los sistemas alimentarios actuales utilizan aproximadamente el 30 % de la energía disponible en el mundo.
- La producción de alimentos utiliza de manera importante aún energía proveniente de combustibles fósiles, es decir, se genera aquí un importante porcentaje de las emisiones de efecto invernadero.
- El 70 % de la energía consumida por los sistemas agroalimentarios ocurre posterior a que los productos dejan las áreas de cultivo o explotaciones agrícolas, es decir, en los procesos de transporte, empaçado, almacenamiento, comercialización, etc.
- Se estima que más del 30 % de los alimentos producidos se pierden o se desperdician y con esto, alrededor del 38 % de la energía consumida en los sistemas alimentarios.

Los sistemas de riego históricamente han utilizado sistemas impulsados por energía en base a combustibles fósiles, pero el avance tecnológico incorporó sistemas con abastecimiento eléctrico, tanto en los sistemas de impulsión como de distribución de agua de riego, y en las últimas décadas se han incorporado las denominadas energías renovables no convencionales, como los sistemas fotovoltaicos, aerogeneradores, microcentrales hidroeléctricas, etc.

También existen agricultores que poseen explotaciones agropecuarias que disponen de la topografía adecuada para implementar sistemas de riego impulsados por energía gravitacional. Es decir, la diferencia de altura o cota permite generar la energía requerida por los equipos de distribución de agua de riego.

Hay que diferenciar, en primer lugar, si la fuente de origen de la energía es interna o externa al predio. Por ejemplo, el abastecimiento de energía externa, es decir, a una red de distribución de una empresa eléctrica, puede tener diferentes fuentes energéticas incluidas todas las mencionadas anteriormente.

En general, no se realizan muchas auditorías energéticas a los sistemas de riego, las cuales serían fundamentales para determinar los puntos críticos donde intervenir para reducir costos. Por ejemplo, para definir si la energía utilizada en el sistema de impulsión es la más adecuada.

En términos de evaluación económica del riego, lo recomendable sería obtener un costo por metro cúbico ($\$/m^3$) de agua utilizado en el riego y en el análisis del detalle de costos, obtener también un costo energético por m^3 de agua utilizado.

El uso de fuentes energéticas en el riego está vinculado a los costos involucrados y la disponibilidad de esa energía a nivel predial. La autonomía y oportunidad energética para los sistemas de riego, es también un factor muy importante, principalmente en territorios donde el riego es un complemento para las producciones en épocas más secas. Estos riegos son específicos en ciertos momentos y se requiere que el agua y la energía estén disponibles.

Una de las fuentes de energía más utilizada aún para abastecer a los sistemas de riego, son los combustibles fósiles (Figura 4.4), ya sea mediante generadores eléctricos que operan con diésel o tractores que transforman el combustible en fuerza motriz para hacer funcionar los equipos, generalmente utilizados en zonas más aisladas o que están fuera de los abastecimientos de las redes de distribución eléctrica. Este tipo de equipos permite otorgarle autonomía al agricultor, ya que, por ejemplo,



Figura 4.4. Bomba para riego impulsada por combustible fósil.

en cortes de suministro eléctrico en redes convencionales, puede seguir operando sin problemas. Entre sus desventajas, los equipos que tienen como fuente energética los combustibles fósiles son menos eficientes que un equipo eléctrico, al considerar la energía que ingresa versus la energía mecánica que produce. Más aún, el uso de combustibles fósiles hoy en día está cuestionado por sus implicancias en el impacto del medio ambiente, por la producción de gases de efecto invernadero y por los residuos en su manejo (almacenamiento y distribución).

Otra fuente de energía para los sistemas de riego es la electricidad convencional, que distribuyen las empresas eléctricas y a la cual se conectan los equipos de riego. Permiten operar diversos tipos de equipos e integrarlos en una red que podría eventualmente automatizar todo el sistema de riego. Son más eficientes que sistemas que utilizan combustibles fósiles, pero dependen de la continuidad de abastecimiento de la red y sus costos varían de acuerdo a las potencias requeridas, las zonas del país donde se está trabajando, el tipo de distribuidor, etc.

Una buena auditoría y control (Figura 4.5) de un sistema de alimentación eléctrica, monitoreando la eficiencia de suministro energético y la eficiencia energética de los bombes, puede permitir reducir los costos de operación o determinar la inversión en equipos complementarios o la modificación de los sistemas.

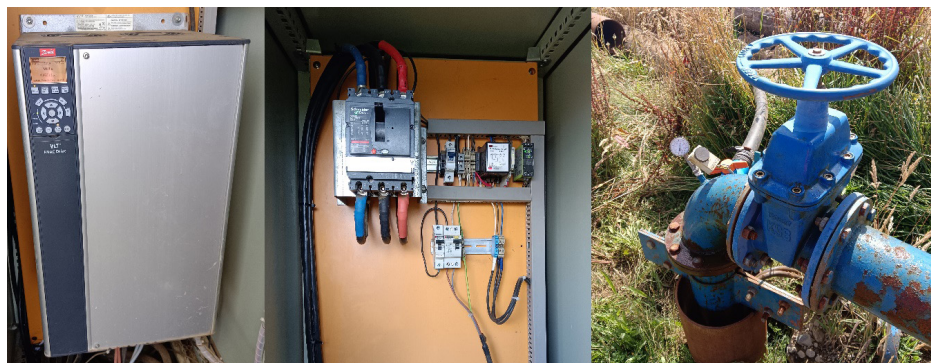


Figura 4.5. Panel de control sistema eléctrico convencional para impulsión desde pozo profundo.

En la última década, hay un mayor uso de energías renovables no convencionales en los sistemas de riego, especialmente la incorporación de sistemas fotovoltaicos (Figura 4.6). La energía solar transformada en energía eléctrica mediante paneles solares, tiene diferentes opciones de uso en riego, ya sea en sistemas independientes denominados *off-grid* o sistemas conectados a la red eléctrica convencional denominados *on-grid*.

Lo anterior se rige en Chile por el marco legal y técnico establecido en la Ley Net Billing N°20.571 del año 2014 y la Ley N°21.118 del año 2018. Las inversiones de estos sistemas pueden ser de costos más elevados que la de otros sistemas energéticos, sin embargo, los costos de operación son menores y hoy día están siendo incentivados, producto de los menores impactos, por ejemplo, en la producción de gases efecto invernadero. Por lo tanto, hay más avances tecnológicos que están reduciendo sus costos. Por ejemplo, el desarrollo de tipos de celdas fotovoltaicas más eficientes, más flexibles a los diferentes tipos de infraestructura, mayor disponibilidad, mayor recurso humano especializado, amplitud de áreas de servicio, etc.

El uso de esta energía en sistemas de riego, en sus inicios estaba más focalizada en pequeños proyectos, sin embargo, hoy cubre diversos tipos de proyectos con diferentes requerimientos energéticos, asociado al avance tecnológico y la disponibilidad de equipos y materiales en todo el país.

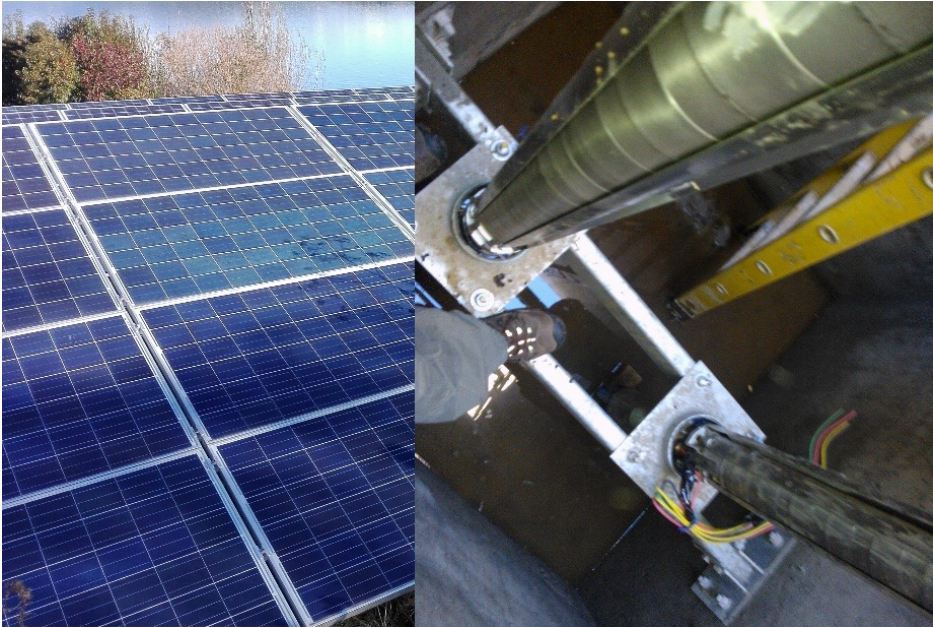


Figura 4.6. Sistema fotovoltaico para impulsión de agua de riego con bombas sumergibles.

Entre las energías renovables no convencionales, también existe experiencia en la instalación y operación de minicentrales hidroeléctricas, que abastecen de energía a sistemas de impulsión para el riego de diferentes cultivos, frutales y praderas. La posibilidad de aprovechar quebradas, esteros o ríos que disponen de caudales y altura adecuados, permite la instalación de microcentrales (Figura 4.7), cuyas turbinas entregan la energía necesaria para que operen los motores eléctricos de las bombas de riego.

Por lo tanto, en aquellas zonas de topografía y disponibilidad de caudales de agua se puede explorar también esta alternativa, evaluando las necesidades de riego y energía versus las opciones de generación más apropiadas para cada realidad predial y las estrategias propias de cada agricultor.



Figura 4.7. Microcentral hidroeléctrica de 164 Kw para uso en sistemas de riego.

Una condición ideal para abastecer de energía a los sistemas de riego, es contar con una topografía y una fuente de agua en cotas útiles para el riego gravitacional. Es decir que, por ejemplo, se disponga de una fuente de agua a una altura y distancia adecuadas para generar la energía que necesita el equipo de riego en la parte baja donde están los cultivos o la pradera. Con ello, los equipos de aspersión podrían operar sólo con la energía que otorga esta característica de relieve predial, que en territorios como la Región de Aysén pueden estar presentes y favorecer el riego de importantes superficies de praderas.

Equipos de riego por aspersión

Existen diferentes tipos o sistemas de aspersión, dependiendo de su desplazamiento. A continuación se describen los principales sistemas de riego utilizados en la Región de Aysén para praderas.

Carrete de riego

El carrete de riego consiste en un sistema de desplazamiento continuo, es decir, se aplica agua en movimiento. También se denominan enrolladores o cañones viajeros, ya que una manguera lleva en su extremo un patín con el aspersor de gran tamaño, que también se conoce como cañón de riego (Figura 4.8). La manguera se enrolla automáticamente en un tambor accionado por un flujo de agua que genera una turbina o fuelle hidráulico, y la presión necesaria la genera una bomba centrífuga, la cual puede ser accionada por un motor eléctrico o a combustión (por ejemplo, un tractor).



Figura 4.8. Carrete de riego operando en una pradera.

El riego se realiza por paños o bandas de un ancho que es función del radio de mojamamiento del aspersor (60-120 m) y se mueve a distintas velocidades dependiendo de la lámina de riego que se planifique aplicar. Habitualmente, desde la fuente de agua se instala una red de tuberías que se conecta al tambor del carrete, luego, mediante un tractor se mueve el patín o carro que lleva el aspersor hacia el final de la banda, desde allí el aspersor comienza a regar y avanza de regreso hacia el tambor del carrete.

Los carretes disponen de una cartilla de pluviometría (Figura 4.9), que permite establecer la boquilla y velocidad que se utilizará para aplicar la lámina de riego programada, según los parámetros oferta y demanda de agua.

DIAMETRO ESTERNO TUBO PE OUTSIDE DIAMETER PE-HOSE = 125 mm				LARGHEZZA FASCIA IRRIGATA IRRIGATED WIDTH = 81,6+129,2 m				SUPERFICIE IRRIGATA MAX. IRRIGATED AREA = 3,53+5,82 ha													
LUNGHEZZA TUBO PE PE - HOSE LENGHT = 400 m				LUNGHEZZA FASCIA IRRIGATA IRRIGATED LENGHT = 448+476 m																	
DIAMETRO BOCCALINO DIAMETER NOZZLE	PRESSIONE IRRIGATORE PRESSURE SPRINKLER	SPIN RANGE	LARGHEZZA FASCIA IRRIGATED WIDTH	SUPERFICIE IRRIGATA IRRIGATED SURFACE	PORTATA - FLOW	PLUVIOMETRIA - PRECIPITATION RATE (mm)															
						V: VELOCITÀ RACCOLTA - RETRACTION SPEED								P: PRESSIONE ALLA MACCHINA - PRESSURE AT MACHINE							
						8	10	15	20	25	30	40	50	V	P	V	P	V	P	V	P
mm	atm	m	m ²	ha	m ³ /h	m/h	atm	m/h	atm	m/h	atm	m/h	atm	m/h	atm	m/h	atm	m/h	atm	m/h	atm
30	3	48	81,6	3,53	58,4					44,1	4,9	33,1	4,9	26,5	5,0	22,1	5,0				
	4	52	88,4	3,84	67,6					46,9	5,4	35,2	5,4	28,2	5,5	23,5	6,5				
	5	56	95,2	4,16	75,6					48,5	5,9	36,3	5,9	29,1	6,0	24,2	8,0				
	6	60	102,0	4,49	82,8					49,2	6,3	36,9	6,3	29,5	6,4	24,6	9,4				
32*	4	54	91,8	4,00	76,9	96,1	6,9	76,9	6,9	51,3	6,9	38,5	6,9	30,8	7,0	25,6	7,0	19,2	7,1	15,4	7,1
	5	58	98,6	4,33	85,9	99,2	8,5	79,4	8,5	52,9	8,5	39,7	8,5	31,7	8,6	26,5	8,6	19,8	8,7	15,9	8,7
	6	62	105,4	4,65	94,2	101,3	10,1	81,0	10,1	54,0	10,1	40,5	10,1	32,4	10,2	27,0	10,2	20,3	10,3	16,2	10,3
	7	66	112,2	4,98	101,6	102,0	11,7	81,6	11,7	54,4	11,7	40,8	11,7	32,6	11,8	27,2	11,8	20,4	11,9	16,3	11,9
34*	5	59	100,3	4,41	97,1	110,1	9,3	88,1	9,3	58,7	9,3	44,0	9,3	35,2	9,4	29,4	9,4	22,0	9,5	17,6	9,5
	6	64	108,8	4,82	106,4	110,4	11,0	88,3	11,0	58,9	11,0	44,1	11,0	35,3	11,1	29,4	11,1	22,1	11,2	17,7	11,2
	7	68	115,6	5,15	114,8	111,5	12,6	89,2	12,6	59,4	12,6	44,6	12,6	35,7	12,9	29,7	12,9	22,3	13,0	17,8	13,0
	8	72	122,4	5,48	122,8	112,0	14,5	89,6	14,5	59,8	14,5	44,8	14,5	35,9	14,6	29,9	14,6	22,4	14,7	17,9	14,7
36*	5	61	103,7	4,57	108,8	119,0	10,2	96,2	10,2	63,5	10,2	47,6	10,2	38,1	10,3	31,7	10,3	23,8	10,4	19,0	10,4
	6	66	112,2	4,98	119,3	119,8	12,2	96,8	12,2	63,9	12,2	47,9	12,2	38,3	12,3	31,9	12,3	24,0	12,4	19,2	12,4
	7	70	119,0	5,32	128,6	120,9	14,0	96,7	14,0	64,5	14,0	48,3	14,0	38,7	14,1	32,2	14,1	24,2	14,2	19,3	14,2
	8	74	125,8	5,65	137,7	121,9	15,9	97,5	15,9	65,0	15,9	48,7	15,9	39,0	16,0	32,5	16,0	24,4	16,1	19,5	16,1
40	5	63	107,1	4,73	121,3					68,4	11,3	51,3	11,3	41,0	11,4	34,2	11,4	25,6	11,5	20,5	11,5
	6	68	115,6	5,15	132,9					68,8	13,5	51,6	13,5	41,3	13,6	34,4	13,6	25,8	13,7	20,6	13,7
	7	72	122,4	5,48	143,4					69,8	15,5	52,3	15,5	41,9	15,6	34,9	15,6	26,2	15,7	20,9	15,7
	8	76	129,2	5,82	153,5					70,3	17,7	52,7	17,7	42,2	17,8	35,2	17,8	26,4	17,9	21,1	17,9

(* BOCCAGLI CONSIGLIATI - SUGGESTED NOZZLE) (** 85% DEL DIAMETRO DI IRRIGAZIONE - 85% OF IRRIGATED CIRCLE DIAMETER)
 DATI TECNICI FORNITI A TITOLO INFORMATIVO E NON IMPEGNATIVO PER LA DITTA COSTRUTTRICE - ALL TECHNICAL DETAILS ARE SUPPLIED FOR INFORMATION AND NOT BINDING FOR THE MANUFACTURER COMPANY

IDROFOGLIA s.r.l. - Uff. Tecnico - Maggio 199

Figura 4.9. Cartilla de pluviometría de un modelo de carrete de riego.

Estos equipos son recomendados para riegos suplementarios (o estratégicos - ocasionales), es decir en climas húmedos o semihúmedos, ya que presentan elevados consumos de energía para riegos continuos, elevando los costos operacionales.

El carrete posee ventajas y desventajas:

Ventajas:

- Permite regar una gran variedad de cultivos.
- Son de diseño simple, permitiendo una buena uniformidad si su manejo es el adecuado.
- La gran movilidad del sistema es beneficioso para predios con potreros pequeños, formas irregulares y dispersas.
- Requieren poca mano de obra.

Desventajas o limitaciones de los carretes de riego:

- Requerimientos elevados de presión de trabajo, entre 4 a 12 bares.
- El tamaño de la gota es muy grande y puede erosionar el suelo, incluso producir impacto en la hoja de la planta.
- La altura de la trayectoria del flujo de agua que sale del aspersor, provoca alta dispersión por el viento.
- La tasa o lámina de riego aplicada por estos equipos es relativamente alta, por lo tanto, se debe considerar que los suelos que la reciben presenten una

buena velocidad de infiltración.

- Es compleja la incorporación de automatización en estos sistemas.

Pivote central

Este equipo consiste esencialmente en una tubería lateral con aspersores, que se mueve en círculo alrededor de un punto fijo que lo abastece de agua. También existen otras variaciones de pivote, sin embargo, en este capítulo se trata el más frecuente, que es el tipo de pivote central (4.10).

La tubería del lateral es soportada por torres metálicas, movidas por ruedas autopropulsadas mediante un motor eléctrico o hidráulico. Cada torre se separa de la otra por una distancia que varía entre 30 a 60 m, lo que se denomina tramo. Desde la tubería que constituye el lateral se despliegan mangueras que en su extremo poseen aspersores y que varían de acuerdo al tramo en que se ubican. El largo total que suman todos los tramos depende de la pendiente y topografía del terreno (Figura 4.11). Al final del lateral va el "voladizo", que es una tubería de menor diámetro a la que se le agrega un aspersor tipo cañón, lo que permite aumentar el área regada.



Figura 4.10. Pivote central en la Región de Aysén regando praderas.

Como se mencionó anteriormente, este tipo de pivotes riegan en círculo, lo cual implica que las torres externas deben realizar un mayor recorrido que las torres internas. Por ello, no todas las torres avanzan con la misma velocidad, y como consecuencia cerca

del 75 % del área regada se encuentra en la mitad externa del radio del pivote. Por lo tanto, la operación del sistema se concentra en las torres externas.

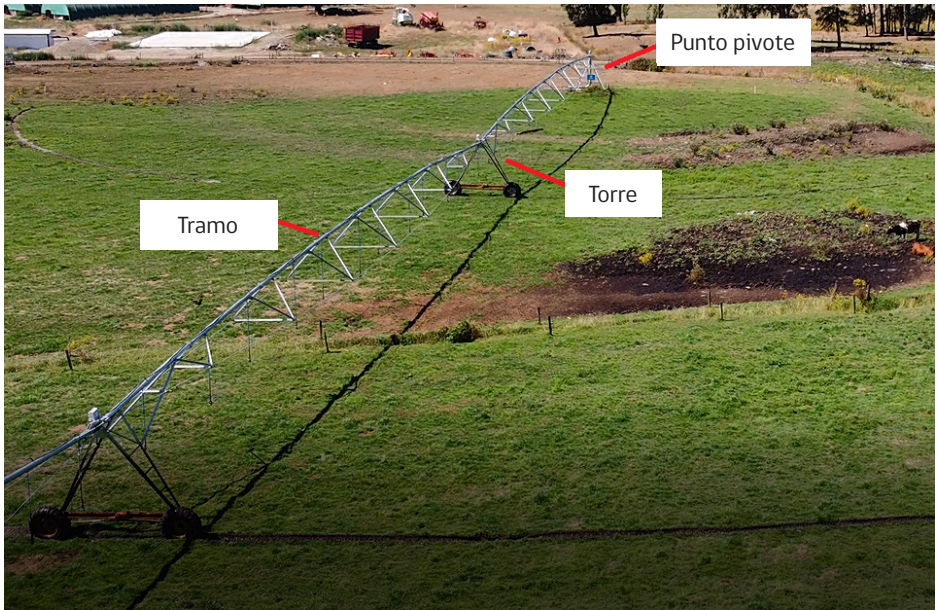


Figura 4.11. Principales partes de un Pivote Central.

Un panel de control regula la velocidad media de la torre más alejada, que sirve de guía para el sistema completo, esta torre se hace funcionar un porcentaje de tiempo, el 100 % determina que la máquina avance a máxima velocidad, en tanto, al 50 % de avance la última torre se mueve a la mitad de su velocidad. La velocidad de rotación determina la lámina de riego que se aplicará, cuánto mayor es la velocidad, menor es la tasa de aplicación.

Para mantener una lámina de riego pareja a lo largo del lateral, los aspersores deben ir aumentando su caudal a medida que se alejan del punto pivote, por ello los aspersores son diferentes a lo largo del lateral. Los tipos de emisores utilizados en los pivotes son variados y las fábricas trabajan en sus diseños para lograr la mejor eficiencia (Figura 4.12).



Figura 4.12. Tipos de emisores utilizados en Pivote Central.

Los sistemas de riego con Pivote Central han crecido en importancia en el riego de praderas, principalmente, por algunas de sus ventajas, aunque también presentan desventajas.

Ventajas:

- La posibilidad de una aplicación de alta frecuencia, es decir, riegos de baja lámina pero diarios, logrando mayor eficiencia.
- Su posibilidad de automatización completa y control a través de plataformas, que pueden ser gestionadas desde cualquier lugar mediante un computador o el teléfono, por ejemplo.
- La posibilidad de aplicar fertilizantes a través del agua de riego o fertirrigación, para poner a disposición oportunamente los nutrientes que requieren las plantas, en diferentes estados de desarrollo.

Entre sus desventajas o limitaciones, requiere que no exista infraestructura o árboles que impidan el paso del lateral, en su recorrido que realiza para el correspondiente riego.

Tazas

Este sistema de riego fue especialmente diseñado para el riego de praderas de pastoreo y se conoce más por el nombre de la marca que lo creó: "K-line". Es bastante simple y consiste en una tubería que cada cierto tramo tiene instalado un aspersor

que está protegido con una taza o tazón de polietileno. Esta protección permite el riego, mientras el ganado está pastoreando, y permite que el aspersor siga operando normalmente (Figura 4.13). Para operarlo (movilizarlo) se utiliza normalmente una cuádrimoto, la que toma un extremo de la tubería y la desplaza hacia el siguiente paño o franja que se regará. Esta es una manera práctica y rápida de mover cada línea de riego y, además, se requiere muy poca mano de obra (Figura 4.14). También es posible relocalizar la línea de riego mediante tracción animal o, incluso, un vehículo 4x4.



Figura 4.13. Componentes de una taza de riego. Aspersor (1) y collarín (2) de acople a la tubería.

Los riegos por aspersión requieren que se logre un traslape entre aspersor y aspersor, por ello, en el caso de las franjas o paños de riego, para alcanzar este objetivo, se dejan marcas en el borde o cerco, donde se ubican los hidrantes, de manera que el operario que realiza los cambios de posición de las líneas de riego, posea una guía para ubicar adecuadamente la línea.

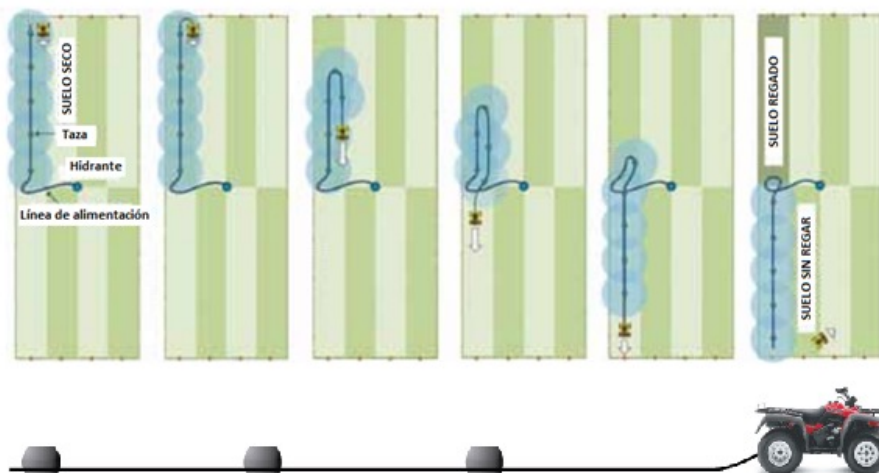


Figura 4.14. Esquema del movimiento de la línea de riego con tazas (Fuente: modificado de Catálogo ©K-Line Irrigation North América).

El sistema de tazas de riego es una alternativa muy interesante por sus ventajas:

- Su implementación en el predio es simple.
- Es un sistema de bajo costo en comparación con el resto de los sistemas revisados anteriormente.
- El movimiento de las líneas en los potreros es de fácil operación.
- Se requiere muy baja mano de obra.
- Se adapta a predios con diferentes topografías.
- Se puede ampliar la superficie de riego fácilmente si se cuenta con suficiente agua.
- La precipitación de los aspersores es baja, por lo tanto, no existen problemas con suelos de baja velocidad de infiltración.
- Tiene bajos requerimientos de presión (2,5 a 3,5 bares).

Conclusiones

Entre los sistemas de riego por aspersión, no existe un equipo mejor que otro, y la selección depende esencialmente de los requerimientos, estrategias y expectativas del agricultor. Cada sistema posee características que determinan su potencial uso en condiciones diversas que el agricultor debe evaluar adecuadamente.

Los costos son una variable importante en la decisión de qué equipo adquirir, pero también lo son aspectos de otro tipo, por ejemplo medioambientales, el grado de automatización, la posibilidad de incorporación de nutrientes a través del riego, la

disponibilidad de agua, tipo de energía disponible, entre otros.

La interpretación de catálogos y fichas técnicas de los equipos es un paso fundamental en el proceso de implementación de proyectos de riego, puesto que en ellos se indican los parámetros para el funcionamiento adecuado de cada elemento de riego. El uso de energía fotovoltaica hoy abarca un amplio espectro de prestaciones y se transforma en una muy buena opción para reducir costos operacionales.

En ganadería, la alternativa de contar con sectores que permitan riego gravitacional puede ser la alternativa más rentable.

Capítulo 5

Experiencias de riego de praderas en la Región de Aysén

Christian Hepp K., Pier Barattini P. y Camila Reyes S.

Introducción

En la Zona Intermedia de Aysén, el crecimiento de las praderas presenta una alta estacionalidad, concentrándose en los meses de noviembre y diciembre, donde puede llegar a acumularse sobre el 70 % del forraje de la temporada. Por otra parte, la depresión del crecimiento de verano, debido a la falta de humedad en el suelo, limita habitualmente la producción total de forraje de la temporada. Las sequías estivales se han hecho cada vez más frecuentes en esta zona patagónica, como una probable consecuencia del cambio climático. La disponibilidad de agua de riego durante ese período crítico aumenta la seguridad de disponibilidad forrajera en los sistemas ganaderos.

En este capítulo se muestran diferentes experiencias regionales como resultado de diferentes estudios y evaluaciones realizadas en diferentes condiciones. Esta información puede aportar en la evaluación técnico-económica para la implementación de proyectos de riego en sistemas ganaderos y generar herramientas de manejo del agua.

Resultados relevantes con el uso de riego en sistemas ganaderos de la Patagonia occidental

Efectos del riego por tazas en una pradera mixta de la Zona Intermedia de Aysén

En la Zona Intermedia de Aysén se estudió el efecto del riego estratégico sobre la producción de forraje de una pradera de *Lolium perenne x Trifolium repens* (ballica-trébol blanco). Para ello se consideró un sistema de riego con tazas, que se instaló en el sector Valle Simpson. El sistema contaba con cinco tazas plásticas, que permiten la movilidad del sistema, con sus aspersores, para cubrir una superficie aproximada de 1.000 m² por cada postura/evento de riego. El sistema permitía aplicar alrededor de 3,2 mm de agua por hora sobre la superficie señalada. Los riegos se programaron para

evitar un exceso de evaporación (intensificada por la ocurrencia de fuertes vientos). La duración aproximada de cada riego fue inicialmente de 8 horas, lo que permitía aplicar unos 26 mm de agua, para reponer aproximadamente el 50 % de humedad aprovechable en los primeros 30 cm de suelo.

Se monitoreó el estado hídrico del suelo con tensiómetros para definir la frecuencia de riego. El suelo era un Andisol (oxyaquic hapludand), de textura franco arenosa, profundo y de drenaje rápido. Sus características físicas se indican en el Cuadro 5.1.

Cuadro 5.1. Análisis físicos del suelo volcánico en la zona del experimento.

Profundidad cm	Arena %	Limo %	Arcilla %	Textura ¹ USDA	C.C. 1/3 atm %	P.M.P. 1/3 atm %	D. Apar. g cm ³	Agua Aprov. m ³ ha ⁻¹
0-10	58.5	35.5	6.0	Fa	45.9	23.9	0.71	156.1
11-29	58.1	36.0	5.9	Fa	40.1	20.9	0.75	260.6
29-59	58.0	36.2	5.8	Fa	35.0	18.2	0.71	358.1
59-72	56.4	37.9	5.7	Fa	33.2	17.2	0.72	148.7
72-89	46.4	48.1	5.5	Fa	30.2	15.7	0.74	180.9
89-97	63.6	31.1	5.3	Fa	24.7	12.8	0.74	69.7
97-125	64.3	30.1	5.6	Fa	48.6	25.3	0.82	534.1
125-157	72.6	21.3	6.1	Fa	38.4	20.0	0.96	563.5
157-178	73.7	20.5	5.8	Fa	40.6	21.1	1.13	463.5

Textura basada en los contenidos de arena, limo y arcilla medidos en el laboratorio.

En cuanto a fertilización, anualmente se aplicaba una dosis de mantención equivalente a N-P-S (50-40-20). El pH era de 6,3 y el contenido de materia orgánica de 13 %. Para efectos de este experimento, en la unidad se comparaba una franja bajo riego (FR) con otra que se mantenía en condiciones de secano (FS). Ambas franjas se encontraban adecuadamente separadas, para evitar deriva de agua hacia la zona de secano. La situación hídrica del suelo se monitoreaba periódicamente mediante tensiómetros y sensores instalados a diferentes profundidades (10 y 30 cm). Se instalaron tres jaulas de exclusión en cada tratamiento, las que se evaluaron en primavera (diciembre), verano (fines febrero) y otoño (mayo).

Riegos y respuesta productiva

El verano 2021-22 (diciembre a febrero) presentó precipitaciones totales de 107 mm. Si bien en un año promedio precipitan 158 mm en los meses de diciembre a febrero, las lluvias en el verano se concentraron en esta temporada en eventos puntuales, sobre todo en febrero. Considerando la evapotranspiración de referencia y la precipitación, se puede estimar que en un verano promedio, en esta zona se produce un déficit de alrededor de 139 mm, el que aumenta en años con veranos secos.

En la temporada 2022-23, las precipitaciones totales del verano (diciembre a febrero) fueron de 149 mm, más cercanas al valor normal. A diferencia de la temporada anterior, el mes de diciembre fue más lluvioso en esta oportunidad (87,3 vs 12,4 mm). Asimismo, las precipitaciones presentaron una mejor distribución durante la temporada 2022-23, comparada con la anterior.



Figura 5.1. Sistema de riego por tazas en una pradera de pastoreo.



Figura 5.2. Sistema de riego por tazas en una pradera de pastoreo. Detalle de taza de polietileno y aspersor en su interior.

En la segunda temporada (2022-23) se programaron riegos de 5 horas de duración cada vez, lo que permitía aplicar una lámina de alrededor de 16 mm por cada riego, procurando una frecuencia de riego mayor. La Figura 5.1 muestra la pradera durante un ciclo de riego, mediante el sistema de tazas. En la Figura 5.2 se aprecia un detalle de la taza, que aloja al aspersor encargado de la aspersión del agua. El sector bajo estudio estuvo con pastoreo con ovinos en forma periódica, cada vez que se acumulaba una cantidad de forraje adecuada (Figura 5.3).



Figura 5.3. Sistema de riego por tazas en una pradera de pastoreo con ovinos.

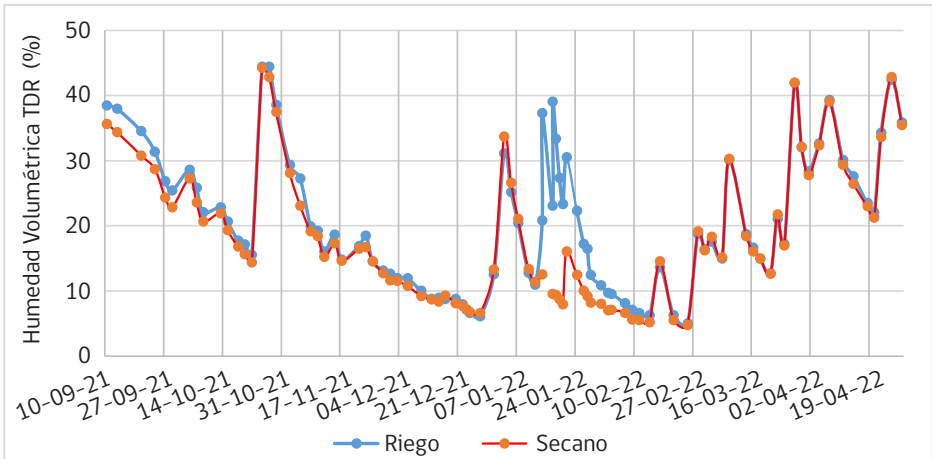


Figura 5.4. Variación de la humedad de suelo superficial (12 cm) medida con instrumento TDR durante la temporada 2021-2022, en una unidad regada durante el verano con sistema de tazas (K-Line).

Durante la temporada 2021-22 se incorporó el monitoreo de humedad del suelo mediante TDR (Time Domain Reflectometry), que permite medir directamente la humedad volumétrica del suelo, en este caso en los primeros 12 cm de profundidad. En la Figura 5.4 se muestra la variación de la humedad entre septiembre de 2021 y abril de 2022. Las lecturas indicarían que ya a mediados de noviembre sería necesario regar y no esperar hasta el mes de diciembre, ya que desde principios de diciembre se produce estrés hídrico en este caso. El tener 2-3 eventos de riego en esta época podría solucionar dicha situación. En enero y principios de febrero se observa que el riego logra mantener los niveles de humedad de suelo a niveles adecuados en la sección de riego, sin embargo, luego en febrero se produce una declinación, provocada por la falta de agua desde el colector en este sitio.

En la Figura 5.5 se muestra un ejemplo de seguimiento de la humedad volumétrica del suelo mediante TDR durante la temporada de crecimiento 2022-23. Se aprecia la diferencia de niveles de humedad de suelo entre la zona regada comparada con el secano. Los eventos de riego procuraban acercarse a valores de capacidad de campo en cada oportunidad.

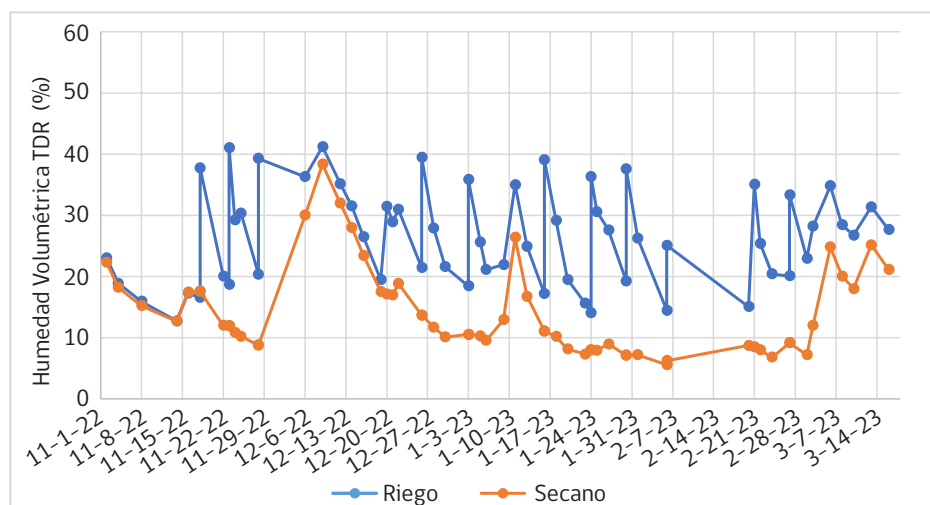


Figura 5.5. Variación de la humedad volumétrica del suelo (TDR-12 cm) durante la temporada de crecimiento 2022-23.

En la temporada 2021/22 se realizaron siete riegos durante el verano con una aplicación equivalente total de $1.814 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Hasta fines de la primavera la pradera sin riego tuvo producciones similares a aquella regada (alrededor de 2.500 kg ha^{-1} , en dos cortes). Las diferencias significativas ($p \leq 0,05$) ocurren posteriormente, en la producción estival (Figura 5.6), particularmente en la segunda mitad del verano,

donde el riego incrementó la producción de la pradera en 199 %, comparada con la pradera de secano. La producción para la temporada completa fue de 7.150 vs 9.640 kg MS ha⁻¹, para las praderas no regadas (secano) y regada, en las cinco evaluaciones, respectivamente, es decir un 35 % mayor ($p \leq 0,05$).

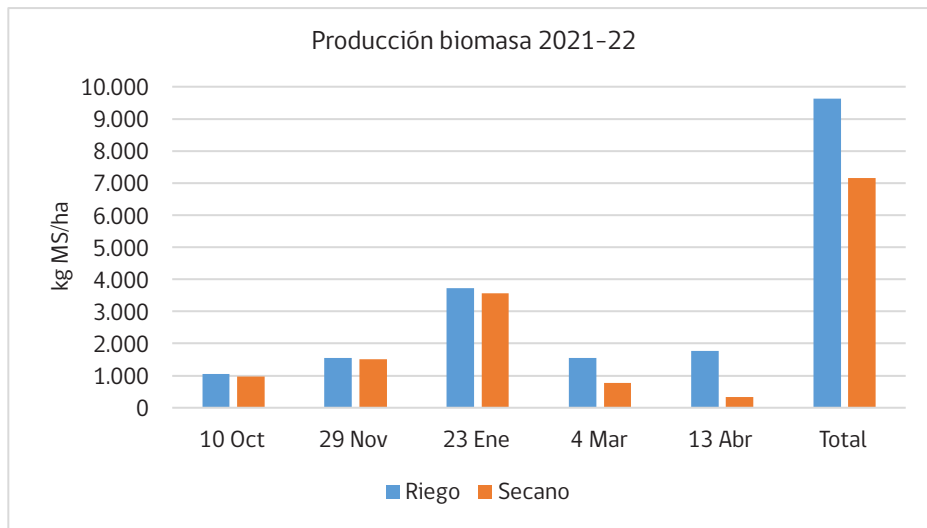


Figura 5.6. Producción de biomasa (kg MS/ha) en una pradera de secano vs riego en la Zona Intermedia de Aysén (2021-22).

En la segunda temporada (2022-23) se aumentó a 12 riegos, iniciando antes la temporada de riego (desde mediados de noviembre y hasta fines de febrero), lo que permitió manejar mejor el contenido de agua disponible en el suelo. Los riegos fueron más cortos, de 5 horas cada uno, aplicando del orden de 16 mm cada vez. En la temporada se regó un total aproximado de 192 mm, o sea, 1.920 m³/ha, algo superior a la temporada anterior, pero con una mejor distribución. En esta oportunidad, la pradera regada rindió 9.615 kg MS/ha, comparado con 6.493 kg MS/ha en la de secano. Ello significa una diferencia de 48 % en la producción total (Figura 5.7).

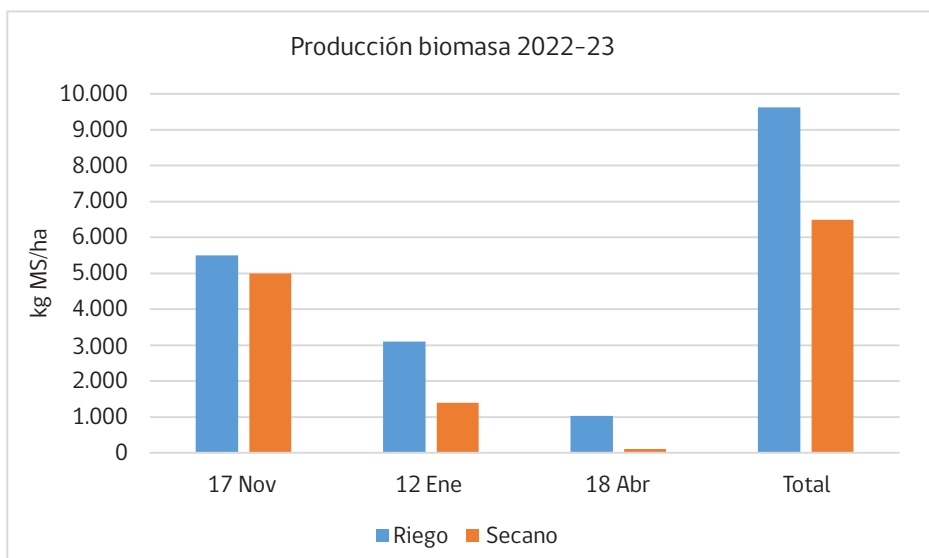


Figura 5.7. Producción de biomasa (kg MS/ha) en una pradera de secano vs riego en la Zona Intermedia de Aysén (2022-23).

Junto a las diferencias en producción de biomasa, la pradera regada presentó una densidad muy superior a la pradera de secano, lo que se evaluó a través de mediciones de poblaciones de macollos. En la zona regada se registraron 14.397 macollos/m², mientras que en la pradera de secano sólo se midieron 8.046 macollos/m².

Como las producciones iniciales en primavera tienden a ser similares entre riego y secano, en ambas temporadas las diferencias se producen en realidad en la producción de verano, por el déficit hídrico que ocurre en dicha época. En la temporada anterior, en el verano, las diferencias fueron de 3.309 vs 1.107 kg MS/ha y en la temporada 2022-23 de 4.118 vs 1.459 kg MS/ha. Ello significó que con riego se aumentó en cerca de tres veces la producción estival de la pradera, bajo estas condiciones.

Es necesario monitorear las variables meteorológicas de cada temporada desde la primavera, de modo de detectar deficiencias de humedad tempranamente para programar riegos estratégicos. El riego estratégico permite evitar la caída de rendimientos en períodos secos del verano y así dar más seguridad a los sistemas animales, asegurando una disponibilidad de forraje más estable en la temporada y disminuyendo la estacionalidad. Es necesario ajustar los riegos a los sensores instalados y proceder a la toma de decisiones en base a ellos.

Efecto de diferentes tasas de riego sobre una pradera mixta de la Zona Intermedia de Aysén

Aspectos generales

La zona Intermedia de Aysén está sufriendo en forma recurrente de déficit hídrico durante meses estivales. Lo anterior tiene efectos directos sobre el crecimiento de las praderas y sobre la capacidad del sistema para generar suficiente biomasa como para realizar conservación de forraje para el período crítico invernal, en el que las praderas ya no crecen.

La falta de humedad en verano tiene repercusiones graves sobre la continuidad y sustentabilidad del sistema productivo, obligando a modificar la carga animal, o bien, a adquirir recursos forrajeros externos para paliar la falta de alimentos. Todo ello tiene también consecuencias económicas y repercute sobre la rentabilidad del sistema. El presente trabajo pretende evaluar los efectos de diferentes láminas de agua de riego aplicadas sobre la pradera sobre la producción de forraje y su composición.

En una unidad experimental de la Zona Intermedia de Aysén se realizó un estudio para obtener información que permitiera calibrar mejor la aplicación de agua de riego en praderas de esa zona, mejorando la eficiencia de uso del recurso agua. Se pretendía estudiar la respuesta productiva de una pradera de ballica perenne x trébol blanco sometida a riegos con diferentes alturas de agua (láminas) durante el período estival, evaluando los cambios botánicos en la composición de la pradera, junto a un monitoreo de los cambios en la humedad del suelo durante el período experimental.

Se utilizó para ello una pradera mixta de dos años de edad y se dispusieron diferentes tratamientos:

- Sin riego (0) (R0)
- 25 % del riego (R25)
- 50 % del riego (R50)
- 75 % del riego (R75)
- 100 % del riego (R100)

Cada tratamiento estaba expresado en relación al tratamiento de 100 % (R100), donde se aplicó la mayor cantidad de agua y, a partir de ello, se definieron las cargas de agua aplicada en los demás tratamientos. En el tratamiento de R100 se procuraba aplicar una cantidad necesaria para superar la capacidad de campo en cada ocasión. La humedad del suelo se monitoreaba mediante un tensiómetro en el tratamiento R100, como también con mediciones periódicas de la humedad volumétrica del suelo mediante el uso de un equipo TDR (Time Domain Reflectometry). Asimismo, se instalaron sensores en los tratamientos 0-50-100, para monitorear la humedad a dos profundidades en forma permanente.

La Figura 5.8 muestra una vista del experimento, con las parcelas. Para distribuir el agua hacia los tratamientos, se instaló un sistema con líneas de riego independientes, cada una con un medidor de caudal, que permite determinar el volumen de agua entregado (litros aplicados en un determinado período de tiempo (Figura 5.9).



Figura 5.8. Vista general del experimento.



Figura 5.9. Sistema de control de caudales de riego.

En la Figura 5.10 se muestra cómo se distribuyó el agua a cada aspersor con líneas independientes, de modo de que se emita el caudal correspondiente al tratamiento. Allí, en cada caso, se aplica el agua mediante microaspersores (Figura 5.11), que tienen un diámetro de alcance aproximado de 2,8 m y cubren un área aproximada de 6 m² en cada tratamiento. En las Figuras 5.12 (sin riego; R0) y 5.13 (R75) se aprecia el efecto de la aplicación de agua durante el período estival, generándose una zona de mayor crecimiento, que es donde se realizan los diferentes muestreos.

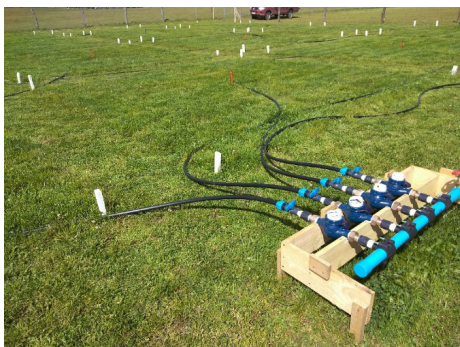


Figura 5.10. Distribución del agua de riego en parcelas.

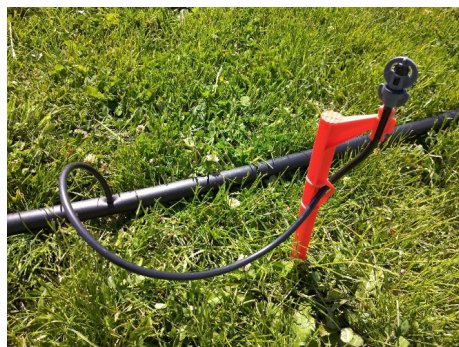


Figura 5.11. Microaspersor.



Figura 5.12. Parcela sin riego.



Figura 5.13. Parcela con riego.

La evaluación en las parcelas se realizó en cada oportunidad en la zona de influencia de cada microaspersor. En forma periódica se midió la humedad del suelo superficial con TDR (12 cm). Cuando se alcanzaba una acumulación de forraje suficiente (criterios de "pastoreo"), se procedía también a evaluar la producción de materia seca, mediante corte con marcos, a una altura aproximada de 5 cm del suelo, para no afectar el rebrote. Posteriormente se realizaban cortes de uniformización con máquina rotativa para preparar la unidad para el período de recuperación o rebrote.

Características del suelo

El Cuadro 5.2 muestra los niveles de fertilidad inicial del suelo en la unidad experimental, a diferentes profundidades de muestreo.

Cuadro 5.2. Niveles de fertilidad inicial (octubre 2021) en parcelas con tratamientos de riego. Fósforo Olsen, Potasio y azufre disponibles, valor pH y contenido de materia orgánica del suelo volcánico, Zona Intermedia, Región de Aysén.

Tratamiento	P	K	S	pH	%MO
R-0	18,6	206,1	6,74	6,31	13,9
R-25	19,9	209,3	6,55	6,32	14,9
R-50	12,7	142,7	5,89	6,25	13,2
R-75	16,9	187,7	6,83	6,24	14,3
R-100	18,5	222,3	6,46	6,26	14,1

En primavera, en todas las parcelas del experimento se aplicaron el equivalente a 60 unidades de nitrógeno, 100 unidades de fósforo, 50 unidades de potasio y 50 unidades de azufre, en la forma de urea granulada, superfosfato triple, muriato de potasio y azufre elemental. En la segunda temporada, se repitieron las mismas aplicaciones en el mes de octubre.

El Cuadro 5.3 muestra la textura del suelo a diferentes profundidades. Se trata de un suelo Andisol *hapludand* (originado de cenizas volcánicas), de clase textural franca en superficie y franco arenoso en profundidad, lo que le confiere una característica de rápida infiltración y capacidad de almacenamiento de agua más limitada. La textura franco arenosa es la más frecuente en la Zona Intermedia de Aysén.

Cuadro 5.3. Proporción de partículas de un suelo volcánico de la Zona Intermedia de Aysén y su clase textural.

Profundidad (cm)	Textura			Clase textural
	% Arcilla <0,002 mm	% Limo 0,002-0,05 mm	% Arena >0,05 mm	Franco
0-10	25,6	32,6	41,8	franco arenoso
10-20	9,5	30,4	60,1	franco arenoso
20-30	3,6	28,2	68,3	franco arenoso
30-50	3,5	33,3	63,2	franco arenoso

Humedad del suelo

En el sitio experimental, adyacente a las parcelas, se realizó una prueba de saturación, para lo cual se hizo un pretil para rodear una superficie aproximada de 1 m², el que se saturó con agua y se cubrió con un plástico, para evitar la evaporación y privilegiar la infiltración. Se determinó la humedad del suelo en forma gravimétrica y la densidad aparente a las 24 y 48 h. El Cuadro 5.4 muestra los resultados a diferentes profundidades.

La humedad gravimétrica a las 24 h fue de 34,5 % y de 35 % a las 48 horas en los primeros 20 cm del suelo, lo que correspondería a la capacidad de campo para este suelo. La densidad aparente en ese rango de profundidad fue en promedio de 0,74. Por ello, la humedad volumétrica a capacidad de campo correspondería aproximadamente a 26 % en términos volumétricos.

Cuadro 5.4. Humedad gravimétrica y humedad volumétrica luego de 24 horas y 48 horas post-saturación del suelo.

Tratamiento	Humedad gravimétrica		Da	Humedad volumétrica	
	24 h	48 h		pH 24 h	48 h
0-10	36,8	35,7	0,73	26,7	25,9
10-20	32,2	34,3	0,75	24,2	25,8
20-30	27,5	30,0	0,82	22,6	24,6
30-45	30,5	25,0	0,77	23,4	19,2

También se realizaron análisis físicos de suelo en laboratorio, determinándose variables como densidad aparente, densidad real, capacidad de campo (CC), porcentaje de marchitez permanente (PMP), retención de humedad y porosidad (Cuadro 5.5). De acuerdo a estos datos, la CC promedio de los primeros 20 cm sería de 41,3 % en términos gravimétricos y de 30,2 % como humedad volumétrica, algo superior a lo determinado con el otro método. La PMP, por su parte, en términos volumétricos sería de 23,8 %.

Cuadro 5.5. Densidad aparente y real, constantes hídricas, retención de humedad y porosidad del suelo volcánico donde se ubicó el experimento, a diferentes profundidades.

Profundidad cm	Densidad aparente (g/cm ³)	Densidad real (g/cm ³)	%CC (bss)	%PMP (bss)	Retención de humedad (%)	Porosidad total (%)	Número poroso (e)
0-10	0,72	1,51	44,6	37,9	6,7	52,0	1,08
10-20	0,74	2,30	38,1	27,2	10,9	68,1	2,13
20-30	0,77	2,36	34,9	19,8	15,1	67,4	2,07
30-50	0,77	2,33	35,1	17,0	18,1	67,1	2,04

bss=base suelo seco

En cuanto al número poroso, que también se indica en el Cuadro 5.5, la clásica porosidad ($1 - D_a/D_r$) tiene el problema que al dejar expresado el volumen de poros respecto al volumen total del suelo, tiene un denominador no común cuando se quieren comparar porosidades. Básicamente, un suelo con 55 % de poros no tiene 5 % más de poros que uno de 50 % de poros, ya que la base de comparación - el denominador - no es común, ya que parte del volumen total es poro, el cual cambió).

Como alternativa, el número poroso $e = D_r/D_a - 1$ permite expresar el volumen de poros en relación al volumen de sólidos, los que no varían al cambiar el manejo, por lo que se pueden comparar magnitudes directamente. No se expresa en porcentaje, sólo se deja en términos relativos. Por ejemplo, para un suelo con $D_r=2,6 \text{ g/cm}^3$ y $D_a=1,3 \text{ g/cm}^3$ (porosidad total de 50 %), el número poroso es 1, por lo que puede tomar valores menores a 1 y mayores a 1 (sobre todo en suelos Andisols y orgánicos). Así, un suelo con $e=0,9$ tiene $0,2 \text{ cm}^3$ de poros/ cm^3 de sólidos menos que un suelo con $e=1,1$.

Riegos

Durante el desarrollo del experimento, en la temporada 2021-22 se realizaron 11 riegos. En el tratamiento R100 se aplicaron riegos del orden de 27 mm, salvo el primero que fue de 40 mm. Los demás tratamientos tuvieron, por lo tanto, una aplicación de 7, 13 y 20 mm, aproximadamente por riego, en los tratamientos 25, 50 y 75. En total, en los 11 riegos de la temporada se aplicaron 78, 157, 235 y 313 mm en los tratamientos R25, R50, R75 y R100, respectivamente. Ello equivale a un total de $3.133 \text{ m}^3/\text{ha}$ en el tratamiento R100.

En la temporada 2022-23 se realizaron 13 eventos de riego, con aplicación de menores volúmenes de agua en cada uno (20 mm por riego), o sea un total aproximado de 286 mm en la temporada en R100, y 72, 143, 215 mm en R25, R50 y R75, respectivamente. Ello equivale a un total de 2.860 m³/ha en el tratamiento R100.

Las Figuras 5.14 y 5.15 muestran la variación de los contenidos de humedad volumétrica del suelo, medida con TDR en los primeros 12 cm de profundidad, para los diferentes tratamientos o alturas de agua. Se aprecian con claridad las diferencias entre los tratamientos de riego, como también las aplicaciones diferenciadas de agua entre tratamientos.

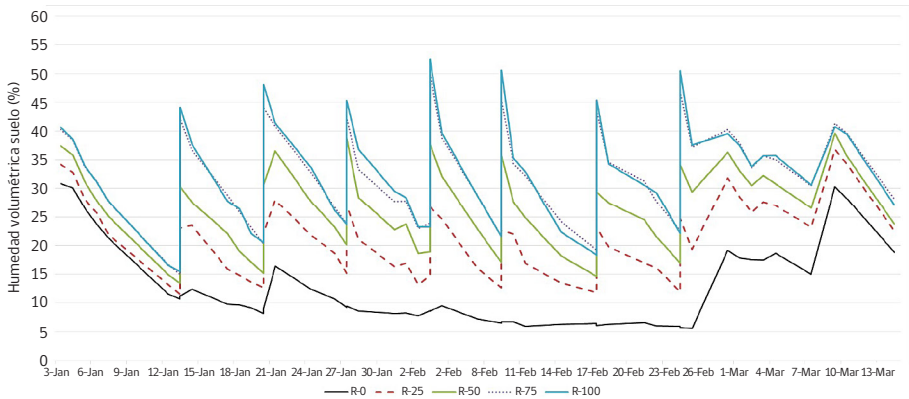


Figura 5.14. Variación de la humedad volumétrica del suelo (TDR) con diferentes cargas de agua de riego en un suelo volcánico de la Zona Intermedia de Aysén (Temporada 2021-22).

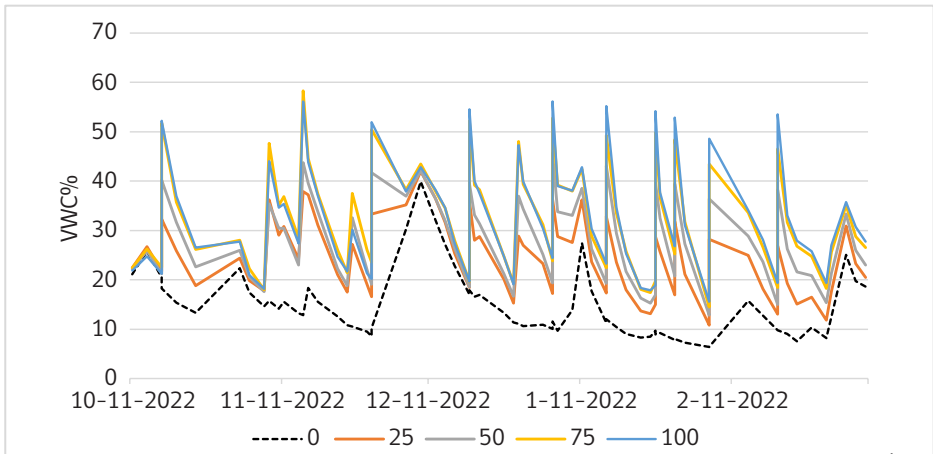


Figura 5.15. Variación de la humedad volumétrica del suelo (TDR) con diferentes cargas de agua de riego en un suelo volcánico de la Zona Intermedia de Aysén (Temporada 2022-23).

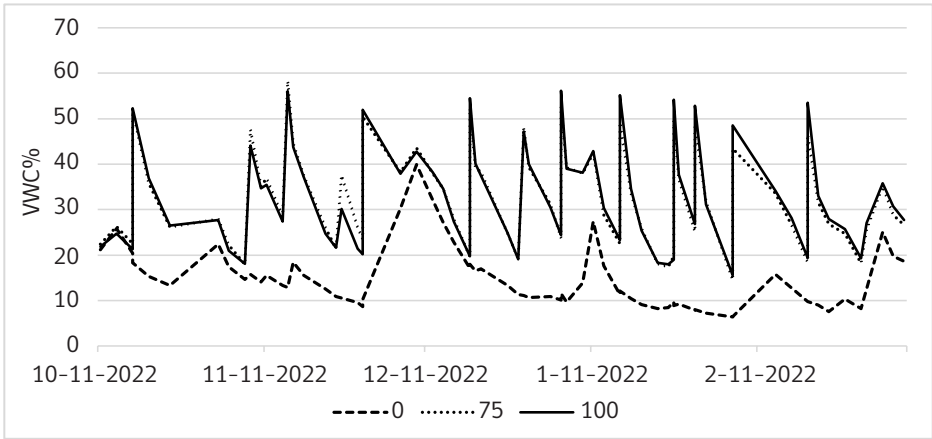


Figura 5.16. Variación de la humedad volumétrica del suelo (TDR) con diferentes cargas de agua de riego en un suelo volcánico de la Zona Intermedia de Aysén. Comparación de R-0, R75 y R100 (temporada 2022-23).

La Figura 5.16 muestra la variación de la humedad volumétrica del suelo entre el tratamiento de secano (R0) y los tratamientos con mayor volumen de riego, apreciándose que R75 y R100 prácticamente logran similares niveles de mojado del perfil en los primeros 12 cm de profundidad. En la Figura 5.17 se contrastan R0, R50 y R100, donde ya se observan diferencias de humedad a través de los diferentes riegos realizados en la temporada, lo que también se traduce en la respuesta de crecimiento de la pradera en el verano.

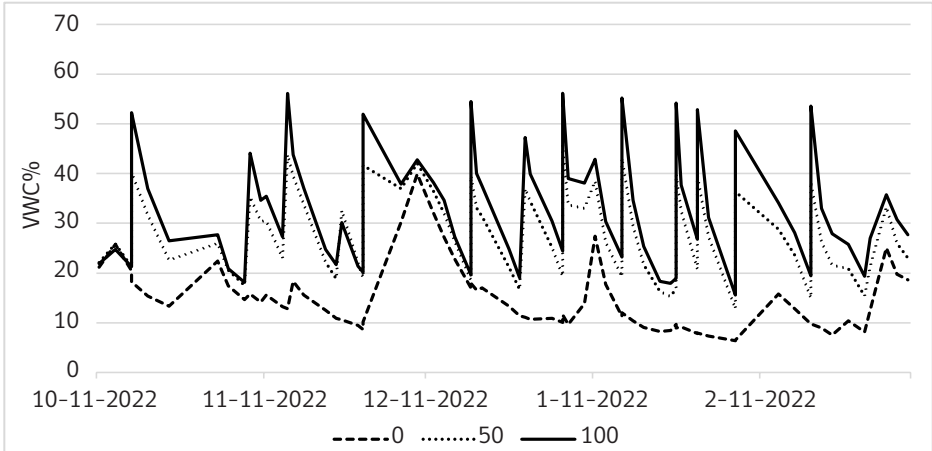


Figura 5.17. Variación de la humedad volumétrica del suelo (TDR) con diferentes cargas de agua de riego en un suelo volcánico de la Zona Intermedia de Aysén. Comparación de R-0, R50 y R100 (temporada 2022-23).

La Figura 5.18 muestra las lecturas de tensiómetro ubicado en el tratamiento R100, durante la temporada 2021–22. Las flechas indican los diferentes eventos de riego. De acuerdo a las lecturas del tensiómetro, en algunos casos debiera haberse regado antes, ya que se llevó a tensiones algo elevadas.

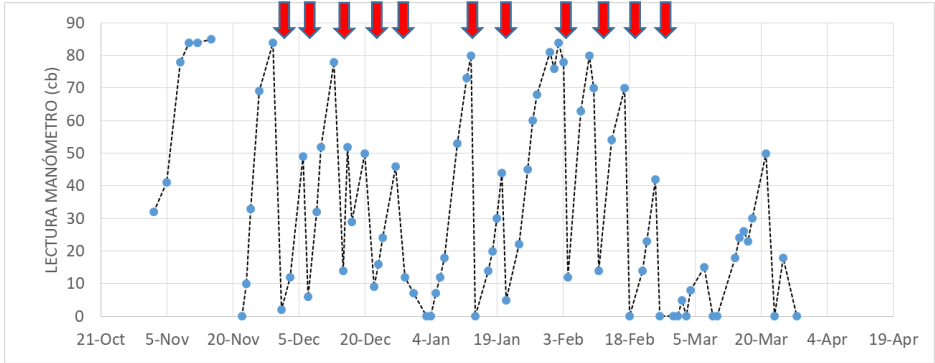


Figura 5.19. Lecturas de un tensiómetro (10 cm) en un suelo sometido a riego.

Los sensores que se instalaron en los tratamientos R0 – R50 – R100, a 10 y 30 cm de profundidad, muestran que en el tratamiento R100 se mantuvieron niveles de humedad adecuados, en general sobre 30 % de humedad volumétrica: también se observan los eventos de riego y que, en general, la humedad a nivel de 10 cm supera a la de 30 cm. Ello indicaría que no hay pérdida significativa de agua por percolación profunda (Figura 5.19).

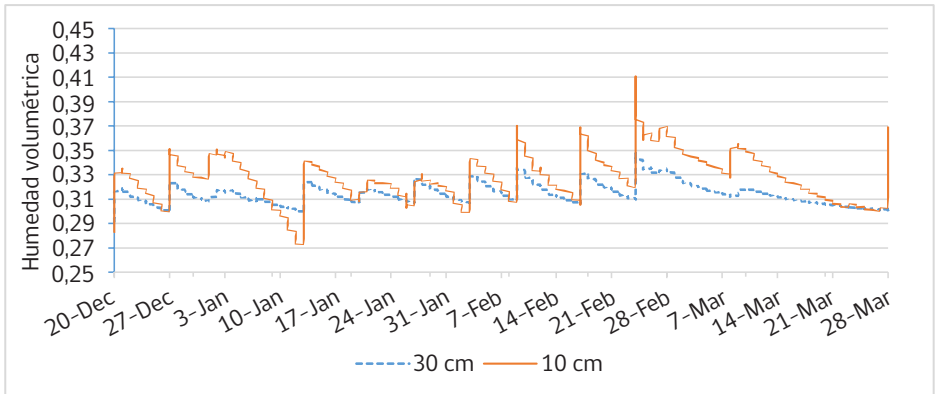


Figura 5.19. Humedad volumétrica a dos profundidades en un suelo volcánico sometido a riego (R100) medido con sensores Teros 10 (Zona Intermedia de Aysén).

En el nivel 0 (Figura 5.20) se aprecia que, en parte del mes de enero y gran parte de febrero, los niveles de humedad son extremadamente bajos. Las alzas de humedad que detectan los sensores corresponden a las precipitaciones de principios de enero y luego en marzo, donde la recuperación de humedad en el nivel 30 cm es aún muy bajo.

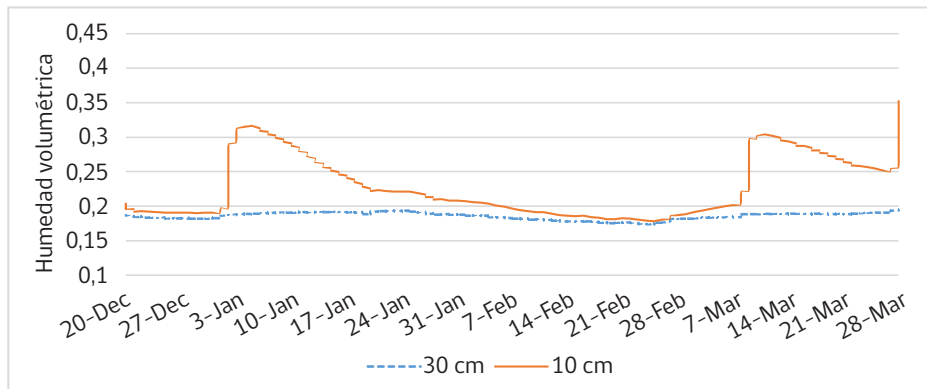


Figura 5.20. Humedad volumétrica a dos profundidades en un suelo volcánico sometido a riego (R-0) medido con sensores Teros 10 (Zona Intermedia de Aysén).

Producción de biomasa

En las Figuras 5.21 (temporada 2021-22) y 5.22 (temporada 2022-23) se muestra la evolución de la disponibilidad de materia seca en la pradera en los diferentes tratamientos y fechas de corte. Cada corte se realizó a 5 cm de altura. En 2021-22 se cortó en cuatro oportunidades (noviembre, diciembre, febrero y fines de marzo), mientras que en 2022-23 se realizó en tres oportunidades (noviembre, enero y comienzos de abril).

Hasta inicios del verano, que en 2021-22 es el corte de diciembre y en 2022-23 el de enero, las diferencias no son importantes. La mayor diferencia se produce en el período estival, cuando se observan las mayores respuestas a los riegos, al irse agudizando el déficit hídrico de verano. El tratamiento R100 llegó a un total de 6.500 kg MS/ha aproximadamente, muy similar en ambas temporadas. En la temporada 2021-22, ello representó un 160 % de mayor rendimiento respecto de R0, mientras que en 2022-23, en la producción total hay una diferencia de 121 % entre R0 y R100. En la temporada 2022-23, el tratamiento R75 incluso superó en producción al R100 (7,4 vs 6,5 t MS/ha; no significativo).

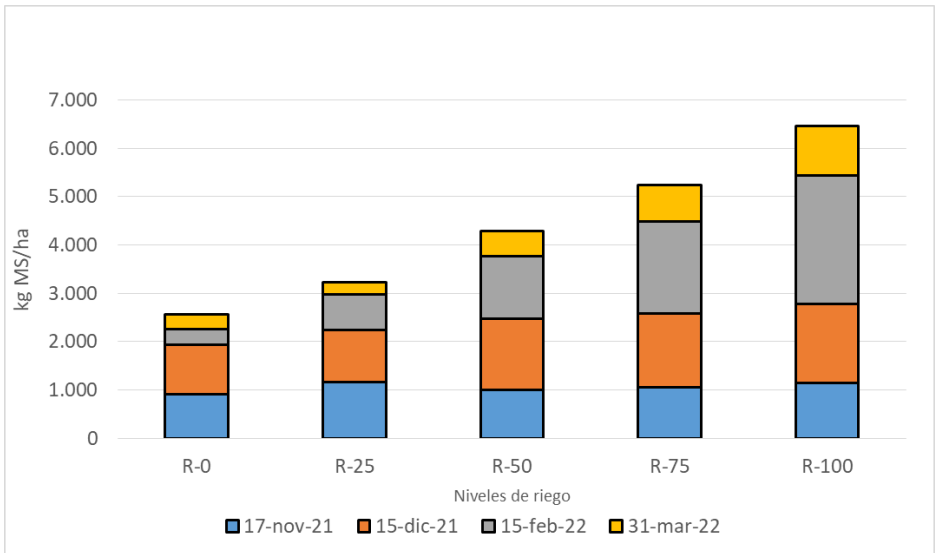


Figura 5.21. Producción de biomasa (kg MS/ha) de una pradera mixta con diferentes niveles de carga de agua de riego (Temporada 2021-22).

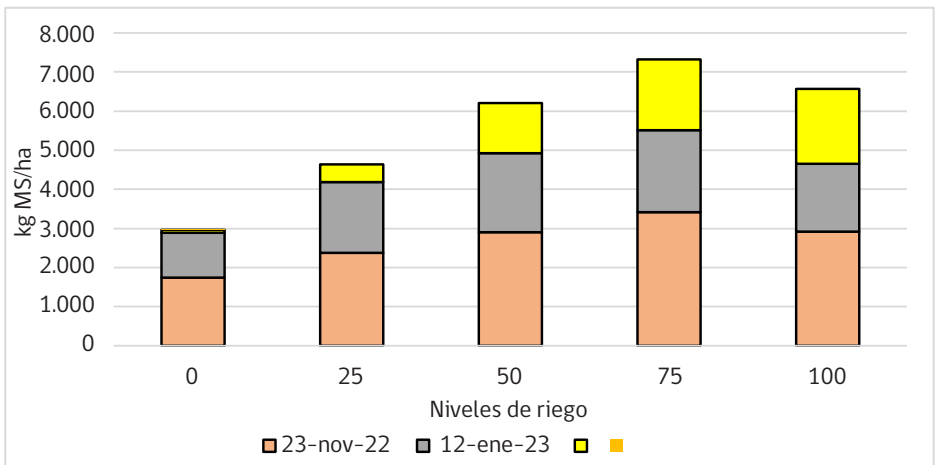


Figura 5.22. Producción de biomasa (kg MS/ha) de una pradera mixta con diferentes niveles de carga de agua de riego (Temporada 2022-23).

También se puede indicar que el tratamiento de riego R100, en 2021-22 rindió cerca de 25 % más que el tratamiento R75, mientras que el tratamiento R100 rindió cerca de 51 % más que el tratamiento R50. Los datos colectados indicarían que sería posible manejar el riego a niveles entre R75 y R100, sin mucha diferencia significativa entre

ambas situaciones, pero que permitiría ahorrar entre 20-25 % del agua utilizada, lo que hace más eficiente al sistema productivo.

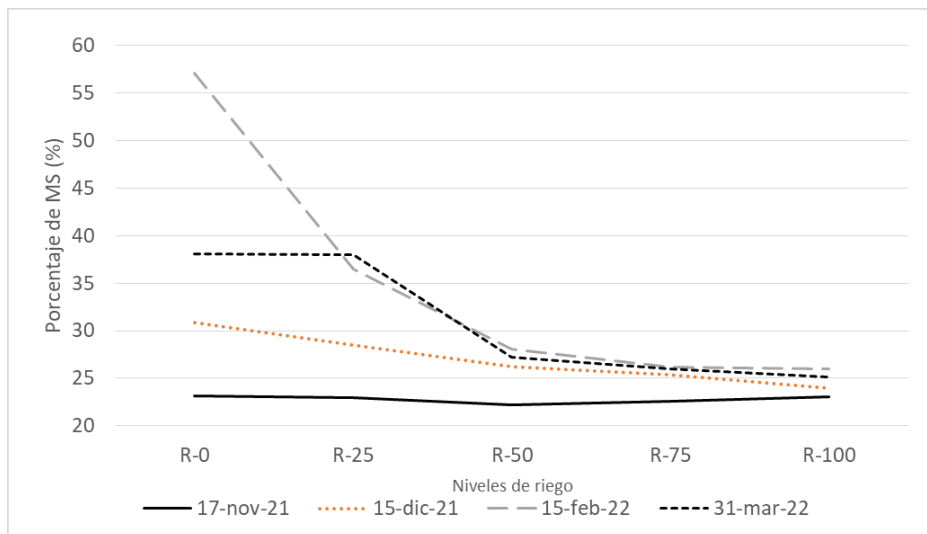


Figura 5.23. Porcentaje de materia seca del forraje cosechado en una pradera con diferentes cargas de agua de riego.

La Figura 5.23 muestra el contenido de materia seca (%) en cada corte para los tratamientos en la temporada 2021-22. Se aprecia que en el tratamiento sin riego, la pradera sucesivamente va aumentando el porcentaje de materia seca, indicando que en los dos últimos cortes (febrero y marzo) se trata de forraje muy seco, fibroso y de mala calidad. Lo contrario ocurre en los tratamientos 100, 75 e incluso 50, donde hay una tendencia a que la pradera se mantenga en estados más vegetativos, de mayor valor nutritivo y palatabilidad para el ganado. Algo similar ocurrió al analizar los valores de materia seca de la temporada 2022-23.

Composición botánica de la pradera y valor nutritivo

La Figura 5.24 muestra los principales componentes de la pradera en los tratamientos y cortes. Inicialmente hay menos diferencias entre los diferentes niveles de riego, mientras que al avanzar la temporada, en ambas temporadas se apreciaron diferencias, especialmente en el contenido de material vegetal senescente (muerto), y la proporción de gramíneas y trébol blanco. El porcentaje de material senescente tiende a ser muy alto en el tratamiento sin riego (R0), mientras que el contenido de gramíneas y trébol son mayores en los tratamientos con más aplicación de agua, sobre todo en R75 y R100.

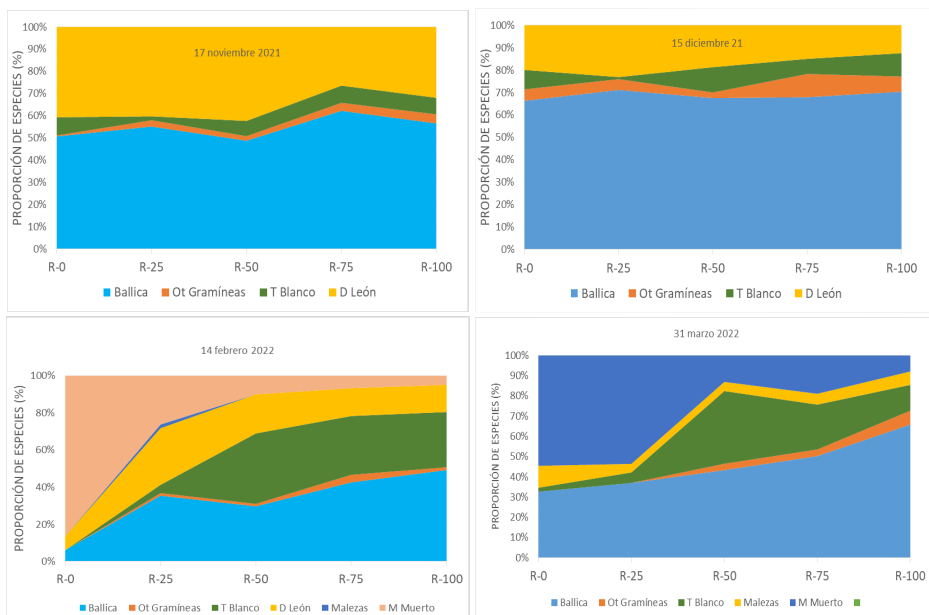


Figura 5.24. Cambios en la composición botánica de una pradera mixta con diferentes cargas de agua en cuatro momentos de la temporada de crecimiento (noviembre, diciembre, febrero y marzo).

Lo anterior tiene repercusiones sobre el valor nutricional del forraje cosechado. En el Cuadro 5.6 se observa la variación de tres variables bromatológicas en tres fechas y en tratamientos contrastantes de riego. La concentración de proteína cruda es similar en los tres tratamientos, salvo en febrero (verano), en que R100 duplica los valores medidos en R0. Al observar los valores de fibra detergente neutra (celulosa, hemicelulosa y lignina), se puede ver que las mayores diferencias se observan también en el corte de febrero, con el tratamiento R-0 (sin riego) con mucho mayor contenido fibroso que los demás. Lo anterior tiene implicancias en la digestibilidad del forraje, siendo menos digestible en R-0 comparado con R100.

Cuadro 5.6. Variación de los niveles de proteína cruda, fibra detergente neutra (FDN) y digestibilidad in vitro para forraje cosechado en tres niveles de riego y en tres fechas diferentes dentro de una temporada de crecimiento.

Tratamiento	%Proteína cruda		
	17 nov	15 dic	16 feb
R-0	17,9	10,7	7,8
R-50	17,3	11,5	12,6
R-100	18,4	12,5	15,6

Tratamiento	% FDN		
	17 nov	15 dic	16 feb
R-0	31,6	46,4	57,1
R-50	33,2	47,9	47,6
R-100	35,2	49,5	43,7

Tratamiento	% Digestibilidad in vitro		
	17 nov	15 dic	16 feb
R-0	86,1	79,4	76,2
R-50	87,1	80,5	78,9
R-100	86,9	78,6	83,2

Evaluación de riego en la Zona de Estepa de Aysén

Junto con el desarrollo de experimentos en la Zona Intermedia de Aysén, se instalaron también unidades de medición en dos predios de la Zona de Estepa, que contaban con sistemas de riego instalados y funcionando. Se utilizaron dos sectores contrastantes: Ñirehuao (80 km al NE de la ciudad de Coyhaique) y El Blanco (40 km al E de Coyhaique). El primero se ubica en la Zona de Estepa, mientras que el segundo está en un sector transicional entre la Zona Intermedia y la de Estepa. En ambos casos se trata de sistemas de riego tipo pivote central, que cubren del orden de 60 ha cada uno. El primero funciona de forma gravitacional, mientras que el segundo requiere de bombeo.

Características del suelo

Los suelos de ambos sectores analizados son diferentes. En el caso de El Blanco se trata de un suelo volcánico (Andisol), mientras que en Ñirehuao se podría clasificar como un Inceptisol. La textura (Figura 5.25) se evaluó en diferentes puntos de los pivotes para ambas localidades y a tres profundidades (10, 30 y 50 cm). En ambas localidades predomina la fracción de "arena", lo que hace que la clase textural predominante sea franco arenoso. Las excepciones son el sector Ñih1 y ElB2-30cm, que serían de clase textural franco.

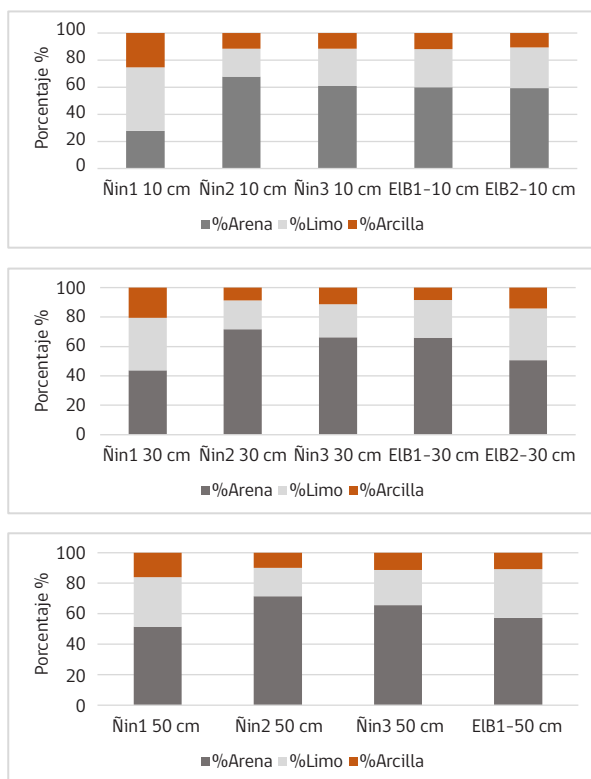


Figura 5.25. Determinación de textura de dos suelos (Sector Ñirehuao (Ñih) y El Blanco (EIB) a los 10, 30 y 50 cm de profundidad. Proporciones de arena, limo y arcilla.

En el Cuadro 5.7 se resumen los resultados del análisis de diversas variables físicas, que son de interés para el estudio de la dinámica del agua en el suelo.

Cuadro 5.7. Rangos de densidad aparente, densidad real, constantes hídricas (capacidad de campo, CC; porcentaje de marchitez permanente, PMP) y humedad aprovechable de dos suelos del sector de Ñirehuao (Ñih, Zona de Estepa) y El Blanco (EIB, Zona Transicional a Estepa), a tres profundidades.

	Da	Dr	%CC	%PMP	%HA	prof (cm)	m ³ /ha/cm	m ³ /ha/50 cm
Ñih-10 cm	0,63 - 0,67	2,58 - 2,60	45,4 - 54,2	24,0 - 30,4	21,2 - 23,8	10	14,6	14,6
Ñih-30 cm	0,91 - 0,92	2,55 - 2,61	38,1 - 48,5	19,9 - 26,2	18,3 - 22,3	20	18,6	18,6
Ñih-50 cm	1,02 - 1,04	2,53 - 2,57	38,5 - 46,1	20,1 - 24,9	18,4 - 21,2	20	20,4	20,4
EIB-10 cm	0,71 - 0,74	2,54 - 2,56	50,5 - 51,4	27,1 - 27,3	23,2 - 24,3	10	17,2	17,2
EIB-30 cm	0,86 - 0,91	2,52 - 2,57	46,6 - 48,5	25,2 - 26,2	21,5 - 22,3	20	19,4	19,4
EIB-50 cm	0,76	2,53	49,8	26,9	22,9	20	17,4	17,4

En Ñirehuao, se aprecia que la densidad aparente tiende a aumentar en profundidad, siendo bastante baja en superficie, lo que seguramente está relacionado a relativamente altos contenidos de materia orgánica en el perfil superficial. Igualmente, el porcentaje de humedad aprovechable tiende a ser mayor en los niveles superficiales. En los primeros 50 cm de profundidad estos suelos pueden acumular del orden de 925 m³ de agua por hectárea. En el caso de El Blanco, la densidad aparente tiende a variar menos entre las profundidades analizadas y los porcentajes de humedad aprovechable son similares a los registrados en Ñirehuao.

En cuanto a la porosidad de los suelos, el Cuadro 5.8 muestra los resultados encontrados. Los diferentes suelos se ubican en valores de porosidad total cercanos para las diferentes profundidades, aunque ésta tiende a ser mayor en El Blanco a los 50 cm. También se indica el desglose de macroporos y microporos en cada caso.

Cuadro 5.8. Rangos de porosidad total, macroporosidad y microporosidad de suelos de los sectores de Ñirehuao (Ñih), Zona de Estepa) y El Blanco (ElB, Zona Transicional a Estepa), a tres profundidades.

	Porosidad total (%)	Macroporosidad (%)	Microporosidad (%)
Ñih-10 cm	74,0 - 75,8	21,6 - 29,2	45,4 - 54,2
Ñih-30 cm	63,9 - 65,1	16,7 - 25,9	38,1 - 48,5
Ñih-50 cm	59,3 - 60,3	14,9 - 21,8	38,5 - 46,1
ElB-10 cm	70,9 - 72,3	20,4 - 20,9	50,5 - 51,4
ElB-30 cm	64,6 - 65,9	17,4 - 17,9	46,6 - 48,5
ElB-50 cm	70	20,2	49,8

Registros meteorológicos

Las microestaciones meteorológicas instaladas en cada localidad (El Blanco y Ñirehuao) registran permanentemente datos de diferentes variables climáticas. En la Figura 5.26 se muestra la evolución de temperatura del aire (línea continua) y los eventos de precipitaciones (columnas), entre diciembre 2021 y marzo 2022, para la localidad de El Blanco.

Ocurrieron precipitaciones significativas sólo a mediados del mes de enero. Las temperaturas en general se movieron en rangos de 10-20 °C la mayoría de las veces, normal para esta zona y fechas. Se aprecia que en febrero prácticamente no se registraron lluvias. La Figura 5.27 muestra algo similar para la localidad de Ñirehuao, con temperaturas más bajas en un rango de 8-18 °C, al encontrarse esta zona en un clima más riguroso. Queda de manifiesto la fuerte restricción hídrica que puede ocurrir en verano en estas zonas.

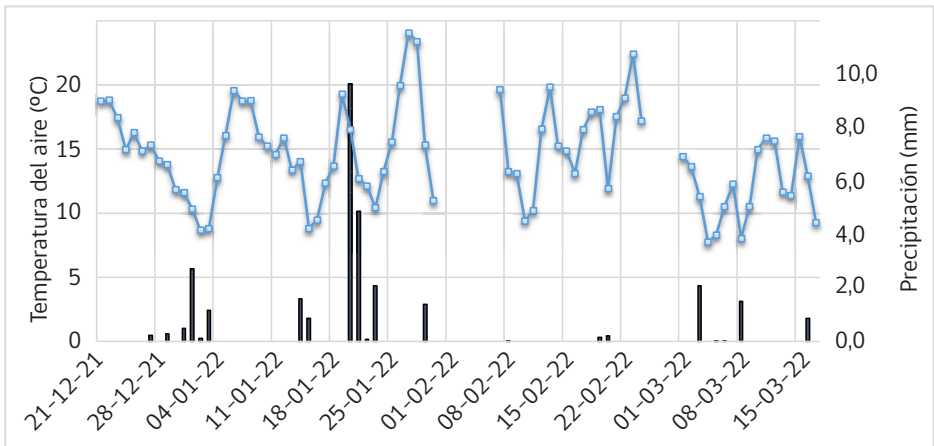


Figura 5.26. Eventos de precipitación y evolución de la temperatura diaria durante el período de verano 2021-2022 en el sitio de evaluación (El Blanco).

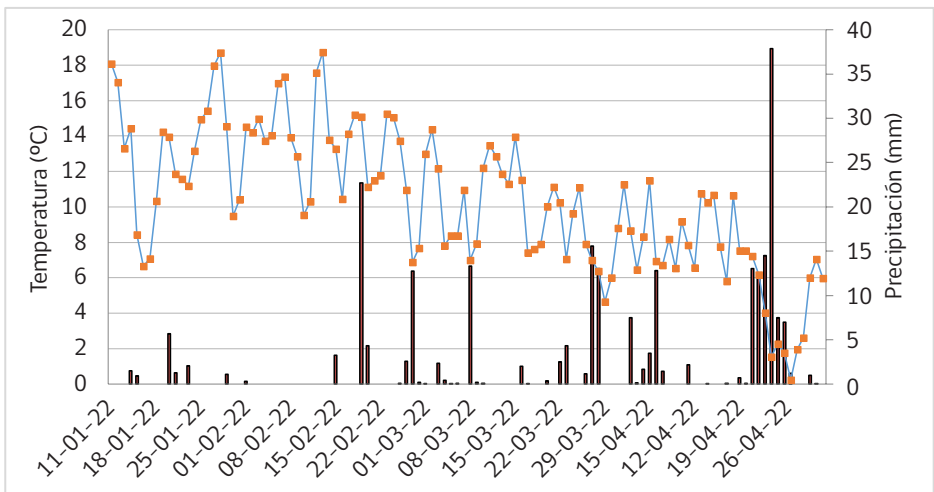


Figura 5.27. Eventos de precipitación y evolución de la temperatura diaria durante el período de verano 2021-2022 en el sitio de evaluación (Ñirehuao).

En las Figuras 5.28 y 5.29 se aprecian las variaciones en la velocidad del viento, en metros/segundo en ambas localidades. En El Blanco, en verano, la mayoría de los días registran vientos, siendo la norma un rango de 6-10 m/s, lo que equivale aproximadamente a 21-36 km/h. Ambas zonas analizadas son zonas normalmente ventosas. En el sitio de Ñirehuao, los registros de la temporada se mueven habitualmente entre 2-8 m/s, o sea entre 7-29 km/h. En ambos casos están en un

rango que es “moderado”, pero debe considerarse que estos son promedios diarios, es decir, pueden ocurrir ráfagas de viento muy superiores en algunos casos. Esta condición ventosa tiene efectos sobre aumentar la evaporación y debe considerarse en la planificación del riego. Además, están los factores de deriva que causan los vientos en los sistemas de aspersión.

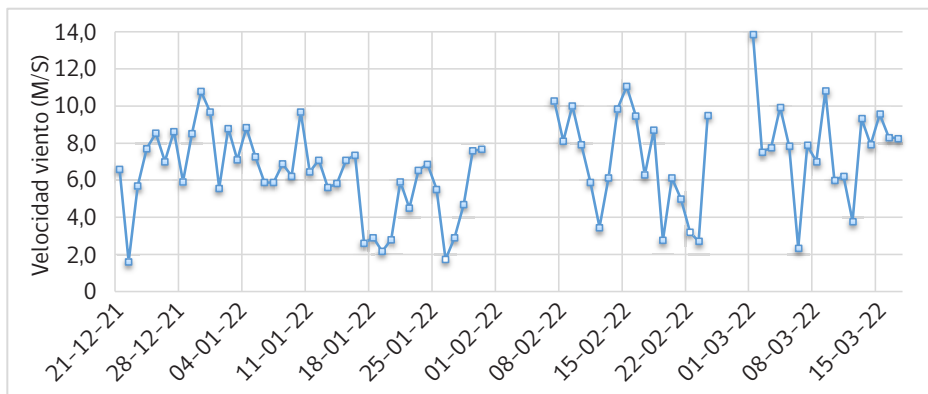


Figura 5.28. Velocidad del viento durante el período estival 2021–2022 en el sitio de evaluación El Blanco.

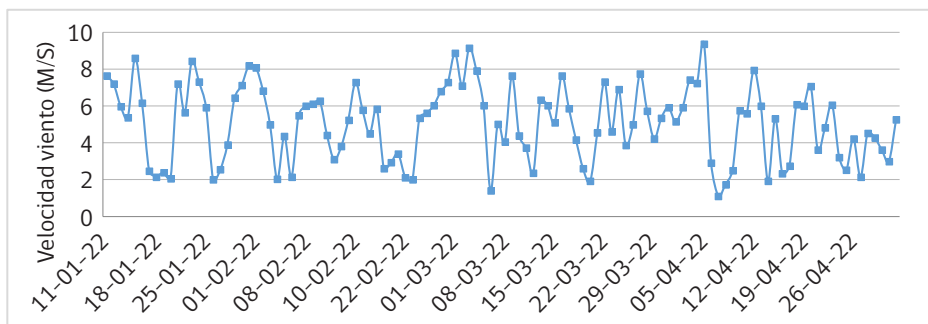


Figura 5.29. Velocidad del viento durante el período estival 2021–2022 en el sitio de evaluación de Ñirehuao.

Humedad del suelo

Los sensores de humedad se ubicaron en diferentes sectores de los pivotes, teniendo una unidad central ubicada dentro de la unidad demostrativa y tres sensores periféricos, para abarcar mejor la variabilidad de suelo y cultivos que se desarrollan bajo el pivote.

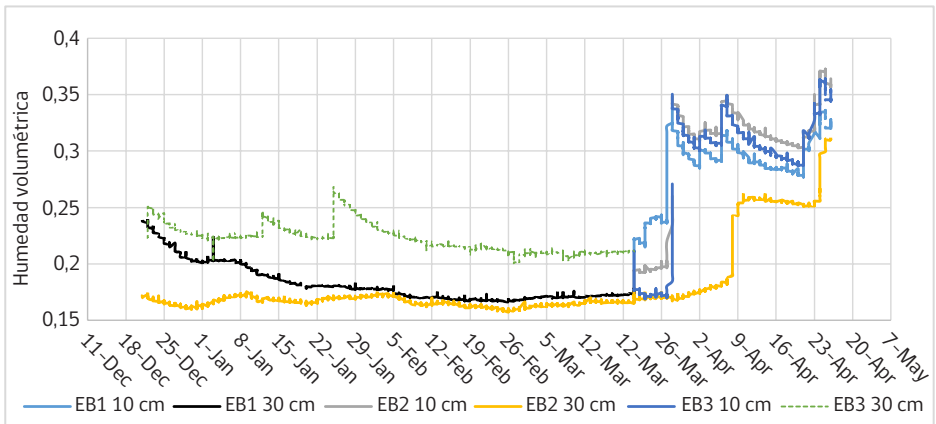


Figura 5.30. Variación de la humedad del suelo (humedad volumétrica) en tres sectores periféricos, a diferentes profundidades.

Es importante señalar que inicialmente se instalaron los sensores a 30 cm de profundidad, lo que demostró ser excesivo. Por ello se agregaron sensores a los 10 cm de profundidad, lo que permitirá monitorear de mejor manera el riego del pivote. En la Figura 5.30 se observa en todo caso que a nivel de 30 cm, la humedad nunca fue adecuada. Producto de las precipitaciones desde inicios de marzo, se registra que la humedad de suelo llega a niveles deseables. En la Figura 5.31, también en la localidad de El Blanco, se observa la humedad del suelo a tres diferentes profundidades. Hay una tendencia fuerte a la disminución de la humedad del suelo desde diciembre hasta fines de febrero, en las tres profundidades, aunque en el horizonte 0-10 cm se producen algunos *peaks* producto de eventos de riego.

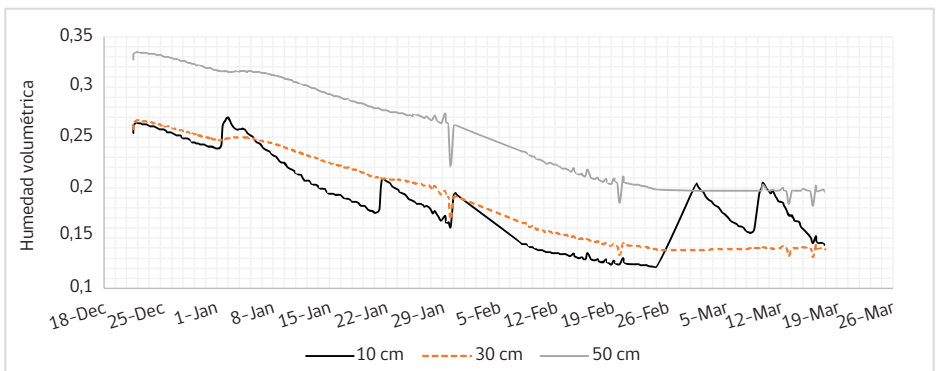


Figura 5.31. Humedad volumétrica de suelo en la localidad de El Blanco bajo un pivote de riego, a tres profundidades en el verano 2021-22.

Según los datos de la Figura 5.31, se muestra que el riego no fue suficiente, ya que los sensores de mayor profundidad presentan, en general, mayor nivel de humedad que el superficial. A 10 y 30 cm de profundidad, los niveles de humedad en gran parte del mes de febrero estuvieron cercanos al PMP, mientras que a los 50 cm bajaron del 50 % de humedad aprovechable en el mismo período. En esta situación, las plantas están extrayendo agua a mayor profundidad, lo que especies como la alfalfa y el trébol rosado pueden hacer, pero que no optimiza los resultados productivos. De acuerdo a lo observado en terreno, en este caso debiera optarse por riegos más seguidos, ya que la precipitación del sistema de pivote no permite un mojado completo del perfil y está diseñado para mayor frecuencia de riego.

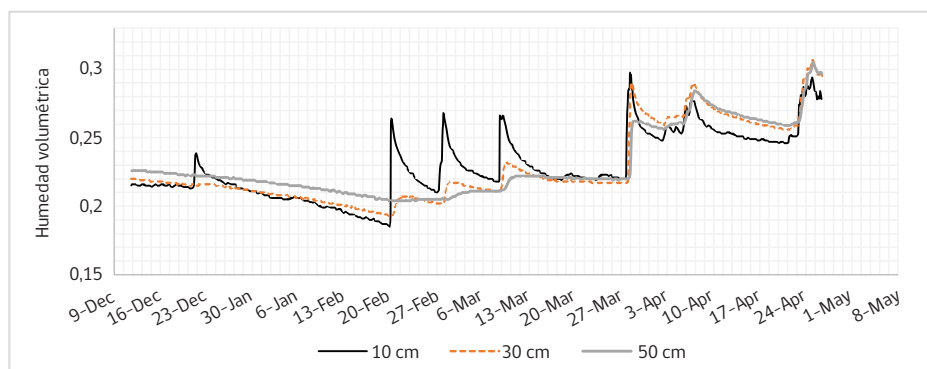


Figura 5.32. Humedad volumétrica de suelo en la localidad de Ñirehuao bajo un pivote de riego, a tres profundidades en el verano 2021-22.

Los sensores instalados a tres profundidades en la localidad de Ñirehuao (Figura 5.32), también registraron respuestas similares a lo observado en el caso anterior. En el mes más crítico (febrero), la tendencia en la humedad de suelo fue a la disminución, con registros cercanos a PMP en los niveles superficiales. Hacia fines de febrero e inicios de marzo, los aumentos observados se deben en gran medida a la precipitación registrada, en que el suelo vuelve a niveles que superan el 50 % de humedad aprovechable.

Evaluación de praderas y cultivos

En cada localidad (El Blanco y Ñirehuao) se ubicó una unidad demostrativa y de evaluación de diferentes opciones forrajeras, en base a especies perennes, que conforman las praderas permanentes, así como con especies anuales (Figura 5.33).

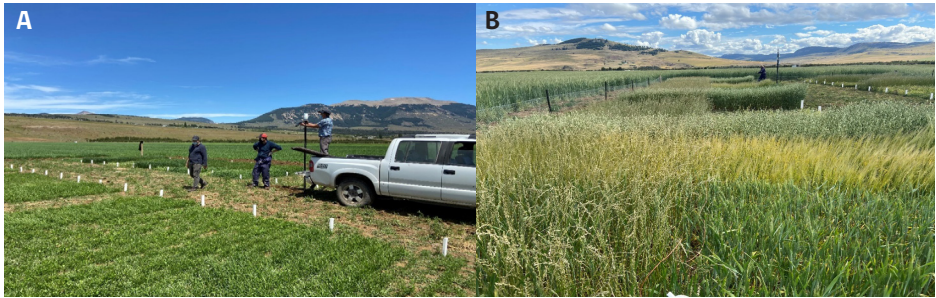


Figura 5.33. Vista general ensayo pivote El Blanco (A: parcelas A y B: cereales).

La Figura 5.34 resume los resultados en producción de materia seca (MS) de cinco opciones forrajeras anuales, en la localidad de El Blanco, donde se alcanzaron rendimientos acumulados entre 4.500 y 9.400 kg MS/ha en dos fechas de corte. Aquí destacaron los cereales (trigo, cebada y avena), en comparación a los rendimientos obtenidos con las brásicas (nabos y raps forrajero). Esta diferencia se puede atribuir a las diferencias fenológicas en el crecimiento de estas especies, pero también a la incidencia de ataque de polillas de la col en las brásicas.

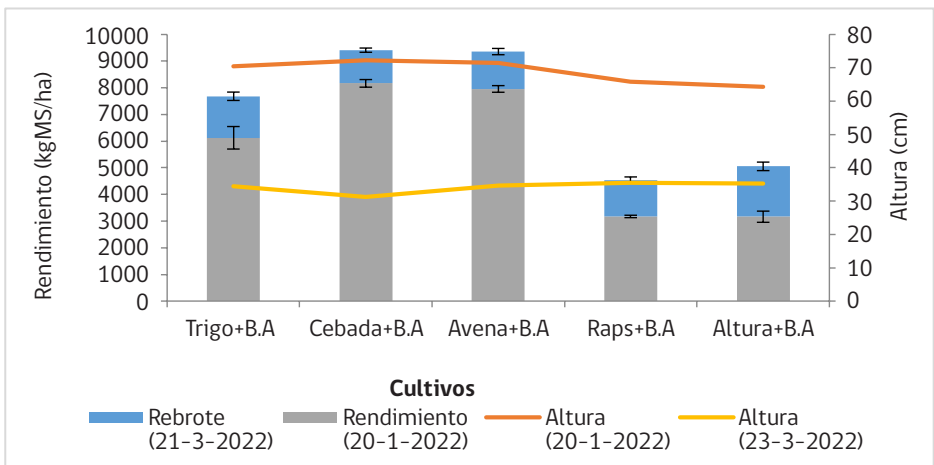


Figura 5.34. Producción de forraje acumulado (kg MS/ha) con cinco opciones forrajeras anuales bajo riego durante la temporada agrícola 2021/22 en sector El Blanco.

Durante la temporada 2022/23, en El Blanco se alcanzaron rendimientos acumulados entre 4.800 y 14.000 kg MS/ha, mientras que en el sector de Ñirehuao se obtuvieron rendimientos entre 2.600 y 7.000 kg MS/ha para los mismos cultivos (Figura 5.35).

En ambos casos, la mayor acumulación de forraje está dada por la primera fecha de corte y los cultivos de mejor desempeño correspondieron a centeno, cebada y avena, seguido del trigo. El triticale Faraón obtuvo los menores rendimientos, lo que se explica por el hábito de crecimiento tardío de esta variedad, al tener un desarrollo más lento.

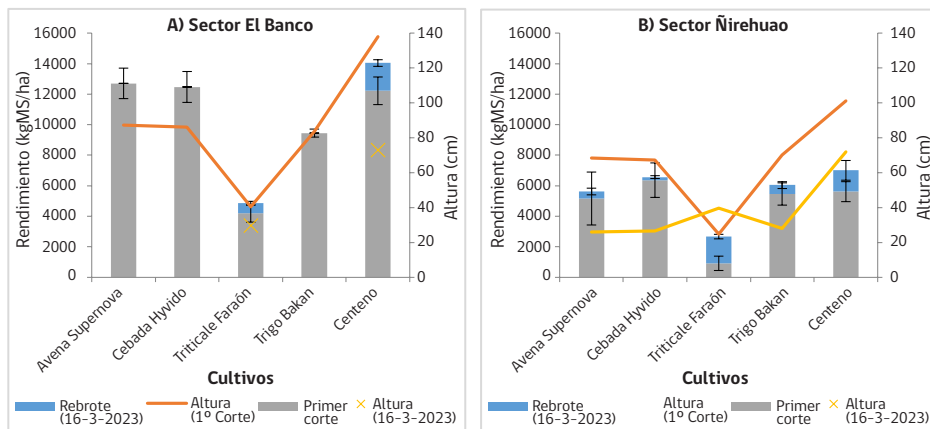


Figura 5.35. Producción de forraje acumulado (kg MS/ha) con cinco opciones forrajeras anuales bajo riego durante la temporada agrícola 2022/23. A) Sector El Blanco y B) sector Ñirehuao.

Durante la temporada 2022/23, se evaluaron cinco especies de cereales hasta el estado fenológico de grano seco. En la Figura 5.36 se muestran los resultados obtenidos en ambos ensayos bajo pivotes de riego, donde se observa rendimientos entre 6.800 y 10.000 Kg MS/ha para el sector del Blanco y valores entre 4.500 y 14.000 kg MS/ha en el sector de Ñirehuao. En este último caso, cabe destacar los rendimientos obtenidos en avena variedad INIA Supernova.

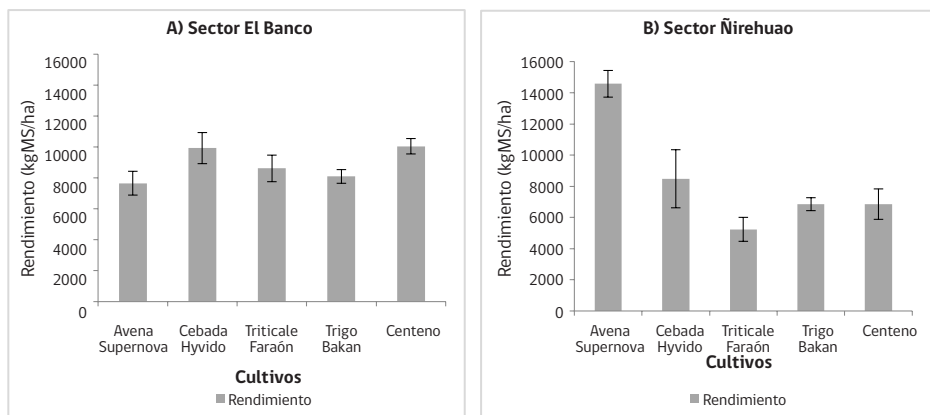


Figura 5.36. Producción de grano (kg MS/ha) con cinco opciones forrajeras anuales bajo riego, durante la temporada agrícola 2022/23. A) Sector El Blanco y B) sector Ñirehuao.

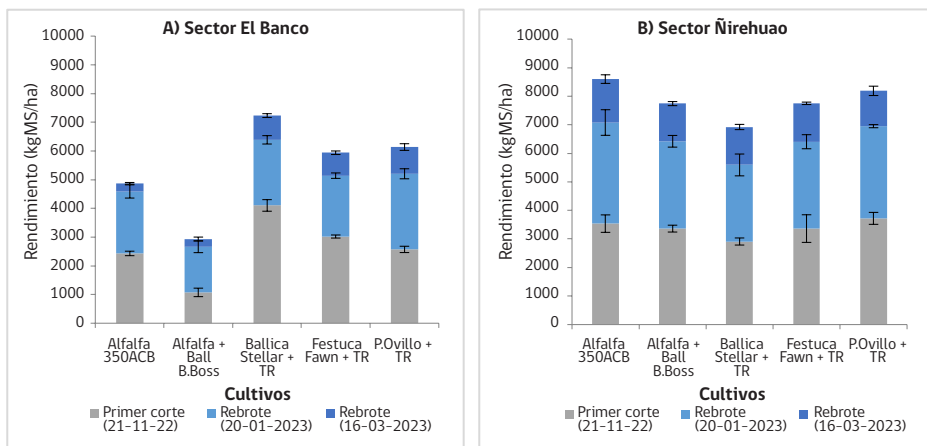


Figura 5.37. Producción de forraje acumulado (kg MS/ha) con cinco opciones forrajeras perennes bajo riego, durante la temporada agrícola 2022/23. A) Sector El Blanco y B) sector Ñirehuao.

La temporada 2021/22 fue de establecimiento de especies forrajeras perennes, con rendimientos relativamente bajos. El crecimiento obtenido durante la segunda temporada (22/23) para los ensayos con especies pratenses perennes permitió la obtención de tres cosechas o cortes, distribuidos en los meses de noviembre, enero y marzo. De esta manera, se lograron rendimientos acumulados entre 3.000 y 7.200 kg MS/ha en El Blanco, y entre 7.000 y 8.600 kg MS/ha en Ñirehuao (Figura 5.37).

Los rendimientos obtenidos en condiciones de riego en estas zonas esteparias no serían factibles en condiciones de secano. La pradera predominante en estas zonas es la estepa de coirón, la que sólo alcanza niveles muy bajos de producción, habitualmente bajo 1.000 kg MS/ha. De esta forma, la Zona de Estepa presenta los diferenciales mayores en producción de biomasa al comparar secano con riego y ello haría más factible económicamente la instalación de sistemas de riego en muchos sectores.

Resistencia y resiliencia de especies forrajeras frente a estrés hídrico

Con el objetivo de conocer la resistencia y resiliencia de diferentes especies forrajeras de uso común, frente a estrés hídrico, en la Región de Aysén, se desarrolló un experimento controlado en condiciones de invernadero. El experimento se desarrolló en el Centro de Investigación INIA Tamel Aike, ubicado en el sector de Valle Simpson (Zona Intermedia), a aproximadamente 29 km al SE de la ciudad de Coyhaique, en plena Zona Intermedia de Aysén.

En este experimento se pretendía evaluar la resistencia al estrés por déficit hídrico de ocho diferentes especies forrajeras perennes. Asimismo se evaluó la resiliencia de dichas especies, luego de un periodo de estrés hídrico, viendo su capacidad de recuperación al reponerse el riego.

Material vegetal

Se utilizaron plantas obtenidas a partir de semillas, las que fueron sembradas en almacigueras, germinadas y establecidas. Durante este periodo de crecimiento, las plantas fueron regadas abundantemente, para favorecer el crecimiento vegetativo y la formación de macollos o estolones. Las especies seleccionadas para el ensayo fueron:

- *Lolium perenne* (ballica perenne) cv Nui
- *Festuca arundinacea* (festuca) cv Fawn
- *Dactylis glomerata* (pasto ovillo) cv Potomac
- *Bromus stamineus* (bromo) cv Bromino
- *Plantago lanceolata* (sietevenas) cv Tonic
- *Trifolium repens* (trébol blanco) cv Huia
- *Trifolium pratense* (trébol rosado) cv Quiñequeli
- *Medicago sativa* (alfalfa) cv ACB350

Las plantas fueron trasplantadas a macetas y en cada planta se marcó una unidad de crecimiento (macollo o estolón), en la cual se realizaron evaluaciones periódicas de la tasa de elongación de láminas o peciolos.

El experimento se dividió en dos subexperimentos (dos sets de plantas independientes) y contaba con los siguientes tratamientos:

- Subexperimento de resistencia:
 - a. Interrupción del agua de riego para generar una situación de estrés a las plantas.
 - b. Control: con riego permanente.
- Subexperimento de resiliencia:
 - a. Interrupción del agua de riego (período de estrés) y posterior reposición.
 - b. Control con riego permanente.

Se utilizaron cinco macetas con suelo desnudo para estimar la reposición de agua de riego (tabla de riego), que permita mantener las macetas entre capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP). Para ello se saturaron las macetas y se registró el peso una vez que dejaron de drenar. Luego, se registró el peso nuevamente a intervalos de 6 horas aproximadamente.

Durante el experimento se realizaron mediciones de elongación de hojas/peciolo cada siete días, en un macollo/estolón marcado por maceta. Además, se registraron datos de altura de las plantas y número de nuevos macollos/estolones asociados a la unidad marcada. Al final de los periodos de corte y reposición del riego, los tratamientos correspondientes fueron cosechados y se evaluó el peso fresco y seco de la parte aérea y radicular de cada planta.

El experimento se efectuó durante los meses de enero y febrero. El período de crecimiento inicial, con riego, fue de 20 días. Una vez transcurrido ese tiempo, en las macetas correspondientes al tratamiento con estrés, vino el período de suspensión de riego con una duración de 18 días. El tratamiento de resiliencia tuvo luego un período de recuperación, que se extendió por otros 21 días.

Resistencia

La Figura 5.38 muestra los efectos del estrés hídrico de 18 días en las diferentes especies de plantas forrajeras del experimento de resistencia. Se aprecia que todas las especies fueron fuertemente afectadas. Las gramíneas forrajeras vieron disminuida su producción de la fracción aérea entre 35-44%, siendo la ballica perenne la que mostró una tendencia a ser más resistente. La alfalfa (56 %), el sietevenas (48 %) y el trébol blanco (49 %) se afectaron más con el estrés hídrico inducido, con menor peso de la fracción aérea de la planta.

Debe considerarse que estas no son plantas adultas y, por lo tanto, no han desarrollado adecuadamente su sistema radicular, como sería el caso de una situación real de terreno. Se observa en todo caso que hay diferencias entre las especies indicadas, lo que también llevaría a pensar en mejores posibilidades de establecimiento de ciertas especies en relación a otras, durante el primer año de desarrollo.

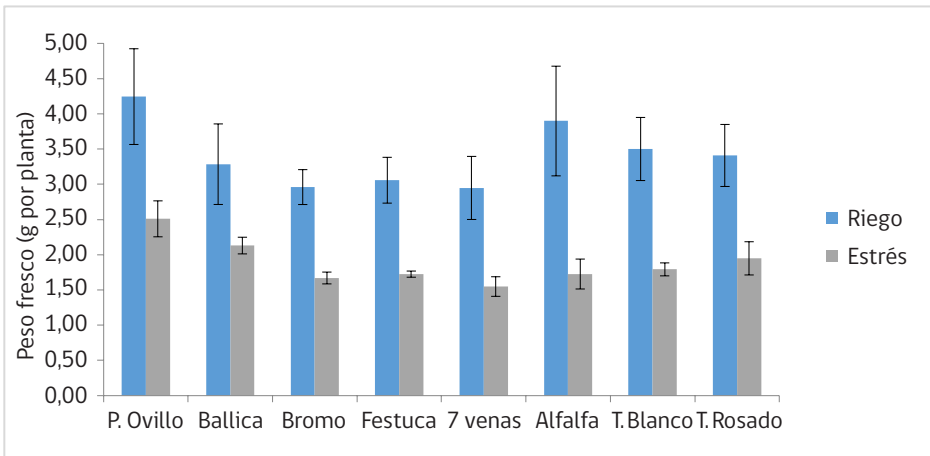


Figura 5.38. Peso seco de la parte aérea de diferentes especies sometidas a estrés hídrico vs aquellas con un riego permanente (g MS/planta).

En la Figura 5.39 se observa el efecto del estrés hídrico sobre la masa radicular en cada caso. Nuevamente se aprecia que el estrés hídrico afectó de manera significativa el crecimiento de raíces. El bromo fue la especie menos afectada en disminución de masa radicular, con casi un 23 % de menor peso, seguido del trébol blanco (35 % menos), mientras que sietevenas (64 % menos), trébol rosado (53 % menos) y alfalfa (49 % menos) tuvieron mayor afectación. El resto tuvo una disminución intermedia de entre 42-45 % de menor producción de materia seca de raíces, producto del déficit hídrico inducido en el experimento.

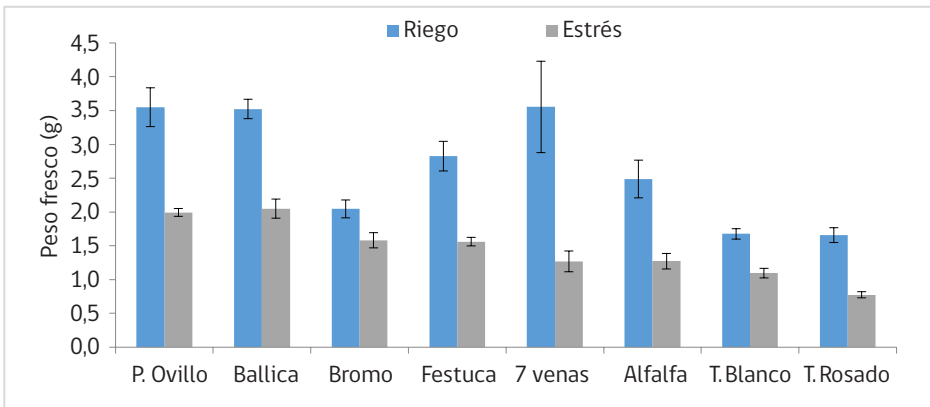


Figura 5.39. Efectos del período de estrés hídrico sobre la masa radicular de diferentes especies forrajeras (g MS raíz).

Las especies que normalmente tienen mayor resistencia a la sequía por su mayor profundidad radicular, no lo pudieron expresar en este experimento, por las limitaciones de profundidad de las macetas (15 cm) y tratarse además de plantas jóvenes en su primera etapa de desarrollo. Por ello, los resultados serían extrapolables más bien a situaciones de establecimiento inicial de estas especies.

En la Figura 5.40 se muestra la variación de la tasa diaria de elongación de láminas (hojas de gramíneas) en macollos marcados y en pecíolos (leguminosas).

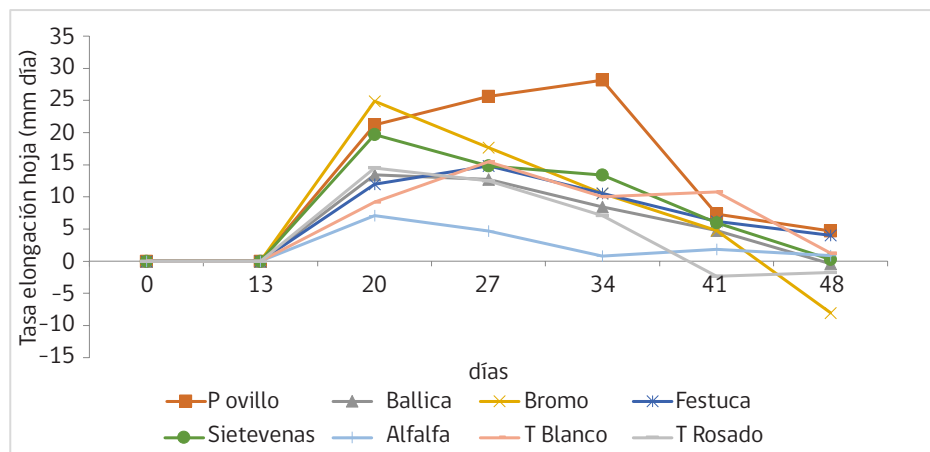


Figura 5.40. Tasas de elongación de hojas (gramíneas) o pecíolos (leguminosas) bajo riego en mm/d.

Se aprecia que el pasto ovido es el que alcanza las mayores tasas de elongación y que éstas tienden a decaer hacia el final del experimento. Ello puede deberse también en algunos períodos a situaciones de estrés térmico, ya que en el invernadero el control de temperatura no alcanzó la eficiencia deseada, debido a las altas temperaturas exteriores en algunos días.

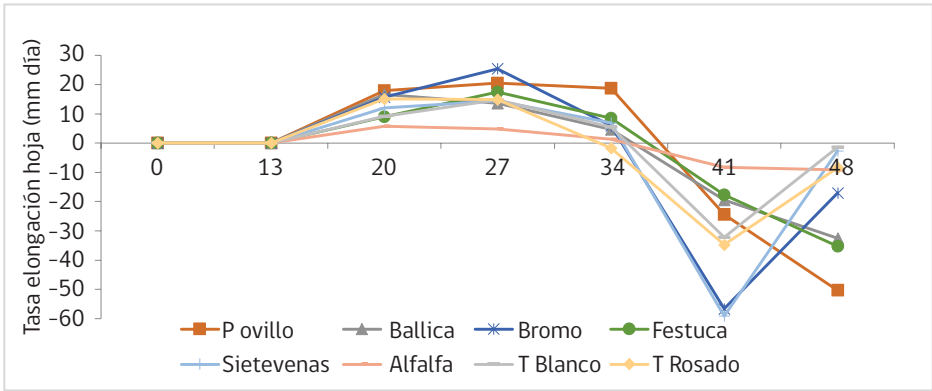


Figura 5.41. Tasas de elongación de hojas o pecíolos al someter las plantas a estrés (mm/d).

La Figura 5.41 muestra las tasas de elongación que tenían las plantas hasta el momento de iniciar la inducción del estrés hídrico y de cómo éste afectó negativamente el crecimiento de hojas y pecíolos en todas las especies.

Resiliencia

La Figura 5.42 presenta la comparación por especie de plantas sometidas a riego permanente versus plantas con restricción temporal de agua y su capacidad de recuperación o resiliencia.

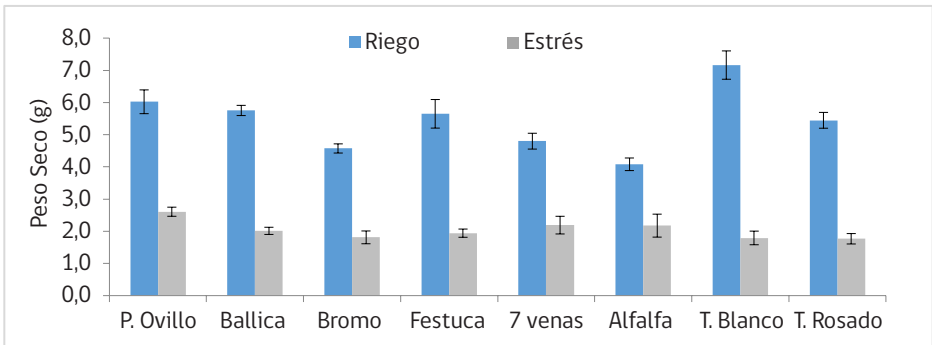


Figura 5.42. Peso final de la biomasa aérea de diferentes especies (g MS/maceta) bajo riego permanente o con interrupción de riego y luego reposición.

Todas las plantas se vieron muy afectadas por la restricción hídrica y tuvieron una recuperación limitada. Las plantas más resilientes fueron el pasto ovillo, sietevenas y la alfalfa, con una pérdida de materia seca de 47, 54 y 57 %, respectivamente. La más afectada fue el trébol blanco, con un 75 % de menor producción de biomasa, luego del período de estrés, comparado con la misma especie bajo riego permanente. Las otras especies también se vieron afectadas, aunque algo menos, con pérdidas de entre 60–68 %.

De manera similar, la Figura 5.43 resume los resultados de los efectos del período de estrés hídrico sobre la masa radicular de las especies. Se observa que los efectos de la restricción hídrica fueron aún mayores a nivel de afectar la biomasa radicular. Las pérdidas de masa radicular luego del estrés hídrico fueron muy altas, en general, superiores al 80 %, y algo inferiores en alfalfa, bromo y festuca.

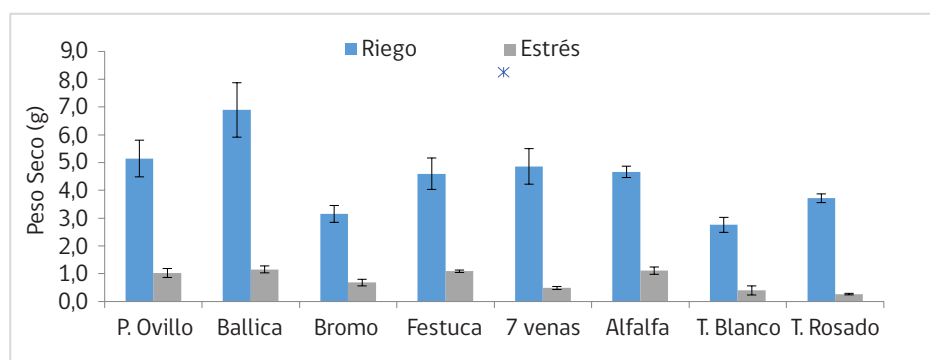


Figura 5.43. Peso final de la biomasa radicular de diferentes especies (g MS/maceta) bajo riego permanente o con interrupción de riego y luego reposición.

Comentario

El déficit hídrico afecta fuertemente el desarrollo de la biomasa aérea y radicular de las especies estudiadas, lo que se refleja también en las tasas de elongación de láminas y pecíolos, llegando a ser negativos (senescencia > crecimiento).

Es importante señalar que en este estudio se trata de plantas nuevas, recientemente establecidas y con su volumen de suelo delimitado, lo que sin duda afecta el crecimiento de raíces en profundidad. Por ello, es probable que las especies con hábitos de crecimiento radicular más profundo no pudieran expresar esas ventajas. Sin embargo, los resultados podrían reflejar lo que puede ocurrir en las etapas iniciales de las praderas y cultivos, una vez que son establecidos en la primera temporada.

Efectos del riego en un sistema bovino de carne de la Zona Intermedia de Aysén

La falta de humedad en verano tiene repercusiones graves sobre la continuidad y sustentabilidad de un sistema productivo ganadero, obligando a modificar la carga animal o bien a adquirir recursos forrajeros externos para paliar la falta de alimentos. Ello tiene efectos directos sobre la cantidad de forraje que se puede conservar y así tener suficiente alimento para suplementar el ganado durante el invierno, período en que la pradera no crece y puede durar entre 140-160 días habitualmente (mediados mayo a mediados octubre, por ejemplo). Se transforma así en uno de los riesgos más significativos para los sistemas productivos ganaderos de la zona.

Todo ello tiene también consecuencias económicas y repercute sobre la rentabilidad del sistema. Para evaluar el efecto que pudiera tener en un sistema de producción de carne bovina el suplementar agua en praderas durante el período estival, se instalaron parcelas de riego y se compararon con otras sin riego (secano).

En una superficie total de 2 ha, sobre una pradera mixta de festuca x ballica perenne x trébol blanco, manejada en condiciones de pastoreo con bovinos, se instalaron parcelas de 3x4 m, con y sin riego estacional. Se tuvieron cuatro repeticiones y cada una de ellas se protegió mediante cerco eléctrico para evitar el ingreso de animales. Cada vez que se había acumulado una cantidad significativa de biomasa en las parcelas, se procedía a medir la biomasa presente (sobre 5 cm de altura).

Suelo y riego

El suelo es originado a partir de depósitos de cenizas volcánicas, siendo clasificado como un *Andisol hapludand*. Se trata de un suelo profundo, sin pedregosidad y de textura franco arenosa, lo que le confiere un drenaje rápido. En el Cuadro 1 se muestran las características físicas del suelo. En un muestreo, se analizó a nivel de superficie (0-10 cm) y otra fracción más profunda (10-30 cm).

Cuadro 5.9. Perfil superficial (30 cm) de un suelo de la Zona Intermedia de Aysén y sus constantes hídricas (capacidad de campo CC y porcentaje de marchitez permanente PMP), humedad aprovechable (HA) y densidad aparente (Da). Suelo con cubierta de pradera mixta de festuca/ballica y trébol blanco.

	prof (cm)	CC	Dr	HA	Da	cm en primeros 30 cm	m ³ /cm/ha	m ³ por horizonte/ha
Perfil	0-10	45,9	23,9	22,0	0,71	10,0	15,6	156,2
	11-30	40,1	20,9	19,2	0,75	20,0	14,4	288,0

El riego se realizó en las parcelas correspondientes, aplicando el agua mediante una motobomba desde un estanque sobre un carro de arrastre (3000 l). La cantidad de agua aportada se medía mediante un caudalímetro instalado en la línea. La cantidad de agua aprovechable (Cuadro 5.9) que puede acumular el suelo en los primeros 30 cm superficiales (zona de mayor concentración radicular) es de 444 m³ por hectárea, lo que equivale a una altura de agua de 44,4 mm. Si se considera regar cuando se haya consumido un 50 % del agua aprovechable, la lámina de reposición sería de 22,2 mm, mientras que si se hace con un 60 %, la altura a reponer será de 27 mm.

En la temporada 2021-22 se realizaron nueve riegos: 30 noviembre; 6-13-20-27 de diciembre; 12 y 20 de enero; y 10-18 de febrero. Ello significó una aplicación aproximada de 243 mm, equivalente a 2.430 m³/ha. En la temporada 2022-23 se regó en 10 oportunidades: 11-24-29 de noviembre; 22-28 de diciembre; 4-18 y 27 de enero; y 12-22 de febrero. Ello significó una aplicación aproximada de 222 mm, equivalente a 2.220 m³/ha.

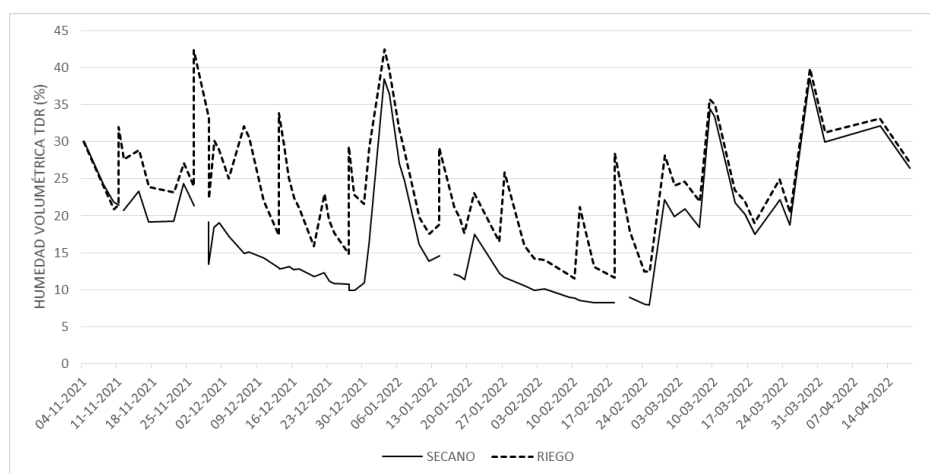


Figura 5.44. Variación de la humedad volumétrica (TDR) de un suelo de la Zona Intermedia de Aysén con una pradera mixta de festuca/ballica/trébol blanco en los primeros 12 cm del perfil (Temporada 2021-22).

Ambas temporadas tuvieron características bastante diferentes en cuanto a la pluviometría, lo que incide obviamente en la recuperación de la humedad del suelo y los riegos deben ajustarse consecuentemente. La temporada 2021-22 tuvo una primavera más seca que en 2022, lo que incide en el crecimiento de las praderas, sobre todo al afectar los meses de noviembre y diciembre, donde habitualmente se acumula la proporción más significativa de forraje de toda la temporada. La temporada 2022-

23 tuvo una mejor primavera y posteriormente un mes de enero seco, pero luego con mejor distribución de lluvias. Los riegos en este sistema productivo se integran como un componente estratégico para evitar los períodos de estrés hídrico estival, fundamentalmente.

La Figura 5.44 muestra los datos obtenidos de mediciones de humedad volumétrica con el instrumento TDR (primeros 12 cm de profundidad). Se aprecian los peaks provocados por los riegos durante el verano, como también de precipitaciones. Sin embargo, da la impresión que los riegos probablemente deban ser más seguidos, ya que igualmente el suelo entra en zonas de estrés hídrico durante algunos períodos.

En la temporada 2022-23 se procuró planificar riegos algo más seguidos y con una menor carga de agua (22 mm vs 27 mm/riego). Sin embargo, esta temporada, si bien existieron diferencias de humedad del suelo en noviembre, ellas no fueron demasiado limitantes y luego diciembre presentó lluvias en gran parte del mes. Hacia fines de diciembre y mediados de enero, se realizaron riegos, que provocaron diferencias en el estatus hídrico del suelo, como también en febrero, donde se lograron diferencias entre ambos tratamientos (Figura 5.45).

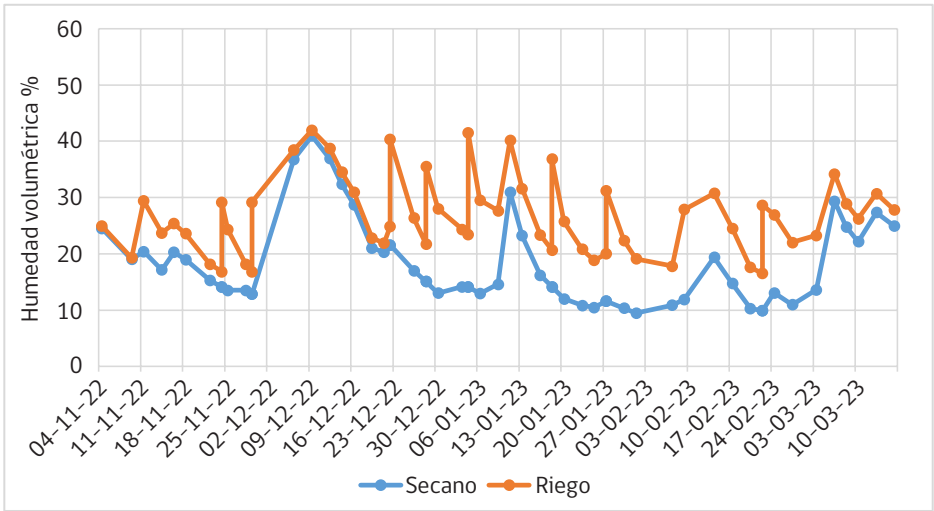


Figura 5.45. Variación de la humedad volumétrica (TDR) de un suelo de la Zona Intermedia de Aysén con una pradera mixta de festuca/ballica/trébol blanco en los primeros 12 cm del perfil (Temporada 2022-23).

Producción de forraje

El Cuadro 5.10 muestra la producción de biomasa registrada en cuatro cortes a través de la temporada 2021–22, expresada en kilogramos de materia seca por hectárea. Hay que considerar que estos cortes son a 5 cm de altura, de modo de no afectar el rebrote y recuperación de la pradera. Al final de la temporada se cortó también el residuo (0–5 cm) de modo de estimar el remanente que queda en la pradera.

Se aprecia que en los primeros dos cortes de la temporada no hay efectos en la producción de forraje, con producciones acumuladas de 2,1 y 2,2 t MS/ha entre la pradera regada y aquella sin riego, respectivamente. Lo anterior debido a que hasta esa fecha aún la humedad del suelo no es tan limitante y que no han ocurrido aún eventos de riego. La mayor diferencia se produce en el tercer corte, que ocurre a mediados de febrero y en pleno período de déficit hídrico. Allí la pradera regada produjo un 145 % más de biomasa que la de secano. Al considerar la temporada completa, se tiene una diferencia de 32 % en producción de materia seca. Esta diferencia es menor a la esperada, pero el monitoreo de humedad incorporado permite explicarlo en el sentido de que en una temporada de estas características se requeriría riegos menos intensos pero más frecuentes, para optimizar el efecto. Durante la temporada siguiente se modificó el protocolo de riego y se monitoreó el suelo para su contenido de humedad (TDR y sensores adicionales). La idea era tratar de mantener la pradera de riego más cercana al rango de capacidad de campo y 50 % de la humedad aprovechable. Sin embargo, la temporada 2022–23 presentó características bastante diferentes a la anterior.

Cuadro 5.10. Disponibilidad de materia seca en pradera mixta sometida a riego versus pradera sin riego (secano). Biomasa cosechada sobre los 5 cm de altura en cuatro ocasiones durante la temporada de crecimiento. Valle Simpson, Zona Intermedia de Aysén. (Temporadas 2021–2022 y 2022–2023).

Festuca mixta	Disponibilidad (kg MS/ha)					Residuo
2021-2022	04-11-2021	06-12-2021	14-02-2022	30-03-2022	30-03-2022	
Riego	942	1.212	1.866	453		2.189
Secano	707	1.537	762	386		1.925
Riego-acum*	942	2.154	4.020	4.473		6.663
Secano-acum*	707	2.243	3.006	3.392		5.316
2022-2023	15-11-2022	20-12-2022	12-01-2023	03-04-2023	03-04-2023	
Riego	2.121	1.828	794	881		2.770
Secano	2.031	1.393	502	402		2.537
Riego-acum*	2.121	3.949	4.743	5.624		8.394
Secano-acum*	2.031	3.424	3.926	4.328		6.865

*Fila va mostrando los valores acumulados, sumando los cortes sucesivos en cada tratamiento.

En la temporada 2022-2023 se obtuvieron mayores niveles de producción que en 2021-2022 (24 % más en riego y 26 % más en seco), producto de la mejor distribución de lluvias en general. En 2022-2023, se llegó a 5,6 t MS/ha con riego y 4,3 t MS/ha en seco (diferencia de 30 %).

Considerando el residuo a nivel de suelo, la pradera regada rindió 6,7 t MS/ha, contra 5,3 t MS/ha de la pradera de seco, es decir un 25 % más (temporada 2021-22). En la temporada 2022-23, la diferencia fue de 8,4 vs 6,8 t MS/ha, o sea un 24 % más con riego, similar en términos totales a la temporada anterior.

Composición botánica de la pradera

Junto con conocer la cantidad de biomasa producida es importante también conocer la composición de la misma. El Cuadro 5.11 muestra la composición de los cortes de biomasa, separándolos en diferentes categorías botánicas. Ambas praderas tienen una proporción elevada de gramíneas, tanto de festuca y ballica perenne (“especies nobles”) como también otras (ej. Poa). La cantidad de trébol blanco, un componente apetecido por su valor nutricional, tiende a ser mayor en la pradera de riego, especialmente en el período seco. Finalmente, la pradera de seco tiende a acumular mayor cantidad de material muerto, senescente y de bajo valor, que se expresa en el último corte.

Cuadro 5.11. Composición botánica de la biomasa cosechada en diferentes fechas en pradera mixta con y sin riego en la Zona Intermedia de Aysén. (Temporada 2021-2022).

Componente	Manejo	14-nov	06-dic	14-feb	30-mar
Gramíneas nobles	Riego	54,4 %	40,9 %	72,4 %	84,0 %
	Secano	43,7 %	36,9 %	83,8 %	72,1 %
Otras gramíneas	Riego	2,7 %	19,9 %	12,7 %	3,1 %
	Secano	5,3 %	30,6 %	8,3 %	2,3 %
Trébol blanco	Riego	7,9 %	17,3 %	7,8 %	4,1 %
	Secano	11,2 %	18,8 %	2,6 %	1,0 %
Malezas	Riego	34,2 %	22,0 %	7,0 %	0,0 %
	Secano	34,3 %	13,7 %	3,7 %	3,4 %
Material Muerto	Riego	0,8 %	0,0 %	0,0 %	8,8 %
	Secano	5,6 %	0,0 %	1,6 %	21,1 %

El Cuadro 5.12 muestra que en la temporada 2022-23 la pradera regada presentó mayores niveles de trébol blanco, una leguminosa importante en la pradera, por su mayor valor nutritivo, como también para mejorar las condiciones de fertilidad del suelo, por su capacidad fijadora de nitrógeno. Sería deseable aumentar el nivel de trébol blanco hasta valores cercanos a 25-30 %, de modo de lograr un mejor equilibrio con las especies gramíneas.

Cuadro 5.12. Composición botánica de la biomasa cosechada en diferentes fechas en pradera mixta con y sin riego en la Zona Intermedia de Aysén. (Temporada 2022-2023).

Fecha	Riego		Secano	
	% Festuca	% T. blanco	% Festuca	% T. blanco
20 Dic	72,5 %	13,1 %	57,3 %	9,0 %
12 ene	68,0 %	18,1 %	77,2 %	4,0 %

Comentario general

En esta zona, en dos temporadas de evaluación, se aprecian diferencias de 25-30 % de mayor producción de biomasa bajo riego, aunque éste aún no está optimizado. Sin embargo, las diferencias indicadas se producen justamente en pleno período estival, en que ello puede ser muy relevante para mantener suficientes recursos de pastoreo en el predio.

La experiencia indicaría que hay que privilegiar una buena reserva de agua al inicio de la temporada de crecimiento (inicios de noviembre) y mantenerla durante la primavera e inicios de verano, ya que en ella ocurre también el crecimiento reproductivo de la pradera, que es cuando se logran las mayores tasas de crecimiento vegetal. Una cosecha temprana de forraje (primera quincena de diciembre) debiera luego permitir un rebrote más activo, manteniendo luego niveles sobre 50 % de humedad aprovechable durante el período estival.

Este nivel de diferencias probablemente en muchos sectores de la Zona Intermedia no justifica económicamente implementar riego, pero pone de manifiesto la importancia de las características de la primavera en cuanto a precipitaciones y acumulación de suficiente humedad en el suelo, para lograr una alta tasa de crecimiento en noviembre-diciembre, meses claves para lograr una adecuada acumulación de forraje para conservación.



Capítulo 6

Uso de sistemas de teledetección en riego de praderas de la Patagonia

Dagoberto Villarroel T., Homero Barría O. y Christian Hepp K.

Introducción

En un escenario global marcado por el cambio climático y la consiguiente presión sobre los recursos naturales, la administración eficiente del agua emerge como una necesidad imperante para salvaguardar tanto la seguridad alimentaria como la sostenibilidad ambiental. En este contexto, las regiones del sur de Chile, particularmente la Patagonia, se encuentra enfrentando desafíos significativos derivados de los efectos del cambio climático, tales como el aumento de las temperaturas medias, la irregularidad y disminución de las precipitaciones y una mayor intensidad de vientos. Si bien el incremento de la temperatura puede generar condiciones favorables para la producción forrajera, la mayor variabilidad y menor cantidad en las precipitaciones, y los vientos más intensos, representan amenazas para el sector ganadero. La viabilidad de los sistemas productivos regionales en este escenario se ve amenazada, con la observación de períodos de déficit hídrico más frecuentes en áreas como la Zona Intermedia y la Zona de Estepa de Aysén.

Frente a esta realidad, la implementación de sistemas de riego se presenta como una solución cada vez más viable para la Región de Aysén. La incorporación de tecnologías modernas de riego, junto con el manejo eficiente del agua, apoyado con uso de sensores y equipos, son de gran importancia para enfrentar esos períodos críticos, en que la disponibilidad de agua en el suelo es insuficiente para sustentar el crecimiento vegetal.

Junto a ello, la aplicación de técnicas de teledetección, mediante el empleo de drones e imágenes satelitales, emerge como una herramienta valiosa para la gestión eficiente de los recursos hídricos, especialmente en el ámbito del riego agrícola. Esta tecnología proporciona información detallada sobre el estado hídrico de los cultivos y los patrones de humedad del suelo a escala predial, permitiendo a los agricultores tomar decisiones fundamentadas y mejorar la gestión del agua en sus explotaciones agropecuarias.

Teledetección

La teledetección es un conjunto de conocimientos y técnicas que se utilizan para determinar características físicas y biológicas de objetos mediante mediciones a distancia, **sin contacto directo** con ellos.

La teledetección se basa en la captura y análisis de datos obtenidos por **sensores remotos**, que pueden ser montados en plataformas terrestres (maquinaria o equipo de campo), aéreas (aeronaves, dron) o satelitales. Estos sensores recopilan información sobre la radiación electromagnética, que es reflejada o emitida por los distintos cuerpos u objetos presentes en la superficie terrestre, en diferentes longitudes de onda, principalmente desde el espectro visible hasta el infrarrojo térmico. Algunos tipos de sensores con los que se puede contar son: cámaras fotográficas, multiespectral, hiperespectral, entre otros. La energía registrada, por estos sensores, es transformada en **imágenes digitales**.

Teledetección satelital

La teledetección con satélites proporciona las imágenes satelitales, la cuales ofrecen una perspectiva global, con una cobertura regular de un área extensa de la superficie terrestre. Dependiendo de su resolución espacial, se puede observar a distintas escalas, desde cuencas que pueden cubrir varias comunas hasta un potrero de una explotación predial, lo que las convierte en herramientas indispensables para el monitoreo y seguimiento de los recursos hídricos y de la vegetación. Estas imágenes pueden proporcionar información sobre la distribución del agua en el suelo, el estado sanitario de la vegetación y otros parámetros relevantes para la gestión del riego.

Hoy en día existe una serie de proveedores de imágenes satelitales. Algunos tienen costo y otras son gratuitas. Entre estas últimas se encuentran las imágenes Landsat, de la agencia espacial estadounidense NASA a través de su portal GLOVIS operado por el USGS (<http://glovis.usgs.gov/>). Por otro lado, están disponibles las imágenes Sentinel 2 (A y B), pertenecientes a la agencia espacial europea (ESA), a través de su portal <https://dataspace.copernicus.eu/browser>.

Por otra parte, existen también plataformas que se abastecen de información satelital para realizar procesos de interés para los agricultores, como la producción de índices vegetacionales o recomendaciones diversas a nivel productivo, por ejemplo, la Plataforma Agrícola Satelital (PLAS) de Chile, que es un sistema de consulta online para obtener información del desarrollo de los cultivos y necesidades de riego en tiempo real.

Estas agencias también ponen a disposición su registro histórico de imágenes. Sin embargo, este tipo de imágenes son afectadas por la presencia de nubosidad. Por lo

que no es siempre factible contar con una serie de imágenes en zonas y épocas del año con presencia frecuente de nubes.

Teledetección con dron

El uso de drones en la agricultura ha revolucionado la forma en que los productores pueden recopilar datos sobre sus cultivos. Su potencialidad en agricultura para captar información viene dada por la resolución espacial y por la disponibilidad temporal de ese dato.

Equipados con cámaras de alta resolución y sensores especializados, los drones pueden obtener imágenes detalladas de los campos agrícolas con una alta precisión. La agricultura utiliza hoy los drones, en el concepto amplio de la agricultura de precisión, que reconoce una variabilidad espacial y temporal en los campos de producción agropecuaria.

Sus usos son múltiples y en base a las imágenes que estos equipos pueden capturar, se pueden obtener una serie de productos, entre estos: identificación de cultivos, seguimiento al desarrollo de los cultivos o estimación de las necesidades de agua. El uso de drones en el monitoreo del riego permite una evaluación rápida y más precisa de las condiciones del suelo y de la vegetación, lo que facilita la toma de decisiones informadas sobre la programación del riego.

Imágenes digitales

Una imagen digital es uno de los principales productos obtenidos de la medición de la radiación electromagnética por los sensores remotos. Esta imagen puede ser interpretada para brindar información sobre un objeto de estudio de interés para un usuario.

Una imagen digital corresponde a una matriz numérica, en la que por una parte contiene los registros de intensidad de radiación reflejada o emitida por el objeto y, por otra parte, información de tipo espacial, expresada en coordenadas X e Y. Las imágenes resultantes tienen diferentes resoluciones dependiendo del sensor utilizado.

Resolución espacial

Se refiere al tamaño del píxel en la imagen digital. Determina el nivel de detalle y los tipos de entidades visibles en la imagen (Figura 6.1). Cuanto más pequeño es el tamaño de píxel, mayor es el detalle contenido en la imagen, pero genera archivos muy grandes que pueden resultar difíciles de procesar, almacenar y administrar.

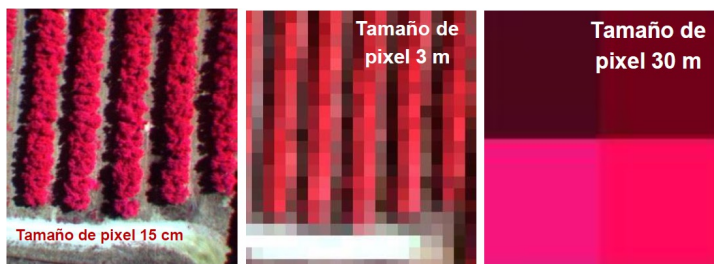


Figura 6.1. Resolución espacial de distintas imágenes.

Resolución radiométrica

Es la capacidad de un sensor para discriminar diferencias en energía (niveles de grises). Una mejor resolución radiométrica significa que el sensor es más sensible a pequeñas diferencias en energía. Cuanto mayor sea este número, más alta será la resolución radiométrica y más nítida la imagen. Se expresa normalmente en bits.

- Sensor 12 bits, 4.096 niveles: Landsat 8 - Sentinel 2
- Sensor 8-bits, 256 niveles: Landsat 7

Resolución espectral

Se refiere al número de bandas, las longitudes de onda y la anchura espectral de las bandas que puede discriminar el sensor. La resolución espectral hace referencia a la capacidad del sensor para medir la firma espectral de las distintas cubiertas. Un mayor número de bandas facilita la caracterización espectral (Figura 6.2).

Banda	Sentinel 2	Banda	Landsat 8
Banda 1 Aerosol	0,43-0,45	Banda 1 Aerosol	0,43-0,45
Banda 2 Azul	0,45-0,52	Banda 2 Azul	0,45-0,51
Banda 3 Verde	0,54-0,57	Banda 3 Verde	0,53-0,59
Banda 4 Rojo	0,65-0,68	Banda 4 Rojo	0,64-0,67
Banda 5 Red Edge 1	0,69-0,71	Banda 5 NIR 1	0,585-0,88
Banda 6 Red Edge 2	0,73-0,74	Banda 6 SWIR 1	1,57-1,65
Banda 7 Red Edge 3	0,77-0,79	Banda 7 SWIR 2	2,11-2,29
Banda 8 NIR 1	0,78-0,9	Banda 8 Pancromatica	0,5-0,68
Banda 8A NIR 2	0,85-0,87	Banda 9 Cirrus	1,36-1,38
Banda 9 Vapor Agua	0,93-0,95	Banda 10 TIRS 1	10,6-11,19
Banda 10 Cirrus	1,36-1,39	Banda 11 TIRS 2	11,5-12,51
Banda 11 SWIR 1	1,56-1,56		
Banda 12 SWIR 2	2,1-2,28		

Figura 6.2. Resolución espectral de imagen satelital: Sentinel 2 y Landsat 8.

Resolución temporal

Está referida al intervalo de tiempo entre pasadas del sensor sobre la misma área en terreno.

- Landsat 8: 16 días
- Sentinel 2: 10 días

Los datos obtenidos de la teledetección requieren algunos procesamientos, de manera de proporcionar información que sea utilizable por los usuarios. Estos procesamientos incluyen: preprocesamiento (correcciones radiométricas, atmosféricas y geométricas); realces espectrales (ej. combinación de color, índices de vegetación), que mejoran la calidad visual de las imágenes facilitando su análisis y; clasificación, que es la generación de mapas temáticos en base a reconocimiento de patrones.

Índices de vegetación

Los Índices de Vegetación (IV), son combinaciones de bandas de diferentes longitudes de onda, registradas por los sensores, cuya función es realzar la respuesta espectral de la cubierta vegetal y atenuar los detalles de otros componentes no vegetacionales, como el suelo, en una misma escena registrada. Las bandas más utilizadas son la banda del rojo (R) y la del infrarrojo cercano (IRC). La vegetación verde y saludable, presenta una reflexión considerablemente elevada en IRC y una baja reflexión en el R, además el suelo presenta un comportamiento espectral diferente en dichas zonas espectrales. Los índices vegetacionales son utilizados como una forma indirecta de estimar variables biofísicas de la vegetación (ej. Índice de área foliar, cobertura de la vegetación, fracción de la radiación fotosintéticamente activa) y tienen bastante utilidad, entre otros, en el monitoreo de la sanidad vegetal, desarrollo de los cultivos, detección de cambios ambientales, y la evaluación de estrés causados por deficiencias hídricas, nutricionales, plagas o enfermedades.

En la literatura existen muchos IV, donde uno de los más usados y conocidos es el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

El NDVI es un índice ampliamente utilizado en la teledetección agrícola para evaluar la salud y el vigor de la vegetación. Este índice se calcula utilizando la diferencia entre la reflectancia de la luz infrarroja y roja (ecuación 1). Es muy simple de calcular y dispone de un rango entre -1 y 1, lo que proporciona una medida de la cantidad y calidad de la vegetación presente en un área determinada. Un NDVI alto indica una

vegetación densa y saludable, mientras que valores bajos pueden indicar estrés hídrico, o daños por plagas y enfermedades.

En la agricultura de riego, el NDVI se utiliza para monitorear el estrés hídrico de los cultivos y para evaluar la eficacia de las prácticas de riego en la mejora del crecimiento y desarrollo de las plantas. Al analizar los cambios en el NDVI a lo largo del tiempo (Figura 6.3), los agricultores pueden identificar áreas de estrés hídrico, calcular la cantidad de agua requerida y ajustar los planes de riego en consecuencia.

$$NDVI = (IRC - R) / (IRC + R) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde

IRC es banda del infrarrojo cercano

R es banda del rojo

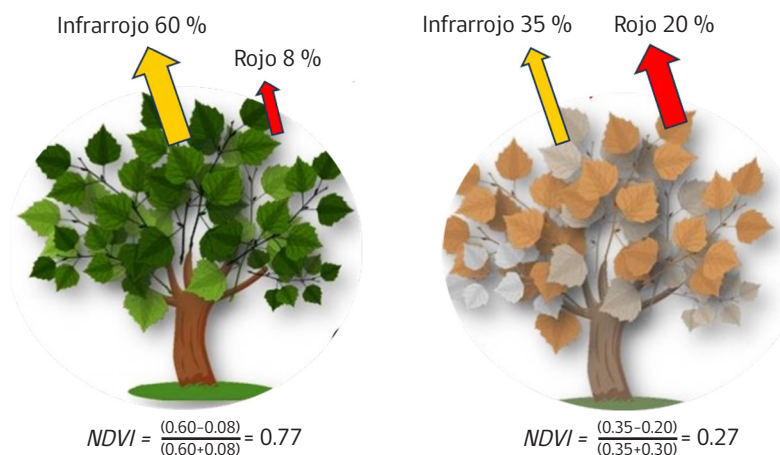


Figura 6.3. Ejemplo de cálculo NDVI. Izq. Vegetación Sana. Der. Vegetación Madura o con estrés.

Aplicaciones de la teledetección en el sector agropecuario

Existe una amplia gama de usos en que la teledetección puede apoyar al sector agropecuario, como:

- Monitoreo de la salud vegetal: el uso de imágenes satelitales y de drones, permite monitorear la salud y el vigor de la vegetación, incluidos bosques, cultivos agrícolas, pastizales y áreas naturales, proporcionando información sobre la cantidad y la calidad de la vegetación presente, como también indicar

áreas del predio que estén bajo condiciones de estrés, ya sea por falta de nutrientes, enfermedades o plagas.

- Seguimiento de cultivos: es posible observar la dinámica de la vegetación a lo largo de la temporada de crecimiento, permitiendo contar con información del ciclo fenológico de los cultivos, como también con series temporales.
- Detección de cambios en la cobertura vegetal: es factible detectar cambios en la cobertura vegetal a lo largo del tiempo, lo que permite realizar análisis de cambio de uso del suelo, deforestación, reforestación, impactos ambientales y cambios en la distribución de la vegetación.
- Identificación y gestión de la variabilidad espacial (cultivos, suelo): la teledetección permite identificar zonas del campo donde los cultivos tengan un desarrollo diferente del resto o con diferentes características del suelo. Con esta información, los agricultores pueden adoptar prácticas de manejo específicas para cada zona, como la siembra variable o la fertilización diferencial.
- Evaluación de la sequía: el NDVI puede utilizarse como indicador de sequía, ya que la disminución en los valores de este índice puede indicar estrés hídrico en la vegetación. Esto es útil para monitorear y prevenir sequías, así como para evaluar su impacto en la agricultura y los ecosistemas naturales.
- Optimización del riego: utilizando datos sobre la humedad del suelo y la evapotranspiración de la planta, se puede optimizar la aplicación de agua a través de sistemas de riego, contribuyendo a su uso eficiente y maximizando el rendimiento del cultivo al aplicar el agua de manera precisa y oportuna.
- Eficiencia/Uniformidad de Riego: la eficiencia y la uniformidad de riego son aspectos críticos para maximizar el rendimiento de los cultivos y para conservar los recursos hídricos. Los sistemas de teledetección proporcionan herramientas poderosas para evaluar y mejorar estos parámetros. Mediante el análisis de imágenes térmicas y de la distribución del NDVI, los agricultores pueden identificar áreas con deficiencias o excesos de riego y ajustar la programación del riego en consecuencia. Además, la monitorización de la humedad del suelo en tiempo real permite una gestión precisa y adaptativa de los recursos hídricos, optimizando así su uso y reduciendo el riesgo de estrés hídrico.

Estimación de las necesidades hídricas

Para realizar una adecuada gestión del riego, se requiere conocer o estimar las demandas hídricas de los cultivos y la adecuación de los volúmenes de riego a las mismas para conseguir la mayor eficiencia en uso del agua. Para ello se consideran las características específicas de manejo de cada cultivo, los aportes por precipitación y el contenido de agua en la capa de suelo explorado por las raíces.

Aproximación por metodología Kc-ETo

Se conoce como evapotranspiración (ET) la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y, por otra parte, mediante transpiración del cultivo.

Para la estimación de las necesidades de agua de la cubierta vegetal, FAO en su Manual N°56 (Allen et al., 1998), describe la metodología conocida como Coeficiente de cultivo - Evapotranspiración de referencia (Kc-ETo).

La evapotranspiración del cultivo (ETc) representa las necesidades de agua por parte de éste. El procedimiento lo considera como el producto de dos factores: a) la evapotranspiración de referencia (ETo), que corresponde a la demanda evaporativa de la atmósfera, y que contempla parámetros meteorológicos como la radiación, la temperatura, velocidad del viento y la sequedad del aire, y b) un coeficiente de cultivo, Kc, que indica el estado de desarrollo de un cultivo frente a aquella cubierta que se considera de referencia, como festuca o alfalfa.

La formulación más avanzada del procedimiento FAO56 incorpora el denominado coeficiente de cultivo "dual" (Wright, 1982), el cual divide al Kc en dos componentes separados, el coeficiente de cultivo basal, Kcb (transpiración de una cubierta en ausencia de estrés) y un coeficiente evaporativo, Ke, que recoge la evaporación desde el suelo desnudo.

Así, la estimación de la ETc, para cultivos en ausencia de estrés hídrico, se realiza mediante las siguientes ecuaciones, usando el coeficiente único y dual, respectivamente:

$$ETc = Kc * ETo \quad \text{(Ecuación 2)}$$

$$ETc = (Kcb + Ke) * ETo \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Donde:

ETc: evapotranspiración del cultivo (mm día⁻¹)

ETo: evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹)

Kc: coeficiente de cultivo único

Kcb: coeficiente basal del cultivo o coeficiente de transpiración

Ke: coeficiente de evaporación

La ETo se puede obtener de estaciones meteorológicas automáticas, que registran las variables meteorológicas y entregan valores calculados en forma permanente. El Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), cuenta con una red de estaciones agrometeorológicas a lo largo del país, con información públicamente disponible (<https://agrometeorologia.cl/>). El procedimiento del coeficiente dual del cultivo es más complicado y requiere de más cálculos que el procedimiento del coeficiente único del

cultivo, donde la estimación del K_c requiere conocer el balance de agua en el suelo. Si bien es cierto, hoy se encuentran tabulados valores típicos de K_c y K_{cb} para numerosos cultivos, sin embargo, los coeficientes de literatura no siempre pueden ser aplicados a las condiciones locales, lo cual induce errores en la estimación de la ET, además de que no consideran la variabilidad espacial dentro de un cultivo.

Aproximación por metodología K_c - E_{To} basada en teledetección

Con la metodología K_c - E_{To} basada en teledetección, lo que se hace es derivar el valor del coeficiente de cultivo desde las imágenes multiespectrales adquiridas por sensores a bordo de plataformas espaciales, aerotransportadas o en tierra (Calera et al., 2005).

A nivel mundial, existe gran cantidad de literatura científica, donde se presenta la buena relación lineal existente entre el coeficiente de cultivo basal de una cubierta y los índices de vegetación, especialmente el NDVI. Como se ha indicado anteriormente, el NDVI es un índice de fácil cálculo, que relaciona el tamaño fotosintético y el desarrollo de un cultivo y, por otra parte, es posible contar con series temporales de imágenes satelitales gratuitas, de las cuales se puede obtener valores de NDVI para las cubiertas vegetales.

Para la estimación del K_c en praderas, se propone la ecuación obtenida por Cuesta et al. (2005), que relaciona el coeficiente de cultivo y el NDVI (Ecuación 4), que ha sido ampliamente validada en cultivos herbáceos que en su fase de máximo desarrollo alcanzan cobertura completa, suponiendo un manejo estándar para sistemas de riego como aspersión y pivote.

$$K_c = 1,25 * NDVI + 0,2 \quad \text{(Ecuación 4)}$$

Donde:

K_c : coeficiente del cultivo

NDVI: Índice de Vegetación por Diferencias Normalizado, obtenido desde imágenes de satélite corregidas atmosféricamente y normalizado a las bandas espectrales Landsat.

Por lo tanto, el cálculo de la E_{Tc} , basada en teledetección, para una cubierta en ausencia de estrés, se obtiene:

$$E_{Tc} = (1,25 * NDVI + 0,2) * E_{To} \quad \text{(Ecuación 5)}$$

Donde

E_{Tc} : evapotranspiración del cultivo (mm día^{-1})

NDVI: Índice de Vegetación por Diferencias Normalizado, obtenido desde imágenes de satélite corregidas atmosféricamente y normalizado a las bandas espectrales Landsat.

E_{To} : evapotranspiración de referencia (mm día^{-1})

La ecuación 5 proporciona las necesidades netas de agua, a las que, descontando la precipitación efectiva, estima las necesidades netas de agua de riego. La determinación de las necesidades brutas de riego requiere del conocimiento de la eficiencia del sistema de riego, que recoge las características del sistema de riego utilizado y su manejo.

El NDVI de la ecuación 5 fue obtenido desde imágenes Landsat, pero dado que hoy se tiene imágenes Sentinel 2, la integración entre múltiples sensores es indispensable para el uso complementario de imágenes de diferentes satélites en la obtención de series temporales de índices de vegetación. En ese sentido, se incluye la relación obtenida por Tello et al. (2017), para la relación de NDVI derivada de imágenes Landsat 8 y Sentinel 2 (Ecuación 6).

$$\text{NDVI L8} = 0,9589 * \text{NDVI S2} + 0,0674 \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde

NDVI L8: Índice de Vegetación por Diferencias Normalizado, obtenido desde imágenes de satélite corregidas atmosféricamente y normalizado a las bandas espectrales Landsat 8

NDVI S2: Índice de Vegetación por Diferencias Normalizado, obtenido desde imágenes de satélite corregidas atmosféricamente y normalizado a las bandas espectrales Sentinel 2.

Ejemplos y resultados locales

Estimación de necesidades hídricas en praderas, asistida con imágenes

Ubicación del sitio

El INIA se encuentra desarrollando el proyecto “Bases técnicas y económicas para la toma de decisiones en el uso eficiente y estratégico del riego en praderas y cultivo forrajeros, para mejorar la competitividad y sustentabilidad de la ganadería bovina de Aysén”, financiado por Innova Corfo. En el contexto de ese proyecto se implementó un **módulo de evaluación y demostración permanente de tecnologías de riego** en praderas. En este módulo, ubicado en Valle Simpson, comuna de Coyhaique, Zona Intermedia de Aysén, se estableció una parcela experimental de 0,7 ha, teniendo como cubierta una pradera naturalizada fertilizada, sobre la cual se ha hecho seguimiento del NDVI.

Adquisición de imágenes

Con el objeto de tener una referencia de los valores de NDVI y estimación de la ETc, se realizó la búsqueda de una serie temporal de imágenes Sentinel 2, en fechas donde las condiciones climáticas permiten la captura de dicha imagen (sin nubosidad). La

búsqueda fue apoyada con la plataforma Auravant, en su versión gratuita (<https://auraview.auravant.com/main.php>). (Figura 6.4).



Figura 6.4. Vista de parcela experimental riego en praderas. Plataforma Auravant, versión gratuita.

Estimación de ETC

Para la estimación de la ETC, se aplicó la metodología Kc-ET_o basada en teledetección, ocupando las ecuaciones 5 y 6, anteriormente mencionadas. Para el cálculo de las necesidades brutas de riego, dado que el ensayo estaba siendo regado con un sistema de aspersión K-line, la ETC se dividió considerando una eficiencia de riego del 70 %.

$$\text{ETc: } (1,25 * \text{NDVI} + 0,2) * \text{ETo} \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$\text{NDVI L8} = 0,9589 * \text{NDVI S2} + 0.0674 \quad (\text{Ecuación 6})$$

La obtención de ET_o se hizo mediante la descarga de información proporcionada por la estación meteorológica ubicada en INIA Tamel Aike, Coyhaique, latitud: -45.75, longitud: -72.06, elevación: 470 m (<https://agrometeorologia.cl>; Figura 6.5).

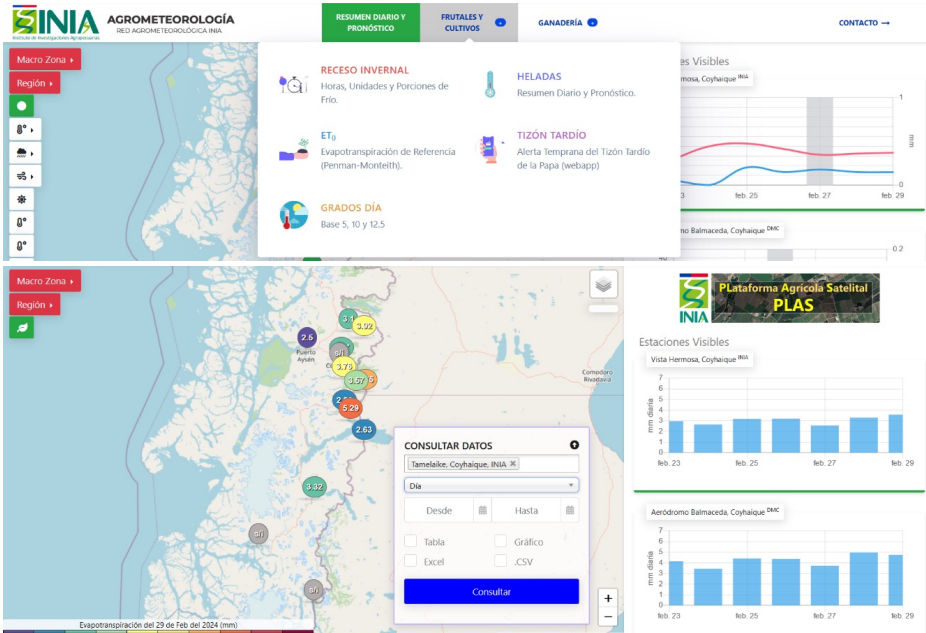


Figura 6.5. Vista de Plataforma Agrometeorología de INIA. ETo y consulta de datos.

Ejemplo de aplicación de cálculos requerimientos hídricos

En la Figura 6.6 se presenta la evolución del NDVI, derivada de imágenes satelitales, para una pradera naturalizada fertilizada de la Región de Aysén, entre los meses de septiembre y marzo. Se aprecia que los valores más altos de NDVI se presentan, en general, entre los meses de octubre y noviembre (como promedio de las temporadas de 0,77 y 0,80, respectivamente), que coincide con la época en que las praderas están en activo crecimiento vegetativo. En la temporada 23-24, se observa que fue en diciembre donde se obtuvieron los mayores NDVI, lo cual se debió a las condiciones climáticas del periodo, con una primavera más fría de lo normal, retrasándose así el inicio de crecimiento significativo de las praderas.

A partir de diciembre, los valores de NDVI comienzan bajar, lo que puede ser producto de los manejos de pastoreo como también de cortes para conservación de forraje. Los menores valores de NDVI se presentan en febrero (promedio de 0,53), lo cual puede ser producto de las temperaturas más elevadas y escasas precipitaciones, lo que hace que la recuperación de las praderas sea más lenta.

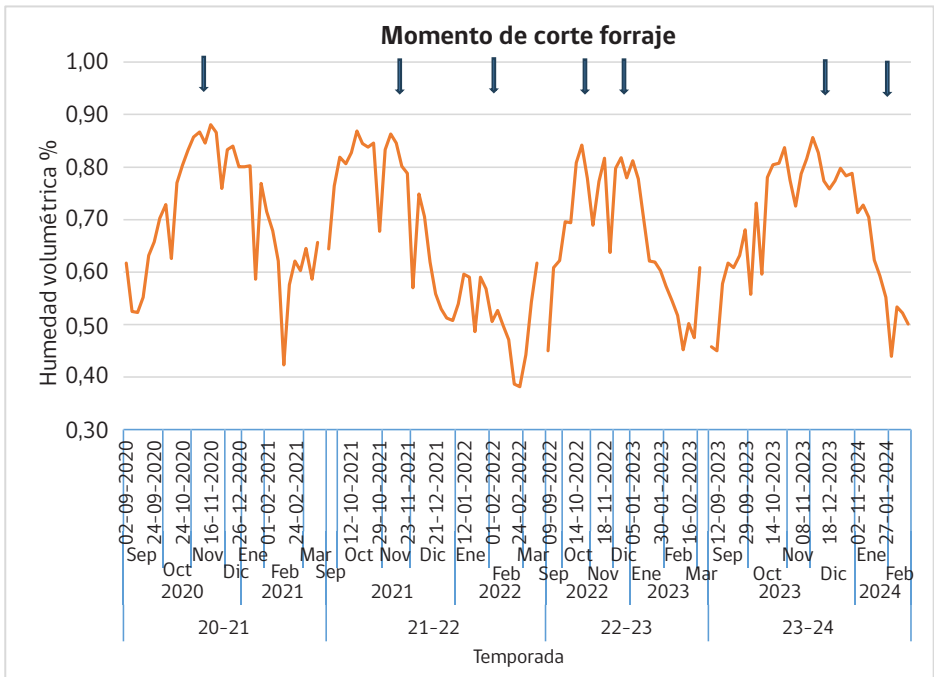


Figura 6.6. Evolución de NDVI para una pradera fertilizada de la Zona Intermedia de la Región de Aysén.

En lo referente al Kc, se observa que sigue una dinámica parecida al NDVI, lo cual es lo esperable, ya que en esta metodología, el Kc se deriva del NDVI (Figura 6.7). El Kc se mueve en un rango promedio de las temporadas, entre 0,85 para el mes de febrero y 1,24 para el mes de noviembre. En FAO 56, se entregan valores de Kc medio, para praderas con pastoreos en rotación entre 0,85 y 1,05.

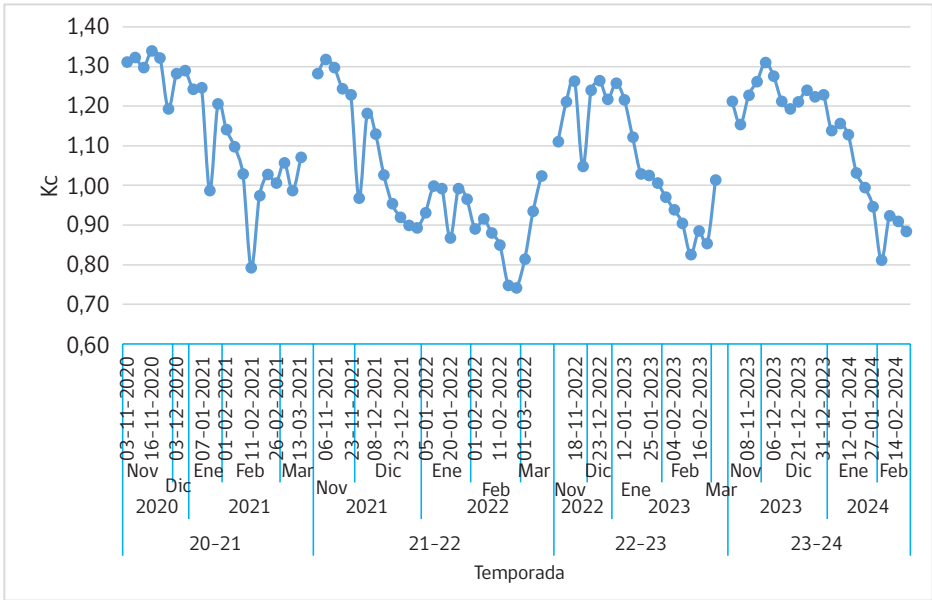


Figura 6.7. Evolución del Kc para pradera naturalizada fertilizada de la Región de Aysén.

Necesidades de agua

Las necesidades netas de agua (mm día^{-1}) y las necesidades brutas, considerando una eficiencia del 70 % del riego, se presentan en la Figura 6.8. Las necesidades de agua neta, promedio de las temporadas, son mayores en diciembre y enero ($6,07$ y $5,49 \text{ mm/día}$), siendo marzo el mes de menor demanda ($4,20 \text{ mm}$). Se observa, además, que dependiendo de las condiciones climáticas, hay ocasiones en que la demanda de agua neta supera los 8 mm/día , especialmente en diciembre, seguido de algunos eventos en enero y febrero.

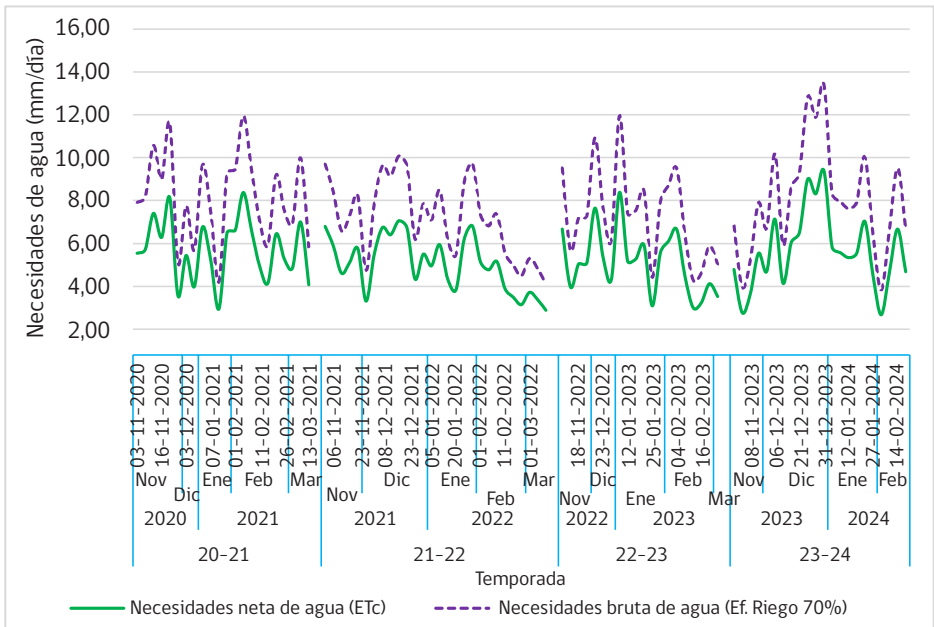


Figura 6.8. Necesidades de agua para una pradera naturalizada fertilizada de la Región de Aysén.

Experiencia de uso de drones en el manejo del riego para praderas

En la Región de Los Lagos, con productores cooperados de la empresa láctea COLUN, durante el desarrollo del proyecto PDT, financiado por CORFO, se utilizó un dron marca DJI modelo Phantom 4 Multiespectral (P4M), especialmente diseñado para su uso en agricultura. Su cámara multiespectral cuenta con seis cámaras o sensores, que registran datos en las bandas RGB, Azul, Verde, Rojo, Borde Rojo e Infrarrojo Cercano, que además permite visualizar NDVI directamente mientras vuela (Figura 6.9).

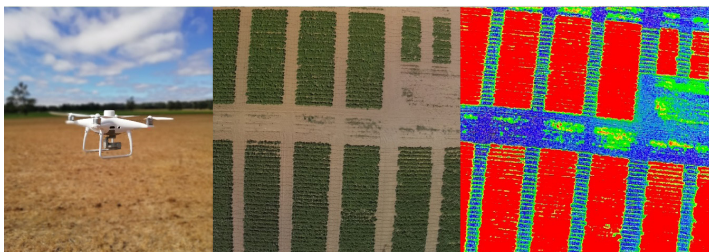


Figura 6.9. Ejemplo de imagen, RGB y NDVI, capturada con dron Phantom 4 multiespectral.

Se realizaron diversos vuelos para recopilar información de tres predios, con praderas bajo riego. En estos predios, se definieron zonas de riego y seco, con el objeto de determinar diferencias entre estas zonas y también al interior de cada zona de riego. Cada zona de riego y seco estaba siendo monitoreada además con sensores de humedad, temperatura y conductividad eléctrica de suelo instalados a 10 y 40 cm de profundidad. Complementariamente, hubo un registro de parámetros climáticos en línea y muestreo de suelo para conocer la tensión del agua en el suelo.

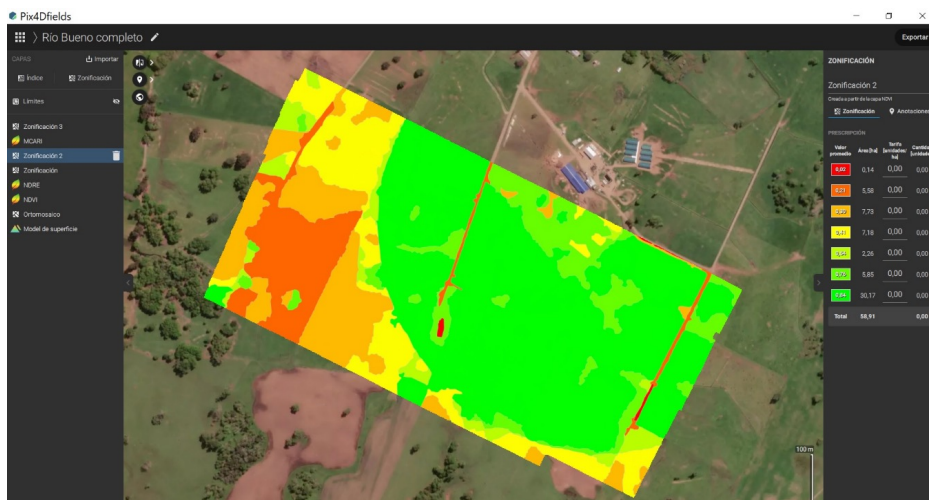


Figura 6.10. Mapa de NDVI, de imágenes de dron, de pradera regada con sistema de Pivote Central.

Luego de la captura de imágenes, se realizó el procesamiento y se obtuvo mapas con curvas de nivel y diferentes índices vegetacionales (Figura 6.10).

Los resultados obtenidos en los diferentes predios, permitieron conocer el déficit hídrico, la uniformidad del riego, el vigor de la pradera, la presencia de equipos de riego con problemas (Figura 6.11), y potenciales causas de una deficiente uniformidad (topografía, variabilidad espacial de suelo), todo lo anterior, apoyado por datos complementarios de otros sensores.

La experiencia obtenida con el uso de este dron, indica que la etapa de procesamiento de las imágenes es un punto altamente crítico. Involucra mucho tiempo en el procesamiento de un gran número de datos, requiriendo un equipo computacional adecuado y el uso de software especializado.

Las imágenes de NDVI obtenidas con el dron, mostraron una clara correlación ($r^2 = 0,66$) con los datos de tensión de humedad del suelo obtenidos con el medidor de potencial

hídrico WP4C. Esto permite proyectar el uso de drones para evaluar la condición de humedad del suelo en sistemas de riego en praderas y complementar la información que aportan los sensores de humedad ubicados en el potrero de riego.



Figura 6.11. Mapa de NDVI, indicando problemas de uniformidad de riego de sistema de Carrete.

Adicionalmente, en la evaluación de la distribución de riego en un sistema de tazas de riego, se pudo detectar que los aspersores no lograban un óptimo traslape, al utilizar las imágenes NDVI y verificando la pluviometría en las líneas. Esto fue confirmado por el productor, quien determinó que su sistema de captación, conducción y distribución tenía presencia de algas, que obstruyeron los emisores, los que estaban operando deficientemente.

Comentarios

Como resumen, se puede señalar que en el uso de teledetección como apoyo al riego, se debe propender a un uso conjunto entre drones y satélites, donde estos últimos permiten un monitoreo continuo de los cultivos, abarcando gran superficie. Para ello, existen imágenes gratuitas (Landsat, Sentinel), con adecuada resolución temporal y espacial, además de una biblioteca histórica de imágenes, aunque hay limitaciones producto de la nubosidad.

Por su parte, el uso de drones, podría ser para un uso más estratégico, ya que pueden cubrir áreas mayores en poco tiempo, en comparación a inspecciones manuales, proporcionar imágenes de alta resolución, datos en tiempo real y acceder a áreas de

difícil acceso, facilitando el monitoreo y la programación de riego eficiente, y evitar un uso de agua excesivo o insuficiente. Esto puede resultar en ahorros significativos de recursos hídricos y financieros.

Por otra parte, es importante la combinación de datos de sensores de humedad en el suelo con la información recopilada por las imágenes satelitales o de drones, lo que permitiría a los productores lograr una mejor comprensión de la humedad del suelo e identificar zonas que necesitan más o menos agua y ajustar el riego en consecuencia, para mantener condiciones óptimas para el crecimiento de las plantas.

El uso masivo de drones en el riego de praderas en Chile puede ser gradual, pero cuenta con un potencial considerable. Si bien la tecnología de drones ha avanzado significativamente en términos de accesibilidad y facilidad de uso, todavía hay desafíos en términos de adopción tecnológica, que podrían depender de varios otros factores, como ser: la disponibilidad de tecnología, la capacitación de los productores, la inversión en infraestructura de riego, mayor número de empresas prestadoras de servicios, las políticas de apoyo gubernamentales y la aceptación de nuevas prácticas agrícolas. Se espera que el uso de drones continúe evolucionando con el tiempo, donde los avances en la tecnología de sensores, la autonomía de vuelo y la capacidad de análisis de datos, permitirán obtener información aún más detallada y precisa sobre las condiciones hídricas en las praderas.

Finalmente, es importante recalcar que el uso imágenes satelitales y de drones para el monitoreo hídrico de cultivos, permite ocupar técnicas y herramientas para mejorar la toma de decisiones, hacerlas más eficientes, certeras y documentadas. Esta tecnología está para ayudar a productores, profesionales, asesores, pero no para reemplazarlos, por lo que se deben mantener las visitas a campo, de modo de explicar las diferencias observadas en imágenes con lo que efectivamente está ocurriendo en el campo. En su conjunto, se puede llegar así a orientar adecuadamente las decisiones de manejo relacionadas con el riego.

Capítulo 7

Evaluación técnico-económica de sistemas de riego para Aysén

Estudio de casos

Villarroel T. y Christian Hepp K.

Introducción

La Región de Aysén, situada en el sur de Chile, presenta una fuerte concentración en el crecimiento de sus praderas, el que ocurre mayormente entre los meses de octubre y marzo. Este patrón estacional, particularmente en la Zona Intermedia y de Estepa de Aysén, implica la necesidad imperiosa de contar con forraje conservado para afrontar el prolongado período crítico de otoño e invierno. Por ello, es fundamental disponer de recursos forrajeros de alta producción en los mejores suelos de los predios, que permitan la conservación de la mayor cantidad de biomasa posible y con un valor nutritivo adecuado para los requerimientos animales.

La estacionalidad en la producción de las praderas está influenciada por diversos factores, destacando la temperatura y la precipitación como los más relevantes. Esta variabilidad climática puede provocar déficits hídricos estacionales significativos, especialmente entre noviembre y marzo en la Zona Intermedia, e incluso períodos más prolongados en la Zona de Estepa (septiembre a mayo). La ocurrencia de escenarios críticos, como el observado en la temporada 2015-2016, pueden llegar a comprometer gravemente la producción forrajera, su calidad y distribución, poniendo en riesgo los sistemas ganaderos en su conjunto.

Por otra parte, los sistemas ganaderos bovinos en la Patagonia también se ven afectados por la estacionalidad, con la obtención de novillos gordos, tradicionalmente concentrada a finales de verano y principios de otoño. Esta concentración limita la capacidad de abastecimiento del mercado a un espacio acotado de tiempo, especialmente para plantas de faenamiento y exportación. Por ende, es crucial desarrollar y validar sistemas productivos que rompan con esta estacionalidad, sustentados en una producción forrajera abundante y nutritiva, ya sea mediante pastoreo directo o conservación de forraje y que incluya tecnologías para prevenir y/o disminuir las incertidumbres ligadas al régimen pluviométrico.

En este contexto, el riego se posiciona como una herramienta viable para reducir la estacionalidad y variabilidad en la producción forrajera, sobre todo en periodos

de escasez hídrica. Aunque en la Región de Aysén existe experiencia con algunos sistemas de riego en praderas, su uso no ha sido masivo, donde además, la eficiencia en su utilización es limitada debido a la escasez de información técnica y económica. La falta de datos precisos sobre las características del suelo, los parámetros de riego y los sistemas más adecuados constituye un obstáculo para una gestión eficiente del agua a nivel predial. Por lo tanto, imperativo abordar esta carencia de información para maximizar el impacto del riego en la producción ganadera regional. Este desafío ha sido enfrentado en años recientes a través de proyectos ligados a la temática hídrica.

Este capítulo tiene como objeto entregar una aproximación para un análisis económico de sistemas de riego propuestos para la Región de Aysén, mediante el estudio de casos.

Metodología

Para la evaluación económica, se consideró lo siguiente:

Sistemas de riego

- a) Sistema de riego pivote central, tomado de experiencias e información recolectada en sectores transicionales y de Estepa. En este caso se consideró sistemas con bombeo mecánico y también gravitacional.
- b) Sistema de riego por taza (K-line): implementado en sector Santa Elena, Valle Simpson. Predio de INIA Tamel Aike.
- c) Sistema de riego por carrete: emulando un sistema, con información proporcionada por INDAP y CNR.

Tipo de evaluación económica

La evaluación económica realizada es de tipo incremental, considerando sólo aquellos costos e ingresos que varían en las distintas alternativas, con un horizonte de 10 años.

Zonas agroecológicas y condiciones climáticas

Se consideró dos zonas agroclimáticas de la Región de Aysén, Zona Intermedia y Zona de Estepa, para dos estaciones del año (primavera y verano) y cuatro condiciones climáticas, primavera normal-verano normal, primavera fría-verano normal, primavera normal-verano seco y primavera fría-verano seco.

Levantamiento de información

Para la recopilación y levantamiento de la información técnica-económica, se levantó información a través de estudios de caso a productores con sistemas de riego en funcionamiento. En esa instancia se consultó sobre identificación general, superficie, preparación de proyecto de riego, labores de habilitación de suelos, datos del sistema de riego y producción de forrajes.

Para la producción de forraje, en base a experiencias y juicio experto del INIA Tamel Aike, se calculó la producción incremental (materia seca), transitando desde una condición de secano a otra de riego. Para ello se contempló la producción entre los meses de octubre a marzo, para cuatro praderas/cultivos factibles de ser regados en estas zonas: pradera mixta sembrada, alfalfa, brásica (ej. raps, nabo forrajero) para pastoreo y cereales para conservación (avena, cebada, trigo, triticale).



Figura 7.1 Zona Intermedia. Producción de forraje de una pradera sembrada. Ejemplo, para el caso de pradera sembrada con una temporada normal vs una con verano seco para distintos cultivos, bajo condiciones de riego (secano y riego).

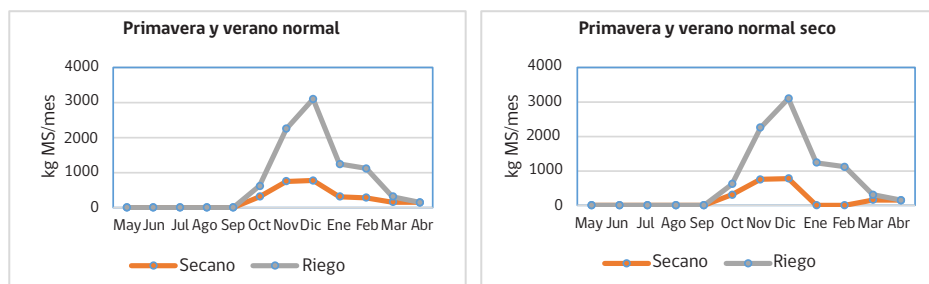


Figura 7.2. Zona Estepa. Producción de forraje de una pradera sembrada. Ejemplo, para el caso de pradera sembrada con una temporada normal vs una con verano seco para distintos cultivos, bajo condiciones de riego (secano y riego).

Ejemplos de las producciones de materia seca factibles de obtener en estos cultivos bajo diferentes características de las estaciones de primavera y verano se presentan en las Figuras 7.1 y 7.2. Las curvas de crecimiento para todas las combinaciones, en ambas zonas agroclimáticas, se presentan en el anexo de este capítulo.

Supuestos utilizados para la evaluación económica

Los supuestos considerados para el análisis incremental fueron los siguientes:

1. Sistema Productivo			
a)	Zona Geográfica	Intermedia	Estepa
b)	Primavera	Normal	Fría
c)	Verano	Normal	Seco

2. Cultivo	Costo Fertilización de Mantenición (\$/ha)	Costo Establecimiento (\$/ha)	Nivel de producción (kg MS/ha)							
			Prim. Normal-Ver. Normal		Prim. Normal-Ver. Seco		Prim. Fría-Ver. Normal		Prim. Fría-Ver. Seco	
			Secano	Riego	Secano	Riego	Secano	Riego	Secano	Riego
Pradera Sembrada (PS)	318.254	987.183	7.120	10.254	4.715	10.254	4.990	8.104	3.205	8.104
Alfalfa conservación	351.330	954.745	8.780	11.740	6.995	11.740	7.120	9.795	5.335	9.795
Brásica (Pastoreo)		892.164	8.340	11.609	4.095	11.609	6.490	9.174	3.175	9.234
Cereal para conservación		925.724	9.860	12.704	6.540	12.704	7.815	11.156	5.425	11.156

Zona intermedia	Costo Fertilización de Mantenición (\$/ha)	Costo Establecimiento (\$/ha)	Nivel de producción (kg MS/ha)							
			Prim. Normal-Ver. Normal		Prim. Normal-Ver. Seco		Prim. Fría-Ver. Normal		Prim. Fría-Ver. Seco	
			Secano	Riego	Secano	Riego	Secano	Riego	Secano	Riego
Pradera Sembrada (PS)	318.254	1.250.938	2.730	8.790	2.140	8.790	1.970	7.120	1.380	7.120
Alfalfa conservación	351.330	1.320.250	3.935	12.445	3.175	12.445	3.030	9.298	2.425	9.298
Brásica (Pastoreo)		1.233.441	3.640	10.808	2.755	10.808	3.030	9.128	2.145	9.128
Cereal para conservación		1.305.114	4.410	11.018	3.510	11.018	3.340	9.508	2.750	9.508

3. Conservación (Heno Bolos)		
a)	Peso Bolo (kg)	300
b)	% MS	85

4. Conversión kg MS: kg Carne	12
-------------------------------	----

5. Costo Conservación-Heno Bolos (\$/bolo)	15.000
--	--------

6. Precio Venta Carne (\$/kg)	1.500
--------------------------------------	-------

7. Precio Venta Bolo (\$/bolo)	70000
---------------------------------------	-------

8)	Sistema de Riego	Pivote	Pivote	Carrete	Taza
a)	Fuente de energía	diesel	gravitacional	diesel	gravitacional
b)	Inversiones				
	Riego (equipos+materiales+estudio técnico)	126.829.287	128.000.000	65.000.000	2.200.000
	Servicios (habilitación de suelo, destronques, otros)	21.000.000	17.200.000		600.000
c)	Costos anuales (\$/ha)				
	Costo fijos+costo mantención +costo operación	573.781	504.663	333.708	373.000
d)	Depreciación de equipo riego	10 años	10 años	10 años	10 años
e)	Superficie a regar (ha)	60	60	40	2

9. Subsidio al riego	70 %
-----------------------------	------

3. Conservación (Heno Bolos)	
a)	Valor actual Neto (VAN)
b)	Tasa Interna de Retorno (TIR)
c)	Tasa descuento 12 %
d)	Moneda: pesos de diciembre 2023

Análisis económico

El cálculo de los flujos netos del análisis incremental, considerando los supuestos mencionados anteriormente para cada caso, se presenta solamente para los casos en que el VAN fue positivo.

Zona Intermedia

Para la Zona Intermedia, en dos condiciones climáticas, se obtuvo indicadores positivos y sobre la tasa mínima exigida:

Primavera Normal - Verano Seco

Para la condición climática primavera normal - verano seco, se observa que en los sistemas de riego de carrete y taza es posible obtener un VAN positivo para los cultivos pradera sembrada (con y sin subsidio al riego) y alfalfa, contemplando el subsidio al riego (Figura 7.3). Los mayores valores de TIR se observan bajo condiciones de subsidio al riego, alcanzando valores similares, para alternativas de cultivos equivalentes, entre el sistema de riego de carrete como taza (Figura 7.4).

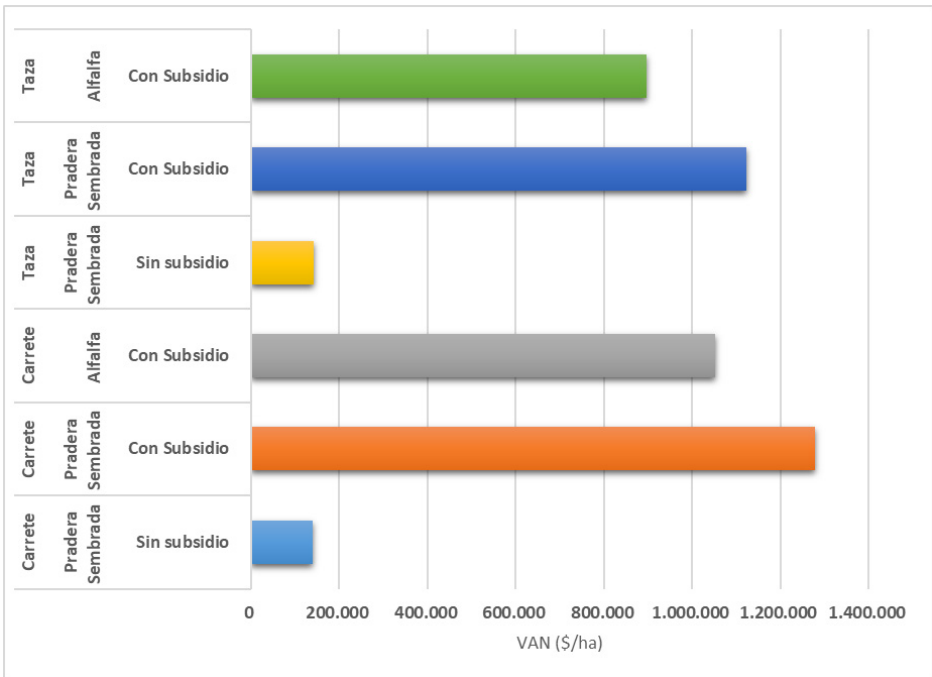


Figura 7.3. Valor Actual Neto (VAN) para diferentes alternativas de sistema de riego, cultivos y condiciones de subsidio al riego. Zona Intermedia condición primavera normal-verano seco. Región de Aysén.

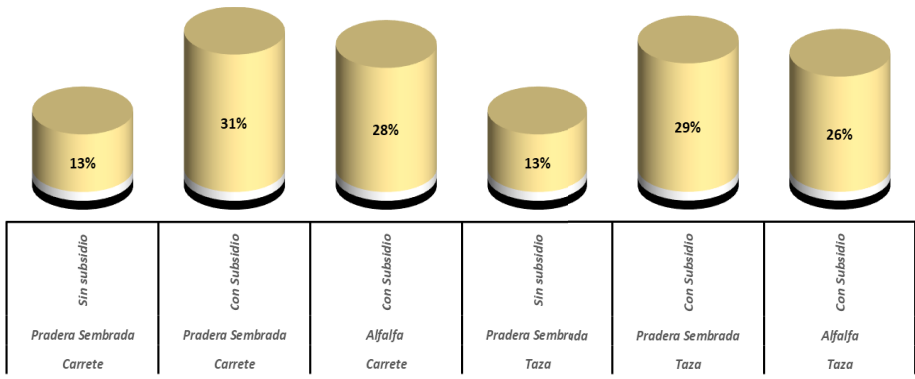


Figura 7.4. Tasa Interna de Retorno (TIR) para diferentes alternativas de sistema de riego, cultivos y condiciones de subsidio al riego. Zona Intermedia condición primavera normal-verano seco. Región de Aysén.

Primavera Fría - Verano Seco

Para la condición climática primavera fría - verano seco, se observa que en los sistemas de riego de carrete y taza es posible obtener un VAN positivo para el cultivo de alfalfa, contemplando el subsidio al riego (Figura 7.5). Los valores de TIR alcanzan valores similares en ambas alternativas de riego (Figura 7.6).

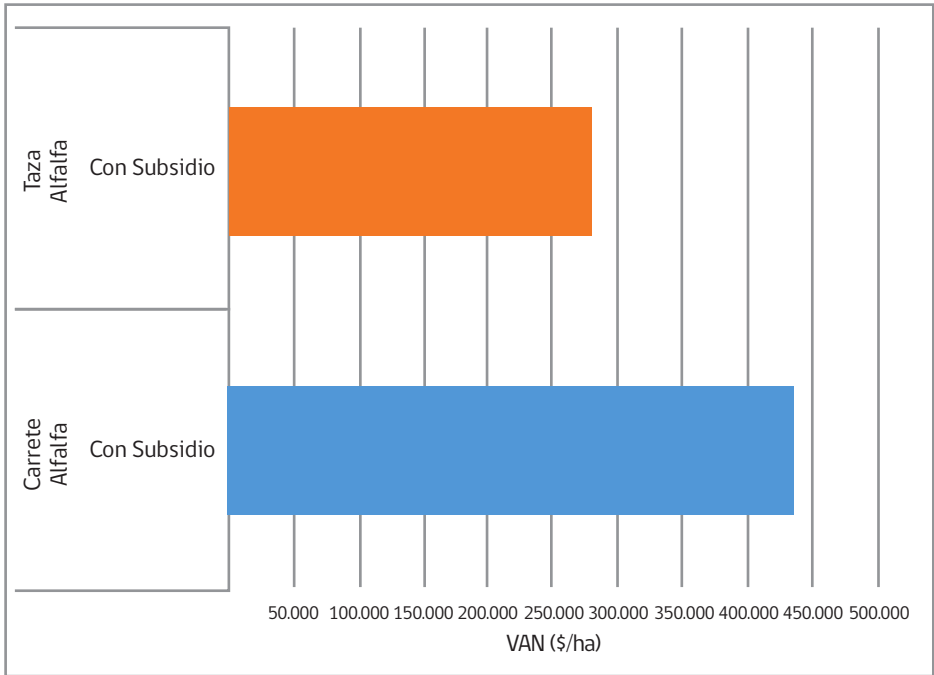


Figura 7.5. Valor Actual Neto (VAN) para diferentes alternativas de sistema de riego en alfalfa y subsidio al riego. Zona intermedia condición primavera fría-verano seco. Región de Aysén.

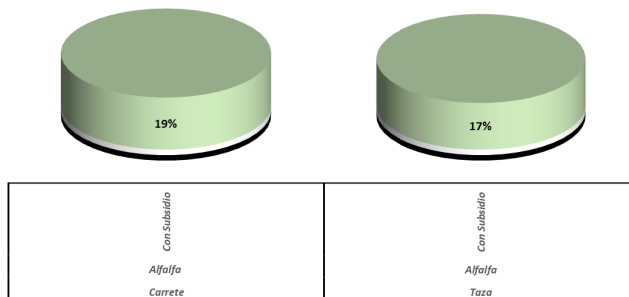


Figura 7.6. Tasa Interna de Retorno (TIR) para diferentes alternativas de sistema de riego en alfalfa y subsidio al riego. Zona intermedia condición primavera fría-verano seco. Región de Aysén.

Zona de Estepa

Para la Zona Estepa, en tres condiciones climáticas, se obtuvieron indicadores positivos y sobre la tasa mínima exigida:

Primavera Normal -Verano Normal

Para una condición climática primavera normal - verano normal, se observa que en los sistemas de riego pivote (diesel y gravitacional) es posible obtener un VAN positivo para el cultivo de alfalfa, contemplando el subsidio al riego. En los sistemas de riego de carrete y taza, se obtienen valores positivos incluso para la situación sin subsidio al riego (Figura 7.7). Los mayores valores de TIR se observan en el sistema de riego de carrete como taza, considerando subsidio (Figura 7.8).

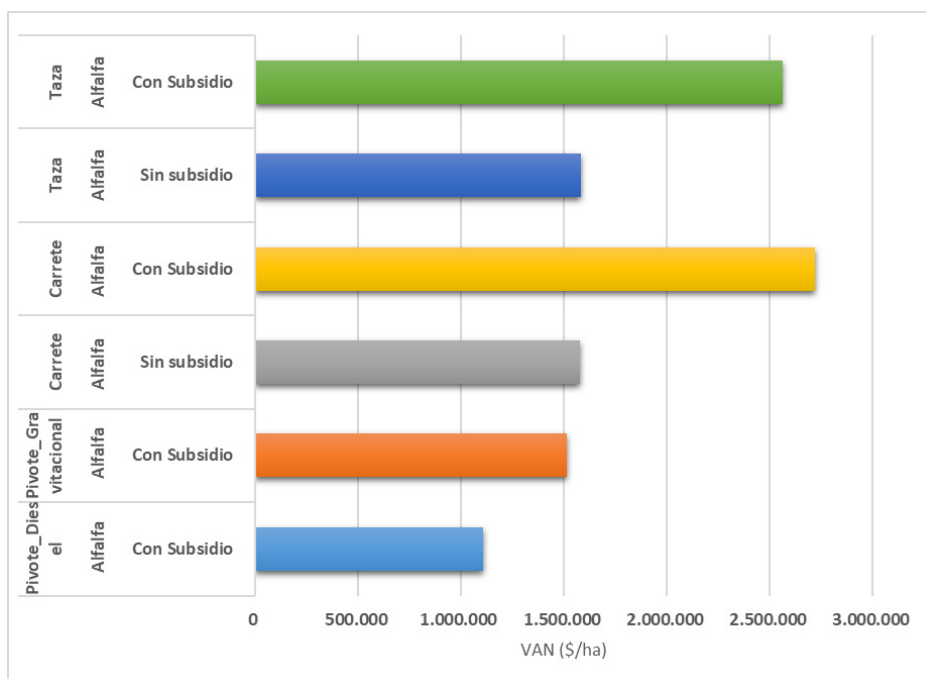


Figura 7.7. Valor Actual Neto (VAN) para diferentes alternativas de sistema de riego en alfalfa y condiciones de subsidio al riego. Zona Estepa condición primavera normal-verano normal. Región de Aysén.

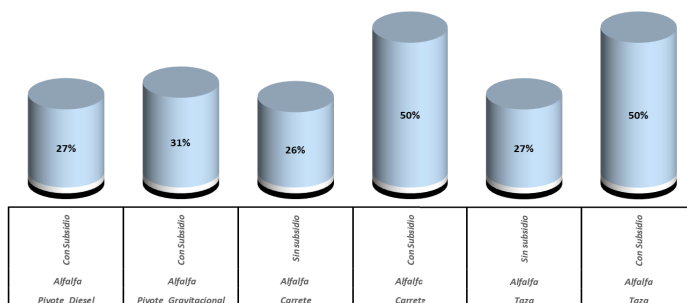


Figura 7.8. Tasa Interna de Retorno (TIR) para diferentes alternativas de sistema de riego en alfalfa y condiciones de subsidio al riego. Zona Estepa condición primavera normal-verano normal. Región de Aysén.

Primavera Fría - Verano Normal

Para la condición climática primavera fría - verano normal, se observa que para los sistemas de riego de carrete y taza es posible obtener un VAN positivo para el cultivo de alfalfa, contemplando el subsidio al riego (Figura 7.9). Los valores de TIR alcanzan valores similares en ambas alternativas de riego (Figura 7.10).

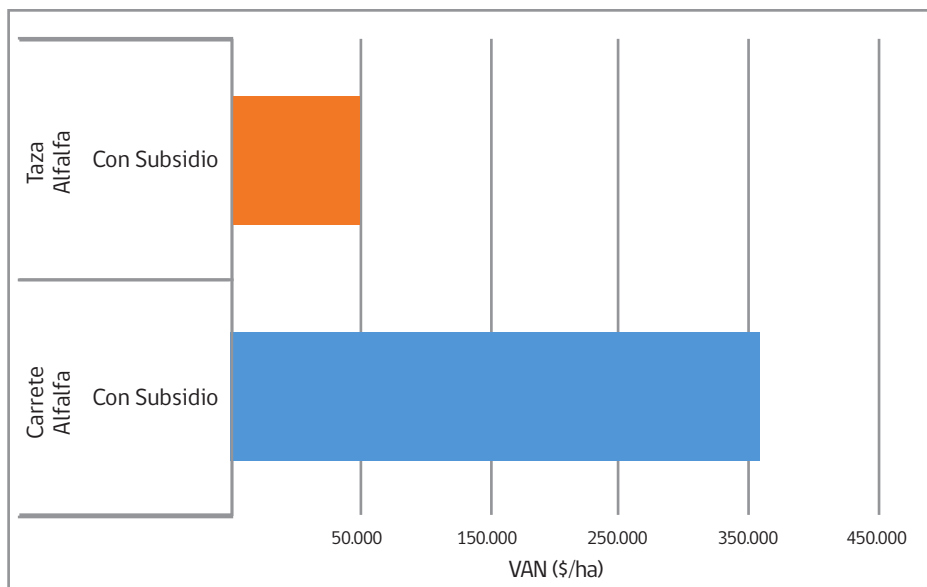


Figura 7.9. Valor Actual Neto (VAN) para diferentes alternativas de sistema de riego en alfalfa y condiciones de subsidio al riego. Zona estepa condición primavera fría-verano normal. Región de Aysén.

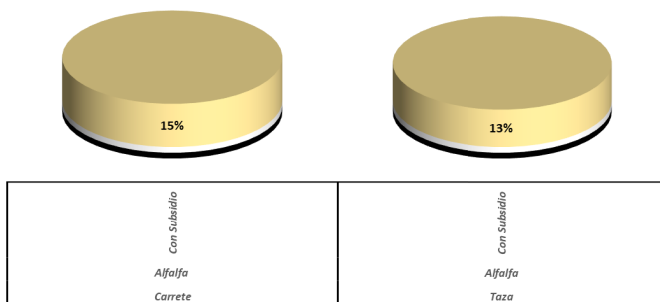


Figura 7.10. Tasa Interna de Retorno (TIR) para diferentes alternativas de sistema de riego en alfalfa y condiciones de subsidio al riego. Zona Estepa condición primavera fría-verano normal. Región de Aysén.

Primavera Normal – Verano Seco

Para una condición climática primavera normal - verano seco, se observa que en los sistemas de riego pivote (diesel y gravitacional) es posible obtener un VAN positivo para alfalfa, contemplando el subsidio al riego, y para el caso de riego pivote gravitacional, el cultivo de cereal para conservación aparece como una alternativa viable. En los sistemas de riego de carrete y taza, se obtiene valores positivos también para la situación sin subsidio al riego (Figura 7.11). Los mayores valores de TIR se observan en el sistema de riego de carrete como taza, considerando subsidio (Figura 7.12).

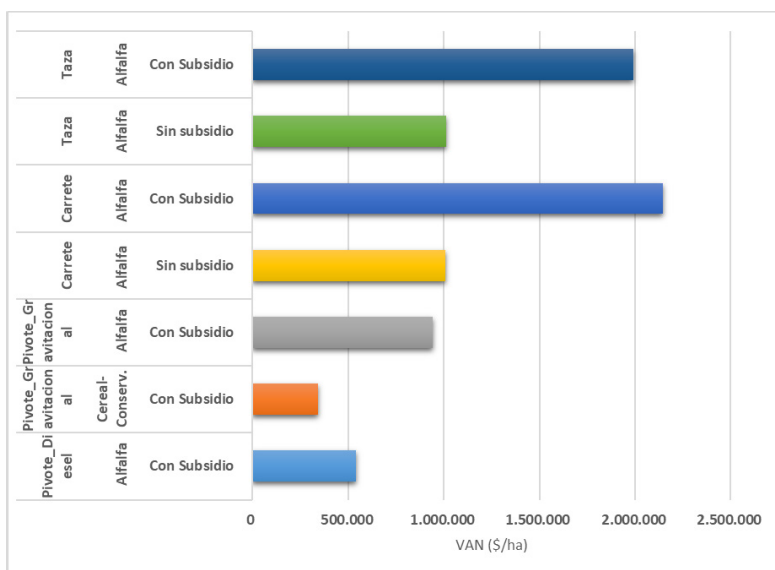


Figura 7.11. Valor Actual Neto (VAN) para diferentes alternativas de sistema de riego y condiciones de subsidio al riego. Zona Estepa condición primavera normal-verano seco. Región de Aysén.

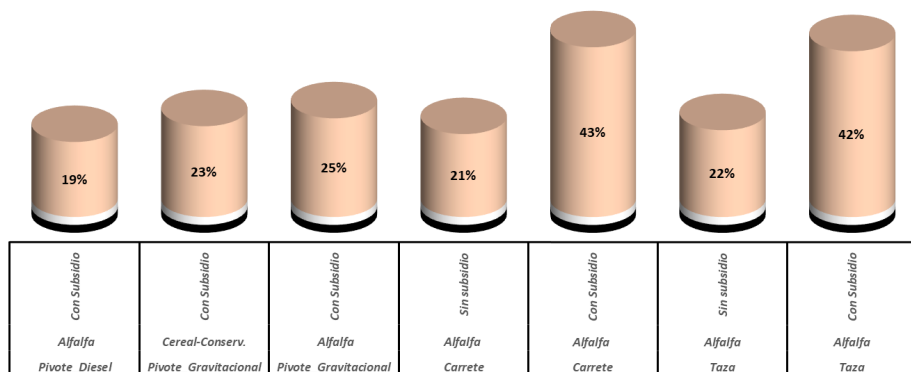


Figura 7.12. Tasa Interna de Retorno (TIR) para diferentes alternativas de sistema de riego y condiciones de subsidio al riego. Zona Estepa condición primavera normal-verano seco. Región de Aysén.

Para las brásicas forrajeras, en ninguna de las dos zonas se obtuvieron resultados positivos, ya que ellas sólo pueden ser utilizadas en pastoreo y en base a los supuestos relacionados con la producción de carne, el riego no resultó ser rentable en estas condiciones.

También debe señalarse que las evaluaciones de riego que resultaron rentables para las demás fuentes forrajeras, todas están referidas a la venta de forraje, ya que su utilización intrapredial no alcanzó valores positivos en el análisis económico a los precios indicados para carne. Es posible que predios que tengan realidades diferentes puedan lograr resultados diferentes, o bien, al mejorar las condiciones de precio del mercado de la carne.

Analisis de sensibilidad

Para las condiciones donde se obtuvo un TIR positivo mayor a la tasa de descuento, se realizó un análisis de sensibilidad considerando: a) disminución en un 10 % del precio de venta de bolos, b) un incremento de un 20 % en los costos de operación de los sistemas de riego.

Disminución en un 10 % del precio de venta de productos (bolos)

En el Cuadro 7.1 se presenta el análisis de sensibilidad considerando una disminución del 10 % del precio de venta de bolos. Se indica aquellas combinaciones que cumplieron con VAN positiva y TIR mayor a la tasa de descuento (columna con doble check) y se entrega valor de nueva TIR recalculada.

En este Cuadro se puede apreciar que, para la Zona Intermedia, solo en la condición climática primavera normal -verano seco, los sistemas de riego de carrete y taza, para los cultivos de pradera sembrada y alfalfa, con subsidio al riego, son las combinaciones que soportan una disminución del precio de venta.

Para la Zona de Estepa, las combinaciones se amplían a más condiciones agroclimáticas, a sistemas de riego de pivote-gravitacional, carrete y taza, pero solamente para cultivo de alfalfa.

Aumento en un 20 % de los costos de operación del sistema de riego

En el Cuadro 7.2 se presenta el análisis de sensibilidad considerando un aumento en un 20 % de los costos de operación de los sistemas de riego. Se indica aquellas combinaciones que cumplieron con VAN positiva y TIR mayor a la tasa de descuento (columna con doble check) y se entrega valor de nueva TIR recalculada.

En este Cuadro se aprecia que, la gran mayoría de las combinaciones evaluadas soportan el aumento considerado de los costos de operación de los sistemas de riego. Se presentaron tres situaciones que no lograron las condiciones requeridas de los indicadores económicos, una para la Zona Intermedia y dos para la Zona de Estepa.

Cuadro 7.1. Indicadores económicos bajo escenario de sensibilización por disminución de precio de venta de bolos.

Zona	Condición Climática	Sistema de Riego	Cultivo	Subsidio Riego	TIR inicial	Indicadores Económicos (sensibilización)	TIR recalculada
Intermedia	Primavera Normal - Verano Seco	Carrete	Pradera Sembrada	Sin	13%		
		Carrete	Pradera Sembrada	Con	31%	✓✓	19%
		Carrete	Alfalfa	Con	28%	✓✓	17%
		Taza	Pradera Sembrada	Sin	13%		
		Taza	Pradera Sembrada	Con	29%	✓✓	16%
		Taza	Alfalfa	Con	26%	✓✓	15%
Intermedia	Primavera Fría - Verano Seco	Carrete	Alfalfa	Con	19%		
		Taza	Alfalfa	Con	17%		
Estepa	Primavera Normal - Verano Normal	Pivote-diesel	Alfalfa	Con	27%		
		Pivote-gravitacional	Alfalfa	Con	31%	✓✓	15%
		Carrete	Alfalfa	Sin	26%	✓✓	14%
		Carrete	Alfalfa	Con	50%	✓✓	33%
		Taza	Alfalfa	Con	27%	✓✓	15%
		Taza	Alfalfa	Con	50%	✓✓	32%
Estepa	Primavera Fría - Verano Normal	Carrete	Alfalfa	Con	15%		
		Taza	Alfalfa	Con	13%		
Estepa	Primavera Normal - Verano Seco	Pivote-diesel	Alfalfa	Con	19%		
		Pivote-gravitacional	Alfalfa	Con	25%		
		Pivote-gravitacional	Cereal Conservación	Con	23%		
		Carrete	Alfalfa	Sin	21%		
		Carrete	Alfalfa	Con	43%	✓✓	23%
		Taza	Alfalfa	Sin	22%		
		Taza	Alfalfa	Con	42%	✓✓	21%

Cuadro 7.2. Indicadores económicos bajo escenario de sensibilización por aumento de los costos de operación de los sistemas de riego.

Zona	Condición Climática	Sistema de Riego	Cultivo	Subsidio Riego	TIR inicial	Indicadores Económicos (sensibilización)	TIR recalculada
Intermedia	Primavera Normal - Verano Seco	Carrete	Pradera Sembrada	Sin	13%	✓✓	12%
		Carrete	Pradera Sembrada	Con	31%	✓✓	29%
		Carrete	Alfalfa	Con	28%	✓✓	26%
		Taza	Pradera Sembrada	Sin	13%		
		Taza	Pradera Sembrada	Con	29%	✓✓	27%
		Taza	Alfalfa	Con	26%	✓✓	23%
Intermedia	Primavera Fría - Verano Seco	Carrete	Alfalfa	Con	19%	✓✓	17%
		Taza	Alfalfa	Con	17%	✓✓	13%
Estepa	Primavera Normal - Verano Normal	Pivote-diesel	Alfalfa	Con	27%	✓✓	24%
		Pivote-gravitacional	Alfalfa	Con	31%	✓✓	30%
		Carrete	Alfalfa	Sin	26%	✓✓	25%
		Carrete	Alfalfa	Con	50%	✓✓	49%
		Taza	Alfalfa	Con	27%	✓✓	25%
		Taza	Alfalfa	Con	50%	✓✓	47%
Estepa	Primavera Fría - Verano Normal	Carrete	Alfalfa	Con	15%	✓✓	14%
		Taza	Alfalfa	Con	13%		
Estepa	Primavera Normal - Verano Seco	Pivote-diesel	Alfalfa	Con	19%	✓✓	16%
		Pivote-gravitacional	Alfalfa	Con	25%	✓✓	23%
		Pivote-gravitacional	Cereal Conservación	Con	23%		
		Carrete	Alfalfa	Sin	21%	✓✓	20%
		Carrete	Alfalfa	Con	43%	✓✓	41%
		Taza	Alfalfa	Sin	22%	✓✓	20%
		Taza	Alfalfa	Con	42%	✓✓	39%

Comentarios finales

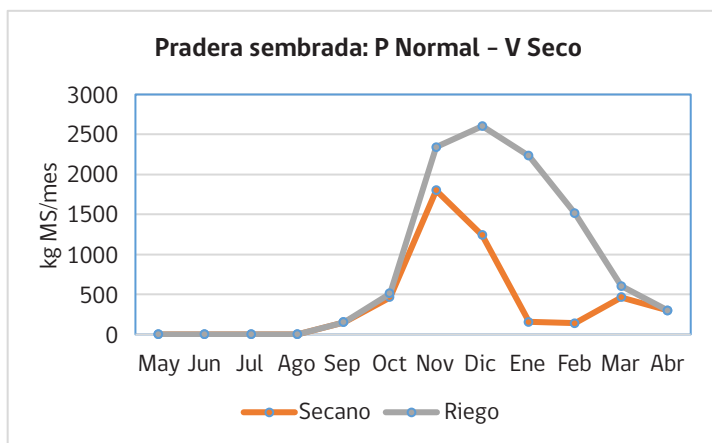
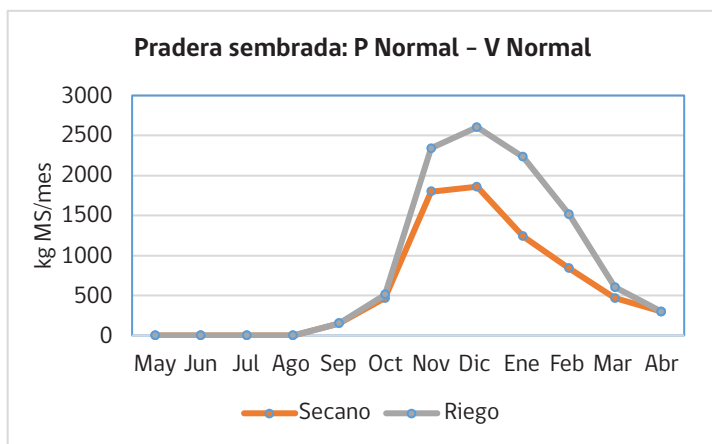
Del análisis económico obtenido se puede comentar que:

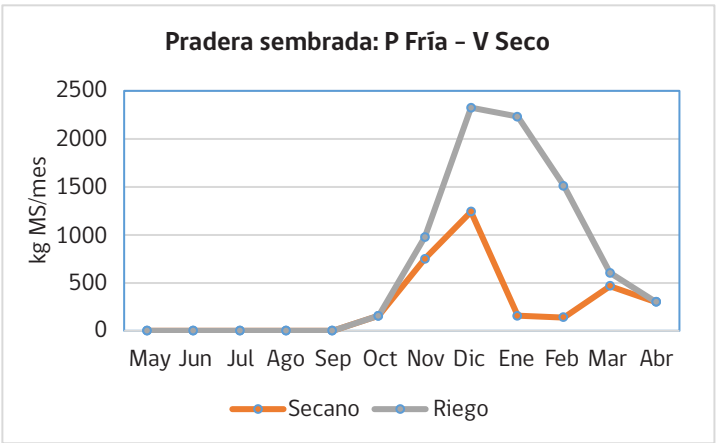
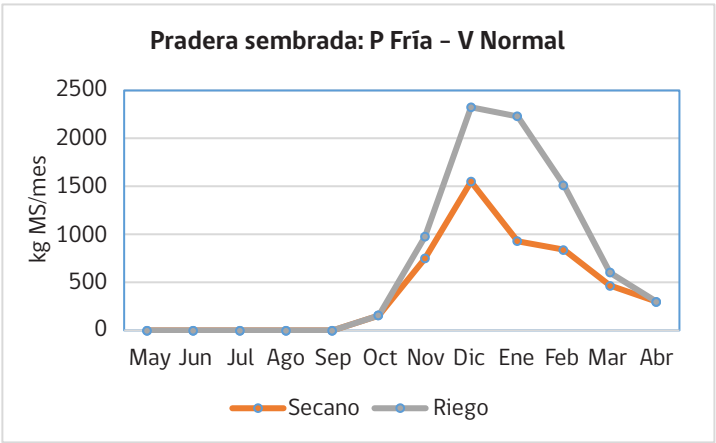
- a) El análisis económico estuvo centrado en la alternativa de producción de forraje para su venta como “bolo”, ya sea de heno, henilaje o ensilaje. Al considerar su utilización intrapredial, para alimentación propia de ganado y posterior venta de carne, la evaluación de las alternativas no resultó rentable.
- b) El uso de bráscas de pastoreo en sistemas de producción bovina de carne bajo riego no alcanzó los niveles de rentabilidad requeridos, con las condiciones de precios de mercado aplicadas en el análisis económico.
- c) En la Región de Aysén, bajo los supuestos estudiados, y considerando como producto el forraje mismo (para su venta), es factible obtener resultados económicos positivos, tanto en la Zona Intermedia como Zona de Estepa, sobre todo al utilizar sistemas de riego con energía gravitacional.
- d) Las condiciones climáticas de primavera (normal-fría) y verano seco inciden mayormente en la producción de forraje incremental de los cultivos en la Zona Intermedia.
- e) En la Zona de Estepa, la condición climática más desfavorable para la producción incremental de forraje es primavera fría- verano seco.
- f) En la Zona de Estepa es donde los sistemas de riego presentan mejores resultados económicos, incluso en condiciones de normalidad en primavera y verano.
- g) Los mejores resultados económicos se observan principalmente para alfalfa, seguido de la pradera sembrada, sobre todo cuando se tiene las condiciones climáticas señaladas en el punto d.
- h) Los indicadores financieros del análisis efectuado son más sensibles a cambios en el precio de venta del producto (bolos) que a los cambios en el costo de operación del sistema de riego.
- i) Debido a su valor nutritivo per se, la producción de bolos de cereal es probable que sea más sensible al factor precio que el caso de alfalfa.

Anexo curvas de crecimiento

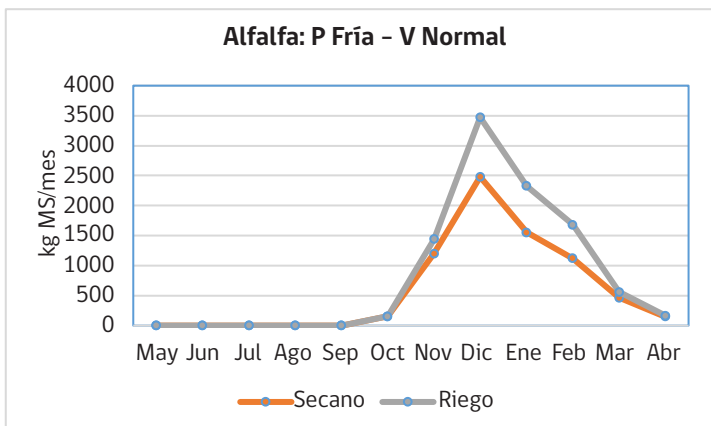
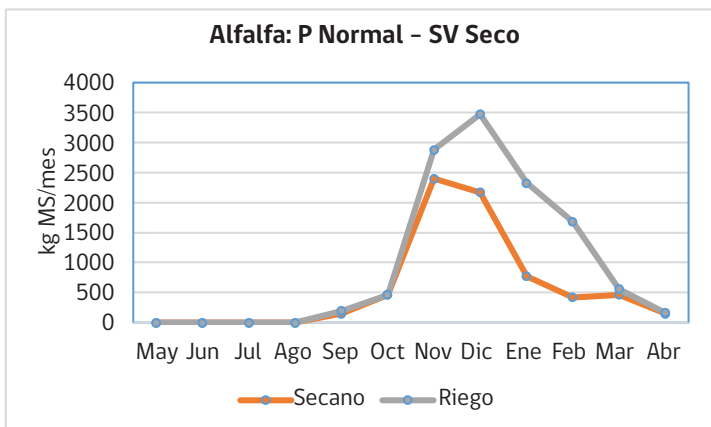
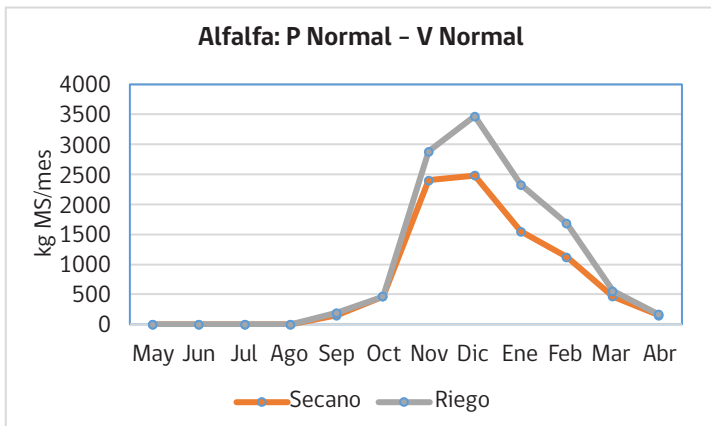
Curvas de crecimiento considerando primavera y verano con diferentes características: primavera (P) normal o fría y verano (V) normal o seco.

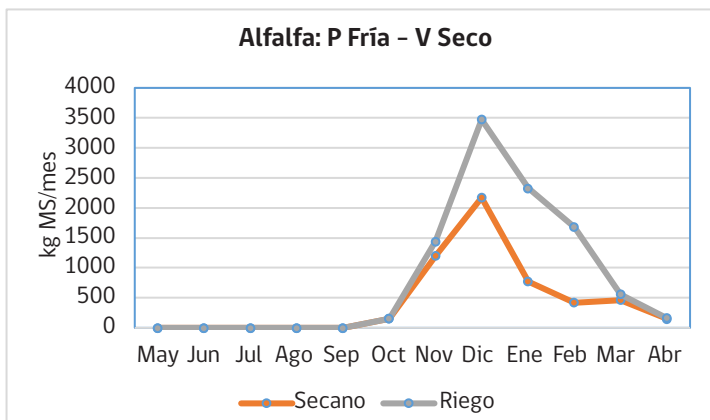
Zona Intermedia - pradera sembrada



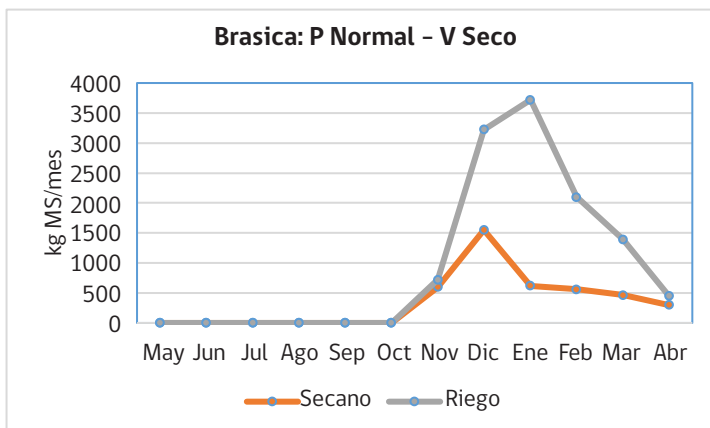
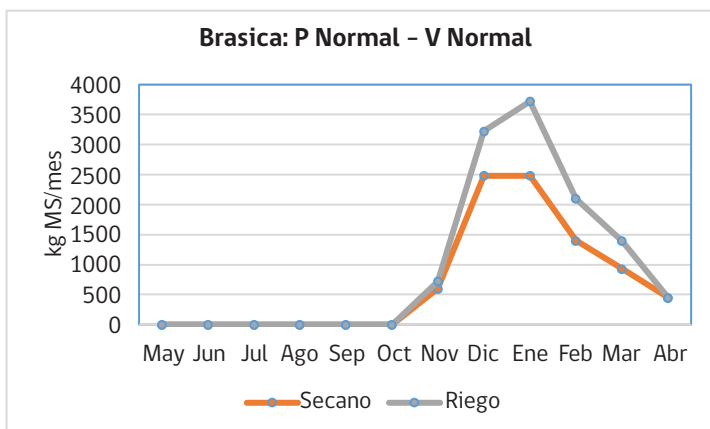


Zona Intermedia - alfalfa

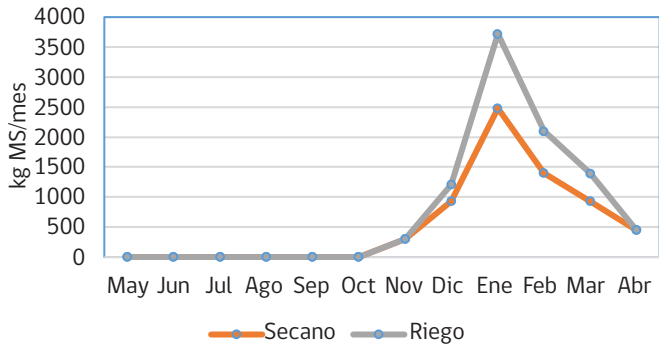




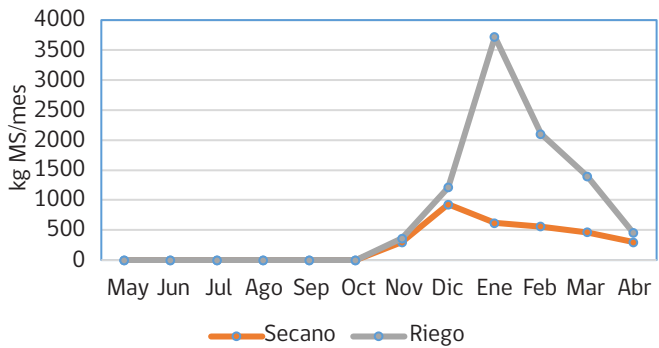
Zona Intermedia - brásica forrajera



Brasica: P Fría - V Normal

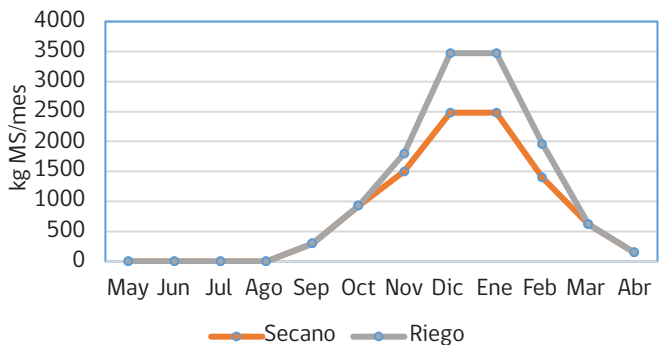


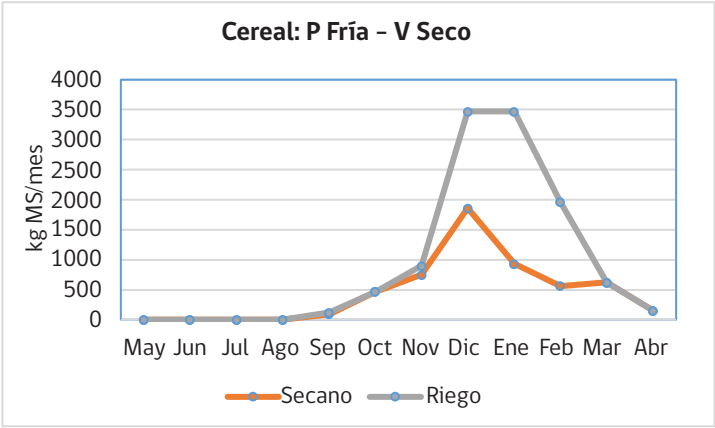
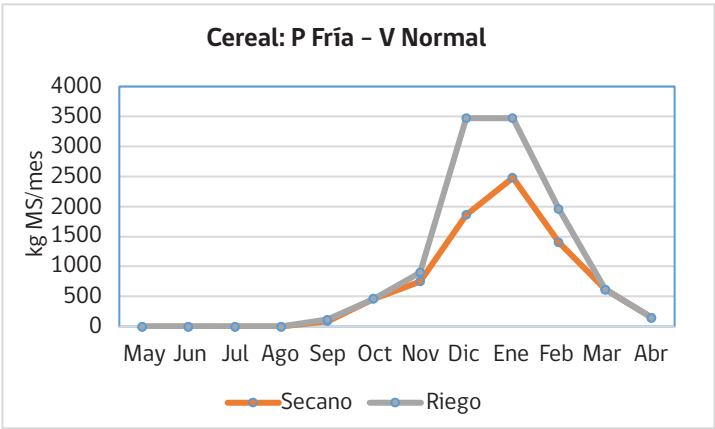
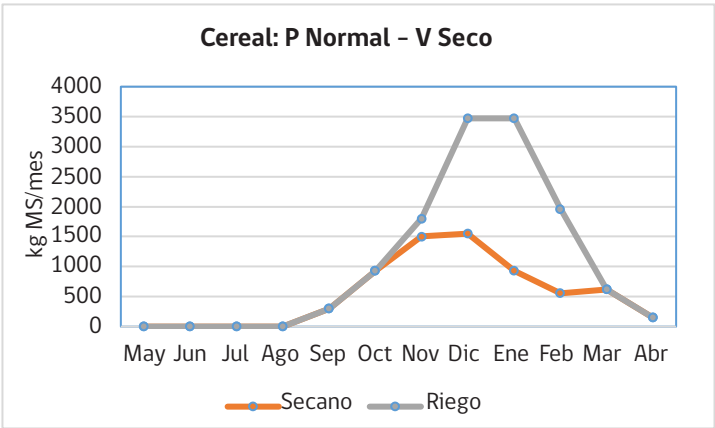
Brasica: P Fría - V Seco



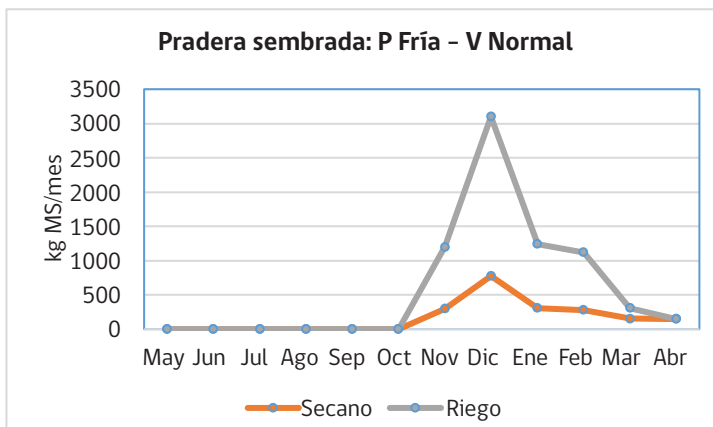
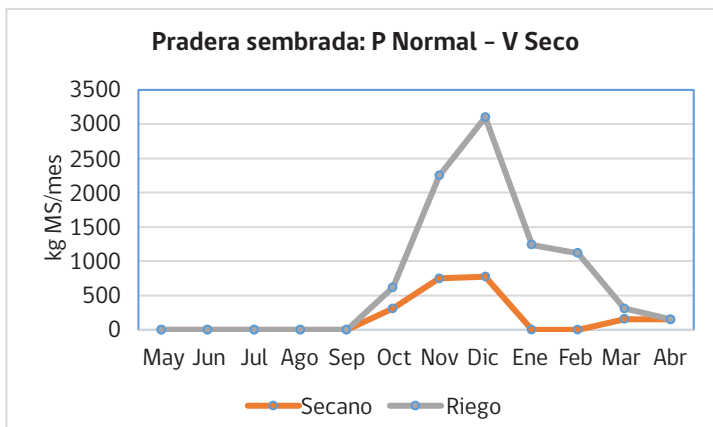
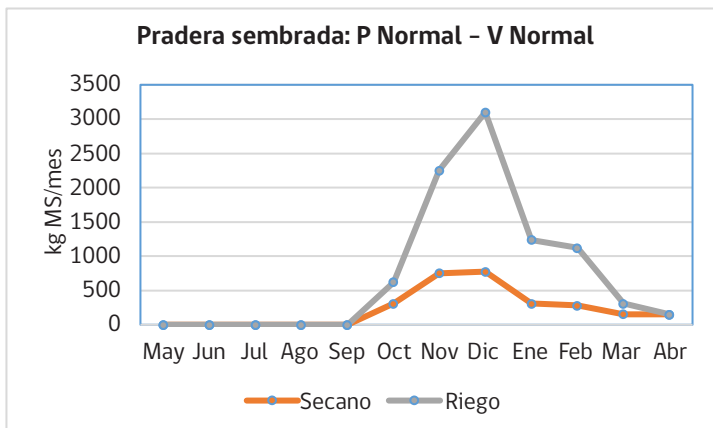
Zona Intermedia - cereal forrajero

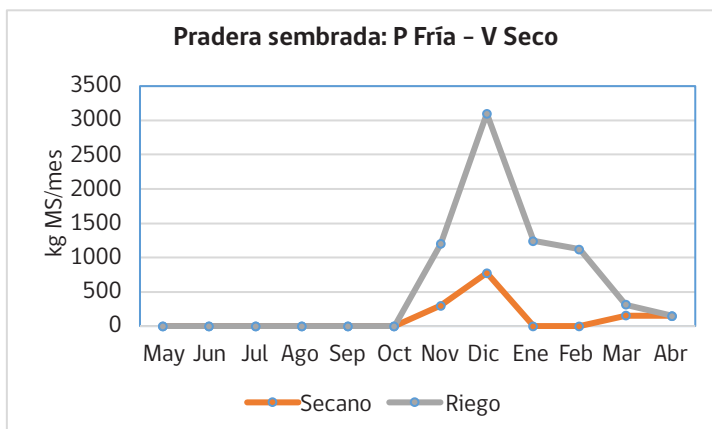
Cereal: P Normal - V Normal



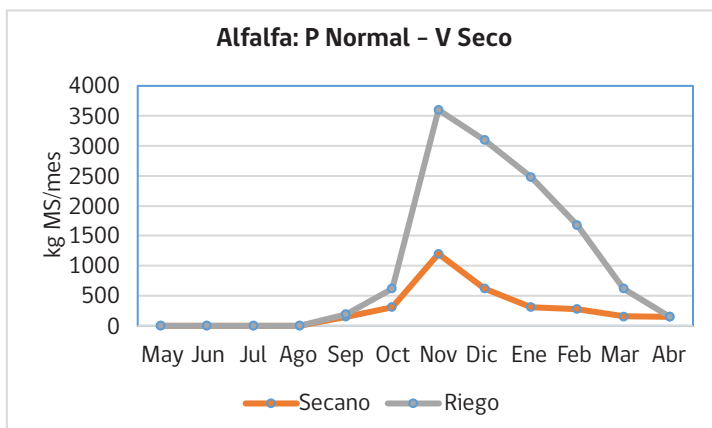
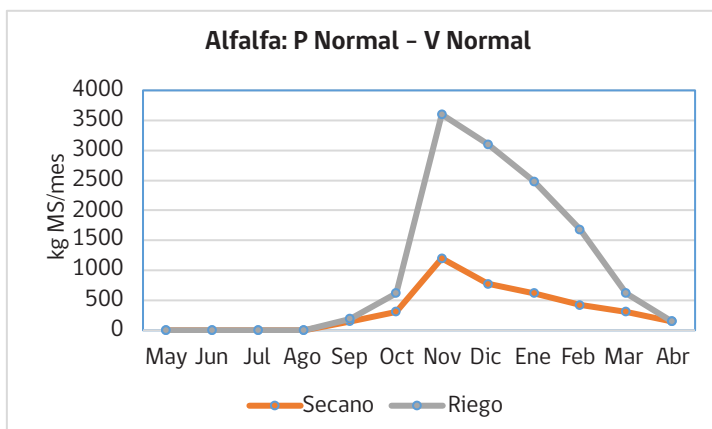


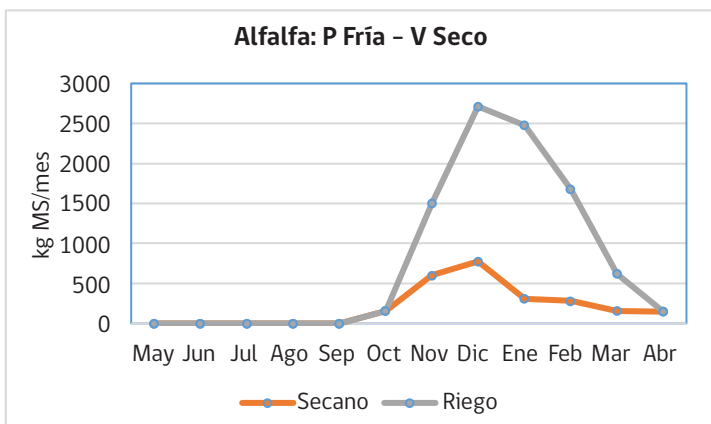
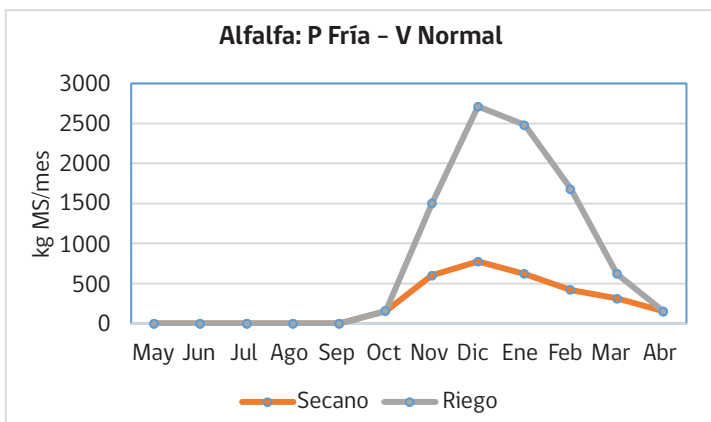
Zona Estepa - pradera sembrada



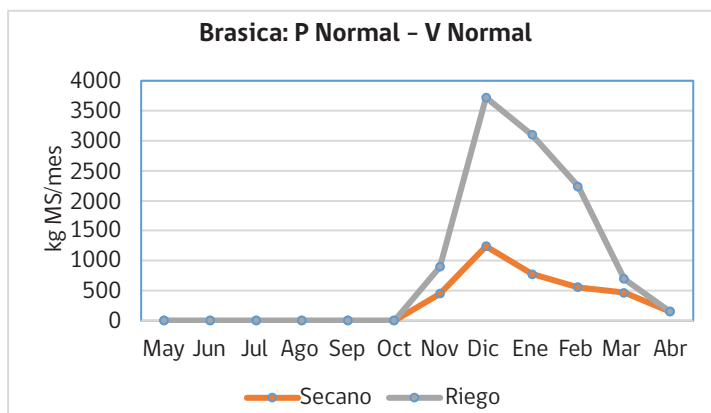


Zona Estepa - alfalfa

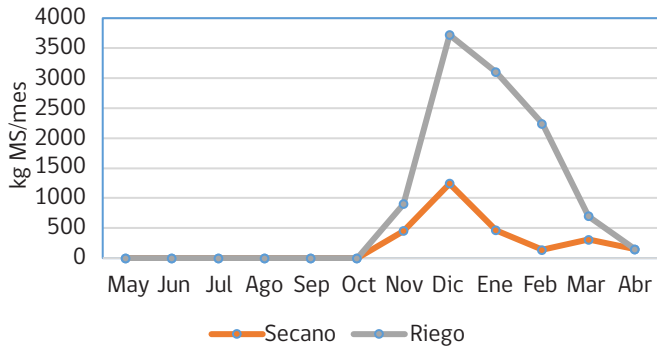




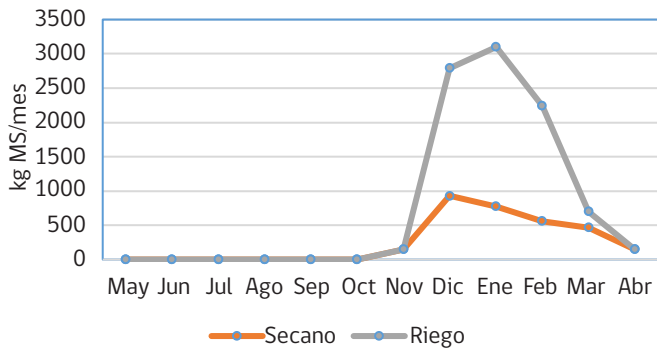
Zona de Estepa - brásicas forrajeras



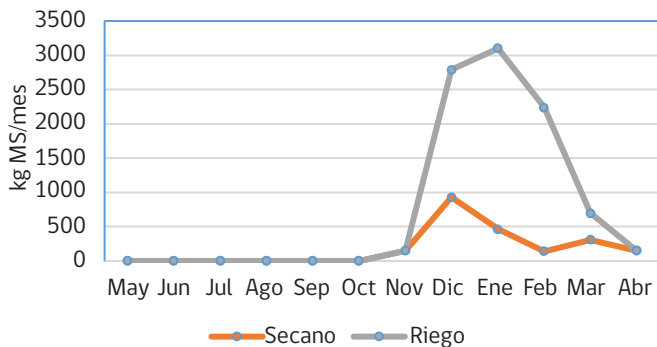
Brasica: P Normal - V Seco



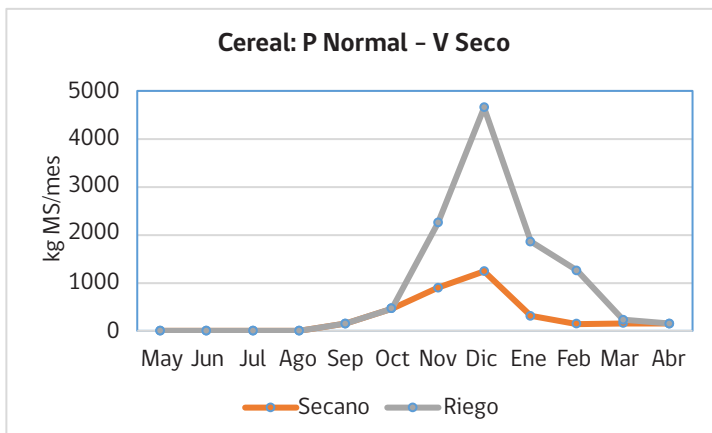
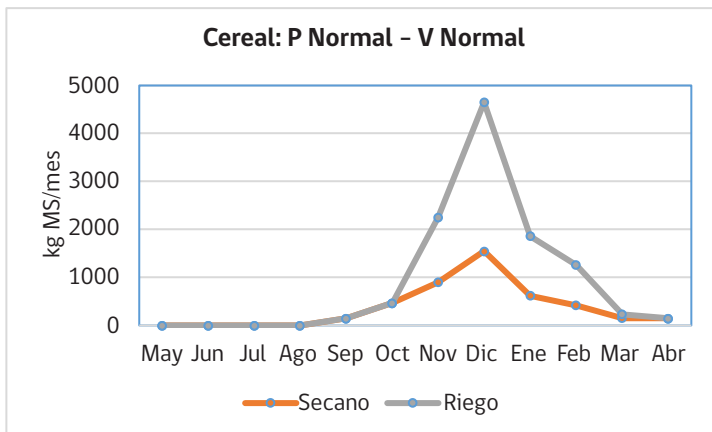
Brasica: P Fría - V Normal

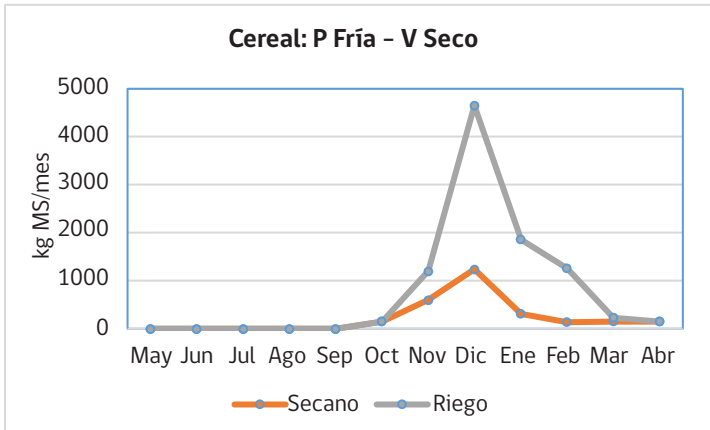
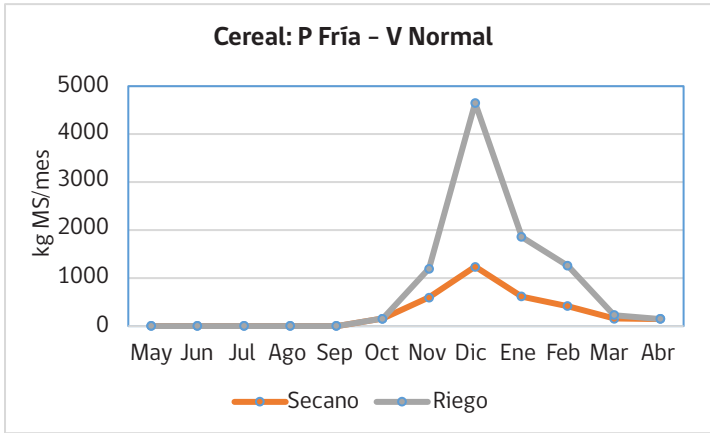


Brasica: P Fría - V Seco



Zona de Estepa - cereal forrajero





Capítulo 8

Uso de la plataforma web riegoaysen.cl

Pier Barattini P., Christian Hepp K., Homero Barría O. y Dagoberto Villarroel T.

Introducción

Con el objetivo de proporcionar información pertinente sobre la gestión del agua, el suelo, las praderas y los cultivos en el ámbito del riego, se ha creado una plataforma web accesible al público de forma gratuita y sin restricciones, especialmente orientada a la Región de Aysén.

Esta plataforma no sólo sirve como una herramienta de consulta, sino que también está diseñada para guiar a profesionales, técnicos y usuarios en la elaboración de perfiles y proyectos relacionados con el riego y temáticas similares. La plataforma se puede acceder en la dirección: **riegoaysen.cl**

La plataforma consta de dos secciones principales. La primera corresponde a un formato de página web, donde se puede encontrar la información generada por el INIA relativa a suelos y clima regional, además de antecedentes de otras regiones en la temática del riego. El objetivo es contar con dicha información en un solo sitio y que ésta esté en formatos descargables por los usuarios (pdf, shape, kmz, etc.). Junto a ello, se encuentran antecedentes de los proyectos de riego desarrollados en la zona. Está dirigida a operadores y asesores técnicos, desarrolladores de proyectos y productores de vanguardia.

Pantalla de acceso

Para comenzar el uso de la plataforma, se debe ingresar a la dirección web **riegoaysen.cl**, donde se llega a una pantalla que entrega dos opciones, “Acceder a información” (a la izquierda) e “Inicio de Sesión” (a la derecha) como se muestra en la Figura 8.1. La primera opción brinda acceso al repositorio de información, mientras que la segunda permite al usuario acceder a la plataforma de riego, donde se puede crear un perfil de proyecto de riego, mediante el llenado de un formulario. En caso de ser la primera vez que se utiliza la plataforma, es necesario crear un nuevo usuario completando un registro.



Plataforma de Riego Aysen

Acá puedes acceder a más información sobre proyectos de riego

ACCEDER A INFORMACIÓN

Figura 8.1. Pantalla de inicio de riegoaysen.cl

Página web

Como se señaló anteriormente, se accede a ella presionando el botón “ACCEDER A INFORMACIÓN” (Figura 8.2), el cual redirige a un sitio web donde se encuentra disponible una amplia gama de información relacionada con el manejo del agua, suelos, mapas, datos climáticos, entre otros recursos. También es posible acceder directamente desde la dirección recursos.riegoaysen.cl.



Plataforma de Riego Aysen

Acá puedes acceder a más información sobre proyectos de riego

ACCEDER A INFORMACIÓN

Figura 8.2. Hipervínculo para acceso al repositorio de información.

En la página de inicio se ofrecen diversas opciones de navegación para acceder a la información. En la parte superior se encuentra una barra de navegación (pestañas) que incluye enlaces a redes sociales y otras páginas de interés.

En primera instancia, se entrega información relativa al proyecto de riego cofinanciado por Innova-Corfo entre 2020 y 2024, que ha permitido estos desarrollos y la acumulación de una relevante cantidad de información sobre la temática en la Región de Aysén (Figura 8.3).



Figura 8.3. Presentación del proyecto de riego cofinanciado por Innova-Corfo.

Es importante destacar la pestaña “CONTENIDO”, ya que al seleccionarla se despliega la información dividida en distintas secciones (Figura 8.4). Además, se puede acceder al contenido desplazándose hacia abajo en la página de inicio.

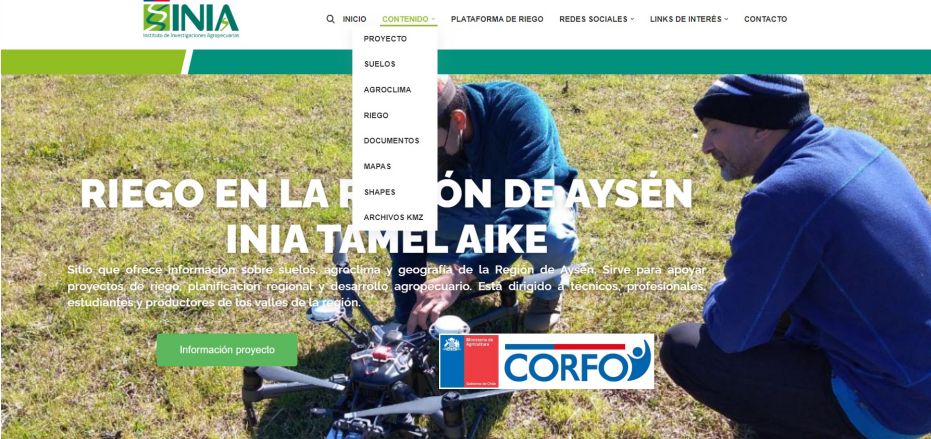


Figura 8.4. Presentación de contenidos de la página web.

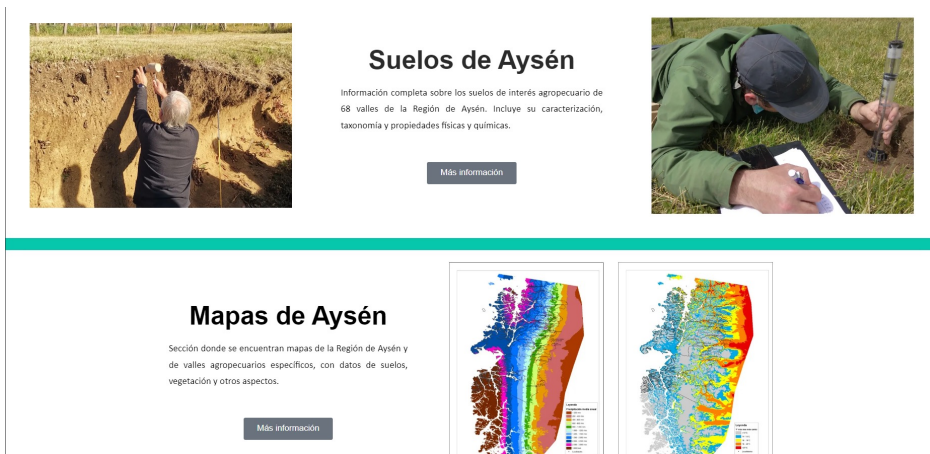


Figura 8.5. Ejemplos de contenidos de la página.

El sitio proporciona una amplia gama de datos de interés, especialmente a nivel regional, sobre temas como suelos, clima, mapas y documentos diversos (ejemplos en Figuras 8.5 y 8.6). Además, ofrece una gran cantidad de información descargable en varios formatos. Esto incluye archivos tipo KMZ compatibles con plataformas como Google Earth, así como archivos shape y otros similares, que son compatibles con sistemas de información geográfica y son solicitados por profesionales y técnicos del campo.

Mapas

En esta sección se encuentran diferentes tipos de mapas, asociados a la región de Aysén en su conjunto, o bien a valles de interés agropecuario en particular. Se incluyen mapas de capacidad de uso de los suelos, vegetación, climáticos, de ubicación, mapas sectoriales, entre otros. En cada caso se puede visualizar el contenido, como también existe la alternativa de descarga.



Capacidad de uso de suelos en valles agropecuarios

Región de Aysén | Mayo 25, 2023
Mapas con la capacidad de uso de los suelos de 68 valles agropecuarios de la Región de Aysén.



Capacidad de uso región de Aysén

Región de Aysén | Mayo 25, 2023
Mapas regionales y sectoriales de la Región de Aysén con las diferentes categorías de capacidad de uso de los suelos.

Capacidad de uso a nivel regional Aysén

Mapas que contienen las diferentes categorías de uso de suelos de la Región de Aysén (nivel regional). Se ha considerado sólo la superficie potencialmente útil para fines agropecuarios, por lo que mayoritariamente se excluye la categoría de capacidad de uso VIII.

Para ver los mapas en mayor tamaño, haga clic sobre ellos. Si desea descargarlos, haga clic derecho sobre la imagen ampliada y seleccione la opción "Guardar la imagen como..." y elija una ubicación para el archivo.



Zona Norte



Zona Sur



Valles productivos



CUS II a VI



Figura 8.6. Ejemplos de material disponible en la página.

La página web se encuentra en constante desarrollo con el objetivo de proporcionar a los usuarios la mejor experiencia posible. Esto implica que de manera continua se agregarán nuevos contenidos conforme se vayan publicando, asegurando así la disponibilidad de información relevante y útil para nuestros visitantes.

Plataforma de riego

Se accede a ella desde la página de inicio, ingresando luego de haber creado un usuario. En la esquina superior izquierda, se encuentra el botón “CREAR FORMULARIO”, el cual, al ser seleccionado, abre una pestaña donde se debe ingresar el nombre del perfil y la comuna en la que se encuentra ubicado el predio (Figura 8.7). Una vez creado el perfil, éste aparece en un listado junto con los datos ingresados por el usuario. Al hacer clic en el perfil creado, se accede a la elaboración del mismo.

The screenshot displays the web interface for the irrigation platform. At the top, there is a green header with the INIA and CORFO logos on the left, the text 'VER MÁS INFORMACIÓN' in the center, and 'SALIR' on the right. Below the header, a red-bordered button labeled 'CREAR FORMULARIO' is highlighted. Underneath, a text block explains that users can generate a 'PERFIL DE PROYECTO DE RIEGO' and create a 'FORMULARIO' to request data for building the profile. Below this is a table with the following structure:

NOMBRE	FECHA DE CREACIÓN	UBICACIÓN DEL SECTOR DE RIEGO	ESTADO	OPCIONES
riego	miércoles, 7 de junio de 2023	COYHAIQUE	completado	 

A modal window titled 'Datos del formulario a crear' is overlaid on the table. It contains two input fields: 'Nombre*' with the value 'prueba1' and 'Ubicación (Comuna)*' with a dropdown menu showing 'COYHAIQUE'. A note below the fields states '*Requerido'. At the bottom of the modal are two buttons: 'CREAR' (green) and 'CERRAR' (red).

Figura 8.7. Creación de formulario.

La plataforma está diseñada en 7 etapas, que consisten en:

- 1) Prefactibilidad
- 2) Suelo
- 3) Clima
- 4) Tipo de Energía
- 5) Cultivo
- 6) Cálculos
- 7) Resumen

La plataforma permite realizar un **perfil de proyecto de riego** en base a los datos que se van aportando para una localización regional determinada y, en caso de no tener suficiente información, el sistema ofrece datos promedio de la zona.

Prefactibilidad

En esta etapa se deben contestar tres preguntas básicas, siendo requisitos fundamentales para poder continuar con el proceso (Figura 8.8). Si la respuesta es negativa en alguna de las preguntas, no se podrá avanzar al siguiente paso, y aparecerá hipervínculo con información que indica la forma en que se puede cumplir con el trámite requerido.

1.- Prefactibilidad

Seleccione la opción que corresponda

En esta sección, se le consulta sobre tres aspectos fundamentales a tener en cuenta para su proyecto de riego. Si alguna de las tres respuestas es "NO", se le indica en cada caso la forma de regularizarlo. Para continuar el perfil, las tres respuestas deben ser "SI".

a) ¿Posee el Título de Dominio de Tierra? SI No

b) Energía Disponible
Aquí debe indicar si tiene disponibilidad de energía (eléctrica, fósil, solar, gravitacional, etc.) para establecer un sistema de riego (más adelante se le preguntarán más detalles al respecto). SI No

c) Derechos de Aprovechamiento de Agua (Caudal CBR)
Se refiere a los derechos de agua con que cuenta el predio y que se encuentran inscritos en el Conservador de Bienes Raíces (CBR) correspondiente. SI No [VER AQUÍ ¿CÓMO OBTENER?](#)

Figura 8.8. Ventana de prefactibilidad del proyecto.

Si todas las respuestas son afirmativas, se activa el botón "SIGUIENTE" y se puede avanzar con el proceso.

Suelo

En esta sección se debe ubicar el punto donde se va a realizar el proyecto. En un mapa satelital tipo Google Earth, se puede realizar zoom para ubicar el sitio, el que se encontrará en un valle determinado (Figura 8.9), que será asignado por la plataforma.



Figura 8.9. Mapa con valles productivos.

Después, es necesario ingresar información sobre las constantes hídricas del área o predio donde se pretende instalar el sistema de riego (Figura 8.10). Si no se dispone de datos prediales, el sistema sugerirá valores por defecto.

2.- Suelo ?

Los valores son "sugeridos" según datos INIA. Modifique los valores de capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y/o densidad aparente (DA) si se cuenta con datos propios o del sector (Utilice decimales separados por punto en vez de coma)

Capacidad de Campo [% (base peso seco)]
46.64

Punto marchitez permanente [% (base peso seco)]
28.5

Densidad aparente [gr/cm³]
0.79

ANTERIOR INICIO SIGUIENTE

Figura 8.10. Características hídricas del sector.

En la siguiente página se debe proporcionar la superficie predial y la superficie que se planea regar (Figura 8.11).

2.- Suelo

Indique la superficie total del predio y la superficie que se pretende regar (en hectáreas).

¿Cuál es la superficie total del predio? [Hectáreas]
100

¿Cuál es la superficie a regar? [Hectáreas]
50

ANTERIOR INICIO SIGUIENTE

Figura 8.11. Información sobre el área a regar.

Completando esas cinco preguntas, se puede proceder al siguiente paso.

Clima

Posteriormente, es necesario especificar la estación meteorológica de la cual se desean obtener los datos básicos (Figura 8.12), habitualmente la más cercana al sector

que se desea regar, o bien, la más representativa según el usuario. Ello se requiere, ya que la plataforma debe obtener algunos datos básicos como la evapotranspiración, para hacer cálculos posteriores.

3.- Clima

Seleccione la estación meteorológica de la red INIA más cercana a su predio o sector de riego (o bien la que considere más representativa). Utilice el zoom (+) para ubicar la estación.

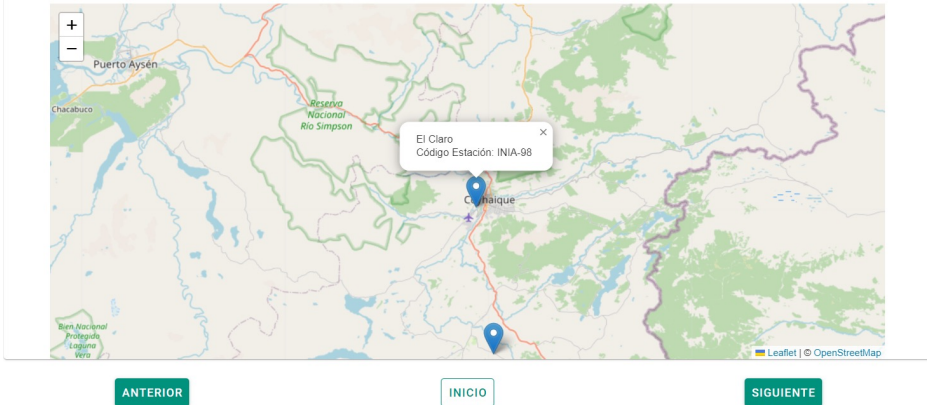


Figura 8.12. Mapa para la selección de estación meteorológica.

Una vez seleccionada la estación meteorológica, se muestra un cuadro resumen con los datos más relevantes obtenidos de la estación.

Energía

En el paso siguiente se requiere especificar el tipo de energía que se empleará en el sistema de riego y la potencia con que se cuenta a nivel predial (Figura 8.13). Se ofrecen diferentes alternativas.

4.- Energía

Indique el tipo de energía que planea usar para el sistema de riego y la potencia de la que dispone

Seleccione Tipo de Energía*
Convencional (indicar kW)

Potencia Disponible*
200

ANTERIOR

INICIO

SIGUIENTE

Figura 8.13. Características energéticas disponibles para el riego.

Cultivo

A continuación, se solicita información sobre el recurso que se planea regar (Figura 8.14), incluyendo el coeficiente de cultivo a utilizar, el criterio de riego y la profundidad efectiva de riego (es decir, la profundidad de las raíces). En caso de no contar con estos datos, el sistema proporcionará valores promedio.

5.- Cultivo

Seleccione el tipo de cultivo/pradera que pretende regar y complete los datos solicitados.
En caso de no contar con esta información, se sugieren valores, los que pueden ser modificados.

Selección Tipo de Cultivo*
Pradera

Coefficiente de Cultivo (kc), rango 0.25-1.15 (varía según etapa de desarrollo)
1

Criterio de Riego (CR = P + 0.04 (S - ETC))
0.62

Profundidad Efectiva de Raíces [cm]
10

[ANTERIOR](#) [INICIO](#) [SIGUIENTE](#)

Figura 8.14. Características del cultivo a regar.

Cálculos

Por último, se lleva a cabo una consulta que afecta en el manejo de algunos sistemas de riego, tales como la automatización, el tipo de pendiente (relieve) y la presencia de obstáculos en el terreno (Figura 8.15).

6.- Cálculos

Responda lo siguiente en relación al criterio de riego por cultivo

Requerimientos de carga ?

Distancia desde la captación de agua hasta el punto de riego (metros)
80

Diferencia altura [m]
30

Figura 8.15. Formulario con distintas características del proyecto.

El sistema proporciona un cálculo del requerimiento de energía estimado para el proyecto, utilizando la información ingresada (Figura 8.16). Este valor puede luego ser contrastado con la energía efectivamente disponible.

Requerimiento de Energía

El requerimiento estimado de energía para su proyecto es de 36.29 KW
Y dispone de 200 KW


ANTERIOR
INICIO
SIGUIENTE

Figura 8.16. Requerimientos de energía del sistema de riego.

Resultados

Al término del proceso, se presenta un resumen del perfil de riego que incluye los antecedentes y datos ingresados, así como los cálculos realizados (Figura 8.17).

Nombre:
Nombre del formulario: **prueba1**
Comuna: **COYHAIQUE**
Valle seleccionado: **Valle Simpson**



Información de variables

VARIABLE	VALOR	UNIDAD DE MEDIDA
Capacidad de Campo (CC)	46.64	[%]
Punto de marchitez permanente(PMP)	28.5	[%]
Densidad aparente	0.79	[g/cm3]
Superficie total predio	100	[Ha]
Superficie a regar	50	[Ha]

Figura 8.17. Resumen del perfil de riego.

Se ofrece una propuesta del sistema de riego que mejor se adapte a las condiciones dadas según los antecedentes ingresados. El informe generado puede ser descargado en formato PDF. Además, se entrega información sobre el sistema de riego sugerido y las posibles fuentes de financiamiento al pinchar los signos de interrogación (Figura 8.18).

Recomendación sistemas de riego

VARIABLE	PIVOTE	CARRETE	TAZA
Riego Praderas	✓	✓	✓
Consumo de Energía	×	×	×
Superficie	✓	✓	✓
Caudal	✓	×	×
Topografía	✓	✓	✓
Velocidad de Infiltración	✓	✓	✓
Obstáculos Zona de Riego	✓	✓	✓
Automatización	×	×	×
Puntaje total obtenido para cada sistema de riego	15 ×	13 ×	18 ✓

Se sugiere el sistema de riego: Taza ?

Fuentes de Financiamiento ?

Figura 8.18. Recomendación de riego entregada por la plataforma.

Este perfil de riego se plantea como una primera aproximación en el desarrollo de un proyecto, para detectar posibles limitaciones o puntos que deban ser abordados y solucionados, previa a la formulación del mismo.

Referencias

- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes and M. Smith.** 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, Italy.
- Allen, R., L. Pereira, D. Raes y M. Smith.** 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO Estudio Riego y Drenaje Boletín N°56. Roma, Italia.
- Balbotín, C., M. Odi, R. Poblete, J. Garrido, I. Campos y A. Calera.** 2016. Uso de herramientas de teledetección y SIG para el manejo del riego en los cultivos. 50 p. Boletín INIA N°335. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional Intihuasi, La Serena, Chile.
- Calera, A., A. Jochum, A. Cuesta, A. Montoro and P. López.** 2005. Irrigation management from space: Towards user-friendly products. Irrigation and Drainage Systems 19(3):337-353.
- Callejas, R., J. Navarrete y M. Rioseco.** 2013. Líneas de gestión de riego: umbrales para interpretar los datos de humedad del suelo registrados por sondas de capacitancia. Revista Antumapu Profesional 2 (3).
- Connor, R.** 2015. The United Nations world water development report 2015: water for a sustainable world (Vol. 1). UNESCO, París, Francia.
- Cuesta, A., Montoro, A., Jochum, A.M., López, P. and Calera, A.** 2005. Metodología operativa para la obtención del coeficiente de cultivo desde imágenes de satélite. ITEA : Información Técnica Económica Agraria, 101(3): 212-224.
- Chen, D., Huang, J., Jackson, T. J., & Shi, J.** 2017. Daily monitoring of the water budget components over the Heihe River Basin with passive and active microwave remote sensing. Hydrology and Earth System Sciences, 21(10), 5027-5043.
- Dirección Meteorológica de Chile.** 2024. Acceso a datos de precipitaciones: <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/requerimiento/producto/RE1006>
- Dirección Meteorológica de Chile.** 2024. Acceso a datos de temperaturas: <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/requerimiento/producto/RE1005>

Ferreya, R. y Sellés, G. 2013. Manual de Riego para Especies Frutales. 320 p. Boletín INIA N°278. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Centros Regionales de Investigación La Platina y La Cruz. Santiago, Chile.

Fundación para la Innovación Agraria. 2008. Tecnologías aplicables en Agricultura de Precisión. Santiago, Chile. 98 p.

Hepp, C. y Stolpe, N. 2019. Caracterización y Propiedades de los Suelos de la Patagonia Occidental. Boletín INIA N° 298 (reedición). Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro de Investigación INIA Tamel Aike, Coyhaique, Aysén-Patagonia, Chile. 160 pp.

Hepp, C. 2019. Valles de interés agropecuario de la región de Aysén (Patagonia Occidental - Chile). Boletín INIA N° 300 (reedición). Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro de Investigación INIA Tamel Aike, Coyhaique, Aysén-Patagonia, Chile. 169 pp.

Hepp, C., Reyes, C. y Muñoz, R. 2018. Análisis de datos históricos de cinco estaciones meteorológicas de la región de Aysén. Boletín Técnico N° 365. Institutp de Investigaciones Agropecuarias. Centro de Investigación INIA Tamel Aike, Coyhaique, Chile. 200 pp.

Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA. 2024. Acceso a estaciones meteorológicas automáticas: <https://agrometeorologia.cl/>

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. 2014. Manual de agricultura de precisión / IICA, PROCISUR - Montevideo: IICA

Jackson, R. D., & Huete, A. R. 1991. Interpreting vegetation indices. Preventive Veterinary Medicine, 11(3-4), 185-200.

Köppen, W., 1918: Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahresablauf (Clasificación de climas según temperatura, precipitación y ciclo estacional.). Petermanns Geogr. Mitt., 64, 193-203, 243-248.

Li, X., Liu, M., & Jiang, L. 2019. Remote sensing technology applied in crop water requirements monitoring. Remote Sensing Technology and Application, 34(5), 874-880.

López, R. 2016. Manejo y uso eficiente del agua de riego intrapredial para el sur de Chile. Boletín INIA N°340, 156p. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Centro Regional de Investigación Carillanca. Temuco, Chile.

- Martin de Santa Ollala, F. y J. de Juan Valero.** 1992. *Agronomía del Riego*. Madrid, España. Ediciones Mundi-Prensa. 732 p.
- Moran, M. S., Clarke, T. R., Inoue, Y., & Vidal, A.** 1994. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 49(3), 246-263.
- Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C.** 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9), 503-510.
- Rouse Jr, J. W., Haas Jr, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W.** 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *NASA Special Publication*, 351, 309-317.
- Rouse, J. W., Jr., Haas, R. H., Deering, D. W., Schell, J. A.** 1973. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation: Progress Report RSC 1978-2
- Santibañez, F., Santibañez, P., Caroca, C., González, M., Huiza, F., Perry, P. y Mellán, C.** 2015. Evapotranspiración de referencia para la determinación de las demandas de riego en Chile. *Centro Agrimed, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, Santiago, Chile*. 108 pp.
- Servicio de Conservación de Recursos Naturales.** 2000. Cálculo de la humedad del suelo por tacto y apariencia. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. 12 p.
- Smith, J. A., Brown, M., Fitzsimmons, J., & Edwards, J.** 2018. Satellite remote sensing and drought monitoring for agricultural applications. *Journal of the American Water Resources Association*, 54(2), 463-476.
- Stolpe, N. y Hepp, C.** 2019. Caracterización taxonómica de los suelos de los valles de interés agropecuario de la región de Aysén (Patagonia Occidental - Chile). *Boletín INIA N° 299 (reedición)*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro de Investigación INIA Tamel Aike, Coyhaique, Aysén-Patagonia, Chile. 168 pp.
- Tarjuelo Martín-Benito, J. M.** 2005. *El riego por aspersión y su tecnología*. Mundi-Prensa, Madrid, España. 581 p.
- Thenkabail, P. S., Lyon, J. G., Huete, A., & Huete, A. R.** 2009. *Hyperspectral remote sensing of vegetation*. CRC Press.

- Thenkabail, P. S., Lyon, J. G., Huete, A., & Huete, A. R.** 2015. Advances in hyperspectral remote sensing of vegetation and agricultural croplands. *Remote Sensing of Environment*, 160, 1-13.
- Varela, F.** 2016. Efecto del tipo de secado en las propiedades índice y compresibilidad de suelos de origen volcánico. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Wang, L., Huang, J., Zhang, Y., Sun, W., Shi, S., Chen, S., & Yang, G.** 2018. Assessing water stress of winter wheat using unmanned aerial vehicle multispectral imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*, 151, 257-265.
- Wright, J.L.** 1982. New Evapotranspiration Crop Coefficients. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108: 57-74.
- Zhou, X., Zhang, M., Wang, Z., Yu, M., & Wang, Y.** 2018. Retrieval of actual evapotranspiration and crop coefficients from remote sensing data in the Weihe River Basin, China. *Remote Sensing*, 10(1), 110.
- Zonas Agrícolas de Índices de Vegetación** Derivados de Landsat-8 y Sentinel2 Comparison and Adjustment in Agricultural Areas of Vegetation Indexes Derived from Landsat-8 and Sentinel-2." <http://idearm.imida.es/aet2017>.





Boletín INIA / N° 499
www.inia.cl

