



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

TESIS DOCTORAL

**EVALUACIÓN DE GERMOPLASMA FORRAJERO Y
CARACTERIZACIÓN DE PRADERAS A TRAVÉS
DEL USO DE TELEDETECCIÓN Y SIG**

**FORAGE GERMPASM EVALUATION AND GRASSLAND
CHARACTERIZATION THROUGH THE USE OF REMOTE SENSING AND GIS**



MARCELO DOUSSOULIN GUZMÁN

ENERO, 2022

TITULO: *EVALUACIÓN DE GERMOPLASMA FORRAJERO Y
CARACTERIZACIÓN DE PRADERAS A TRAVÉS DEL USO DE
TELEDETECCION Y SIG*

AUTOR: *Marcelo Doussoulin Guzmán*

© Edita: UCOPress. 2022
Campus de Rabanales
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A
14071 Córdoba

<https://www.uco.es/ucopress/index.php/es/>
ucopress@uco.es



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GRÁFICA Y
GEOMÁTICA

Programa de Doctorado: Ingeniería Agraria, Alimentaria, Forestal y de Desarrollo Rural
Sostenible

TESIS DOCTORAL

**EVALUACIÓN DE GERMOPLASMA FORRAJERO Y CARACTERIZACIÓN
DE PRADERAS A TRAVÉS DEL USO DE TELEDETECCIÓN Y SIG**

**Forage germplasm evaluation and grassland characterization through the use of
remote sensing and GIS**

Directores: Dr. Alfonso García-Ferrer Porras

Dr. Francisco Mesas Carrascosa

Autor: Marcelo Doussoulin Guzmán

Enero, 2022

TITULO: EVALUACIÓN DE GERMOPLASMA FORRAJERO Y
CARACTERIZACIÓN DE PRADERAS A TRAVÉS DEL USO DE
TELEDETECCIÓN Y SIG

AUTOR: Marcelo Doussoulin Guzmán



TÍTULO DE LA TESIS:
EVALUACIÓN DE GERMOPLASMA FORRAJERO Y CARACTERIZACIÓN DE PRADERAS A TRAVÉS DEL USO DE TELEDETECCIÓN Y SIG

DOCTORANDO/A:

Marcelo Alejandro Doussolin Guzmán

INFORME RAZONADO DEL/DE LOS DIRECTOR/ES DE LA TESIS

(se hará mención a la evolución y desarrollo de la tesis, así como a trabajos y publicaciones derivados de la misma).

El doctorando ha realizado un trabajo de investigación adecuado, incorporando disciplinas distintas a aquellas en las que se basa su formación y ha demostrado su capacidad e independencia en el trabajo que se debe requerir a todo egresado con el grado de doctor. Sus investigaciones han sido parcialmente evaluadas por expertos anónimos en la revista donde se ha publicado parte de su investigación, lo cual también avala el trabajo realizado.

Por todo ello, se autoriza la presentación de la tesis doctoral.

Córdoba, 31 de enero de 2021

Firma de los directores

Fdo.: Alfonso García-Ferrer Porras

Fdo: Francisco Javier Mesas Carrascosa

AGRADECIMIENTOS

Quisiera comenzar estas palabras, agradeciendo a mi familia por todo el apoyo que me dieron y la infinita paciencia que tuvieron conmigo durante este largo proceso. A mi esposa Claudia por sus sabios consejos y llamados a la calma en los momentos que más lo necesitaba y a mis hijas Carla y Constanza, por el tiempo que me regalaron para poder desarrollar este trabajo y por sus palabras de ánimo y abrazos que tanto me motivaban.

La realización de este doctorado no estuvo exenta de momentos de confusión, desesperación y angustia, pero gracias al constante apoyo de mis profesores directores de tesis los pude superar. Mi eterna gratitud para Alfonso García-Ferrer Porras y para Francisco Javier Mesas Carrascosa, ya que sin su valioso apoyo y oportunas intervenciones, no estaría escribiendo estas palabras; su ayuda y compromiso fueron fundamentales para terminar este programa de doctorado ¡muchas gracias!

Me gustaría agradecer a todas las personas que de una u otra manera aportaron un granito de arena para terminar este proceso, pero de manera especial quisiera agradecer a mis amigos Juan Alberto Barrera, Álvaro Ferrada y Pamela Williams, por haber estado siempre disponibles para escucharme y por haberme apoyado durante todos estos años. No puedo dejar de mencionar a mis compañeros de trabajo, Jorge Campos y Christian Guajardo, quienes me ayudaron de manera importante en el desarrollo de los estudios realizados en terreno, al igual que los estudiantes de agronomía en esa época, ahora colegas, Viviana Hurtado y Sergio Cortés. También agradezco a Constanza Gutiérrez y a Fernando Pérez Porras, por su valiosa cooperación en la etapa final de este trabajo. Aprovecho de extender estos agradecimientos al equipo de trabajo del Departamento de Ingeniería Gráfica y Geomática de la Universidad de Córdoba.

Termino estas palabras agradeciendo a la Universidad de Concepción y a la Universidad de Córdoba, por haberme dado la oportunidad de cursar el programa de doctorado en Ingeniería Agraria, Alimentaria, Forestal y de Desarrollo Rural Sostenible, y otorgado facilidades y apoyo para poder terminarlo.

Las praderas son ecosistemas con una amplia distribución a nivel mundial y se caracterizan por ser una comunidad compleja debido a la existencia de relaciones entre las especies prateras, y entre ellas y el ambiente. Si bien la pérdida de praderas se ha debido principalmente a la intensificación agrícola y el cambio de uso de suelo, actualmente se encuentran sometidas a las amenazas y cambios ambientales. El cambio climático es uno de los factores ambientales que más influye sobre las praderas y potencialmente puede reformar los patrones de crecimiento de las comunidades de plantas al cambiar su fenología, lo que es causado principalmente por la disminución de las precipitaciones que reducen la productividad de las praderas. A medida que los climas en todo el planeta se vuelven más cálidos y los patrones de precipitación muestran variaciones significativas, comprender la distribución, fisiología y fenología de las praderas resulta fundamental para predecir la función del ecosistema y la resiliencia del mismo al cambio climático.

En consideración a la problemática ambiental existente, los importantes cambios tecnológicos que se han generado a nivel de mejoramiento genético del material forrajero y de las herramientas de teledetección; y la complejidad e importancia de la evaluación de praderas de manera tradicional, surge la necesidad de estudiar el germoplasma forrajero y su adaptación a estos nuevos escenarios aplicando las nuevas tecnologías disponibles. En este contexto, esta tesis presenta los hallazgos de tres trabajos cuyos objetivos pretenden dar respuesta a la problemática expuesta.

El primer trabajo tuvo como objetivo evaluar la adaptación de praderas de alfalfa (*Medicago sativa*) con distintos grados de latencia invernal, bajo riego, en las condiciones ambientales actuales de la Región de Ñuble, Chile. Para cuantificar la adaptación, se midió la disponibilidad, producción y composición química del forraje, además de algunos componentes estructurales de las plantas (proporción y tamaño de hojas). Los resultados de este estudio permitieron concluir que no se evidencian diferencias en productividad o calidad del forraje entre los cultivares evaluados, por lo que se puede decir que el cambio de las condiciones ambientales ha permitido que variedades de alfalfa menos tolerantes al frío, como las de latencia 9, se adapten en la Región Ñuble dadas sus nuevas condiciones ambientales, lo cual permitiría elaborar nuevas pautas de recomendaciones de uso de alfalfa según su latencia y zona geográfica.

El segundo trabajo llevado a cabo, abordó la evaluación de praderas compuestas por ballica perenne (*Lolium perenne* L.) y trébol blanco (*Trifolium repens* L.) con distinto tamaño de hoja

(dado por su distinta composición genética), para determinar el comportamiento morfológico de tres cultivares de trébol blanco. A través de este estudio se pudo constatar que variedades de trébol blanco de hoja grande, como Kopu II, presentan mayor área foliar y peso de la hoja, que los tréboles de hoja mediana, no encontrando diferencias en la capacidad estolonífera, al menos durante el primer año de crecimiento, lo que sugiere que existen avances en el mejoramiento genético en tréboles blancos de hoja grande, haciéndolos más competitivos al crecer en mezcla con gramíneas, lo que permitiría mejorar la productividad y longevidad de la pradera mixta y facilitar su manejo.

En el último trabajo realizado, se evaluó la condición de crecimiento de las praderas, específicamente en su fenología, usando la Teledetección como una herramienta para ello. El objetivo fue hacer un seguimiento de la fenología de las praderas en Bío Bío, Chile, para identificar posibles alteraciones originadas por el cambio climático, utilizando imágenes del Espectrorradiómetro de imágenes de media resolución (MODIS), el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y series de tiempo. Los hallazgos sugieren que las condiciones climáticas en Bío Bío se han vuelto más propicias para el crecimiento de las praderas, durante el período 2001-2020. Los resultados de este estudio destacan la relación entre la fenología de la pradera y su respuesta a las variables climáticas de precipitación acumulada y temperatura, lo que tiene implicaciones para el desarrollo de marcos de políticas para el manejo y protección de las praderas y su relación con el cambio del clima.

Si bien es cierto que los cambios ambientales en términos de temperatura y precipitaciones se han evidenciado desde hace un tiempo, es necesario ir validando su efecto en los materiales forrajeros, dado que la respuesta productiva de éstos puede diferir entre zonas de un área geográfica definida. Otro aspecto a considerar en la evaluación de praderas, es el avance generado en términos de mejoramiento genético del germoplasma forrajero, en el que se reconocen mejoras significativas en productividad, calidad como alimento para el ganado y persistencia al formar praderas (adaptación). Por último, en el contexto de cambio climático y considerando las limitantes espaciales y de manejo que tiene la evaluación tradicional de praderas, se plantea que utilizando como insumo imágenes satelitales y bases de datos climáticas de uso público, se pueden generar herramientas de monitoreo de las praderas a través de la de teledetección.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Praderas	3
1.1.1 Definición: Aspectos generales.....	3
1.1.2 Componentes vegetacionales de una pradera.....	6
1.1.3 Ecología o dinámica de una pradera en el tiempo	8
1.1.4 Degradación ecológica de una pradera.....	8
1.1.5 Zonas homogéneas en Chile y zona de Ñuble y Bío Bío.....	10
1.1.6 Praderas en Chile y zona de Ñuble y Bío Bío.....	12
1.1.7 Praderas en la zona de Ñuble y Bío Bío	12
1.2 Evaluación de praderas	13
1.2.1 Evaluación de disponibilidad de fitomasa aérea.....	14
1.2.1.1 Método directo.....	14
1.2.1.2 Métodos indirectos.....	14
1.2.2 Evaluación de la composición botánica	17
1.2.2.1 Evaluación de densidad (número).....	17
1.2.2.2 Evaluación de frecuencia.....	18
1.2.2.3 Evaluación de cobertura.....	18
1.2.2.4 Evaluación morfológica de las plantas y sus componentes.....	18
1.2.2.5 Técnicas usadas en la evaluación botánica de praderas	20
1.2.3 Evaluación de la composición química del forraje de la pradera.....	22
1.2.3.1 Determinación de humedad.....	22
1.2.3.2 Determinación de pH	23
1.2.3.3 Determinaciones de la composición nutricional del forraje.....	23
1.3 Referencias	27
CAPÍTULO 2 OBJETIVOS DE LA TESIS	37

CAPÍTULO 3 EVALUACIÓN AGRONÓMICA Y ADAPTACIÓN DE VARIEDADES DE ALFALFA (<i>MEDICAGO SATIVAL</i>.) CON DISTINTOS GRADOS DE LATENCIA EN LA REGIÓN DE ÑUBLE.....	39
3.1 Resumen	39
3.2 Summary.....	40
3.3 Introducción.....	40
3.4 Materiales y métodos	44
3.4.1 Ubicación del estudio	44
3.4.2 Características del suelo	44
3.4.3 Especie forrajera usada y sus variedades	44
3.4.4 Siembra y manejos agronómicos durante el primer año de estudio.....	45
3.4.5 Evaluaciones	47
3.4.6 Análisis de datos.....	48
3.5 Resultados y discusión.....	49
3.5.1 Altura de la pradera.....	49
3.5.2 Área Foliar	51
3.5.3 Proporción de Hojas	52
3.5.4 Disponibilidad y Rendimiento de Materia Seca.....	54
3.5.5 Composición Química del Forraje	58
3.6 Conclusiones	60
3.7 Referencias	60
3.8 Anexos	62
CAPÍTULO 4 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MORFOLÓGICO DE TRES CULTIVARES DE <i>TRIFOLIUM REPENS</i> L. CON DISTINTO TAMAÑO DE HOJA, FORMANDO UNA PRADERA MIXTA CON <i>LOLIUM PERENNE</i> L. EN CHILLÁN, REGIÓN DE ÑUBLE... 	65
4.1 Resumen	65
4.2 Summary.....	66
4.3 Introducción.....	66

4.4 Materiales y método	69
4.4.1 Cultivares utilizados	69
4.4.1.1 Trébol blanco	69
4.4.2 Antecedentes de la pradera.....	70
4.4.3 Siembra y diseño experimental	70
4.4.4 Fertilización del Suelo	70
4.4.5 Riego	71
4.4.6 Control de malezas	71
4.4.7 Evaluaciones	71
4.4.8 Análisis estadístico	72
4.5 Resultados y discusión	73
4.5.1 Área foliar	73
4.5.2 Largo de pecíolo.....	74
4.5.3 Peso seco de la hoja.....	74
4.5.4 Contenido de materia seca de la hoja.....	75
4.5.5 Frecuencia de aparición de estolones.....	76
4.6 Conclusiones	79
4.7 Referencias	79
4.8 Anexos	82
CAPÍTULO 5 GRASSLAND PHENOLOGY RESPONSE TO CLIMATE CONDITIONS IN BÍO BÍO, CHILE FROM 2001 TO 2020.....	83
5.1 Abstract	84
5.2 Introduction	84
5.3 Materials and methods	87
5.3.1 Study Area	87
5.3.2 Evolution of Climatic Variables.....	88
5.3.3 Datasets and Image Processing.....	92
5.3.4 NDVI Time-series	93
5.3.5 Statistical Analysis	94

5.4 Results	94
5.4.1 NDVI Time-series	94
5.4.2 Analysis of Relations between Climatic Variables and NDVI.....	96
5.5 Discussion	101
5.6 Conclusions	104
5.7 Appendix A.....	105
5.8 References	108
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES FINALES.....	117

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 3

Tabla 3.1. Categorías según los distintos grados de latencias descritas por el Certified Alfalfa Seed Council.....	41
Tabla 3.2. Variedades de alfalfa utilizadas con su grado de latencia.	45
Tabla 3.3. Altura (cm) no disturbada de la pradera por cada latencia, previo al uso. (2ª temporada). Provincia de Diguillín, Región Ñuble.....	49
Tabla 3.4. Altura (cm) no disturbada de los tratamientos agrupados por latencia 4, 6 y 9 previo a cada uso. (2ª temporada). Provincia de Diguillín, Región Ñuble.....	50
Tabla 3.5. Área foliar (mm ²) por hojas de cada latencia, (2ª temporada). Provincia de Diguillín, Región de Ñuble.....	51
Tabla 3.6. Área foliar (mm ²) por hojas de cada tratamiento agrupados por latencia 4, 6 y 9. 2ª temporada. Provincia de Diguillín, Región de Ñuble.	52
Tabla 3.7. Proporción de hojas (% BMS) de las plantas de cada latencia, previo a cada uso. 2ª temporada. Provincia de Diguillín, Región de Ñuble.	53
Tabla 3.8. Proporción de hojas (% BMS) de los tratamientos agrupados por latencia 4, 6 y 9. (2ª temporada). Provincia de Diguillín, Región de Ñuble.	54
Tabla 3.9. Disponibilidad (kg MS x ha ⁻¹) y rendimiento (kg MS x ha ⁻¹ x Temporada ⁻¹) de cada latencia. (2ª temporada). Provincia de Diguillín, Región de Ñuble.	55
Tabla 3.10. Disponibilidad (kg MS x ha ⁻¹) de los tratamientos de latencia 4, 6 y 9. (2ª temporada). Provincia de Diguillín, Región de Ñuble.	56
Tabla 3.11. Rendimiento (kg MS x ha ⁻¹) de los tratamientos de latencia 4, 6 y 9. 1ª y 2ª temporada. Provincia de Diguillín, Región de Ñuble.....	57
Tabla 3.12. Rendimiento por latencia. 1ª y 2ª temporada (kg MS ha ⁻¹ x Temporada ⁻¹) y rendimiento total (kg MS x ha ⁻¹). Provincia de Diguillín, Región de Ñuble.	57
Tabla 3.13. Composición química de forraje de una pradera de Medicago sativa L. por época del año y tratamientos. Temporada 2016. Provincia de Diguillín. Región de Ñuble.	58

CAPÍTULO 4

Tabla 4.1. Área foliar de Trifolium repens L. (cm ² x hoja ⁻¹).....	73
Tabla 4.2. Largo de pecíolo de Trifolium repens (cm).....	74

Tabla 4.3. Peso seco de la hoja *Trifolium repens* (g MS x hoja⁻¹).....75

Tabla 4.4. Materia seca de hojas de *Trifolium repens* L., por fecha y tratamiento (%).....75

CAPÍTULO 5

Table 5.1. Start and End of growing Season of grassland in Biobio from 2001 to 2020 by agro-climatic regions.97

Table 5.2. Correlation between monthly NDVI with accumulated rainfall, maximum and minimum temperatures at different intervals.97

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 3

Figura 3.1. Distribución de tratamientos.....46

CAPÍTULO 4

Figura 4.1. Distribución de los tratamientos y dimensión de parcelas.71

Figura 4.2. Presencia de plantas con estolón primario en los diferentes cultivares.76

Figura 4.3. Presencia de plantas con estolón secundario en los diferentes cultivares.77

Figura 4.4. Presencia de plantas con estolón terciario en los diferentes cultivares.78

CAPÍTULO 5

Figure 5.1. Study area: a) general context and b) agro-climatic regions in Biobio (Chile)...87

Figure 5.2. Variation density distribution graph of a) accumulated rainfall, b) maximum and c) minimum temperature in Biobio from 2001 to 2020 for the agro-climatic areas: 1) Secano Costero, 2) Secano interior, 3) Depresión Intermedia, 4) Cordón Isla, 5) Precordillera and, 6) Cordillera.....89

Figure 5.3. Trends of: a) accumulated rainfall, b) maximum and c) minimum temperature in Biobio from 2001 to 2020 for the agroclimatic areas: 1) Secano Costero, 2) Secano interior, 3) Depresión Intermedia, 4) Cordón Isla, 5) Precordillera and, 6) Cordillera.91

Figure 5.4. Flowchart describing the methodology of remote sensing and climatic data to describe phenology of grasslands in Biobio from 2001 to 2020.93

Figure 5.5. Boxplot of mean monthly NDVI values in Biobio from 2001 to 2020 for the agro-climatic areas: a) Secano Costero, b) Secano interior, c) Depresión Intermedia, d) Cordón Isla, e) Precordillera and, f) Cordillera.95

Figure 5.6. Trends of NDVI over 2001-2020 for each agro-climatic region of Biobio.....99

Figure 5.7. Evolution of phenological metrics: a) start of season, b) end of season, c) peak value of season and d) NDVI at the peak, as a function of year from 2001 to 2020 in the six agro-climatic regions of Biobio: 1) Secano Costero, 2) Secano interior, 3) Depresión Intermedia, 4) Cordón Isla, 5) Precordillera and, 6) Cordillera.100

ÍNDICE DE APÉNDICES**CAPÍTULO 5**

Figure 5.A.1. Box-plot of accumulated rainfall per month for the agro-climatic areas of Biobío: a) Secano Costero, b) Secano interior, c) Depresión Intermedia, d) Cordón Isla, e) Precordillera and, f) Cordillera.....	105
Figure 5.A.2. Box-plot of accumulated rainfall per month for the agro-climatic areas of Biobío: a) Secano Costero, b) Secano interior, c) Depresión Intermedia, d) Cordón Isla, e) Precordillera and, f) Cordillera.....	106
Figure 5.A.3. Box-plot of accumulated rainfall per month for the agro-climatic areas of Biobío: a) Secano Costero, b) Secano interior, c) Depresión Intermedia, d) Cordón Isla, e) Precordillera and, f) Cordillera.....	107
Figure 5.A.4. NDVI seasonal analysis with raw MODIS and fitted data marked as start of season and end of season from 2001 to 2020 in the six agro-climatic regions of Biobío: a) Secano Costero, b) Secano Interior, c) Depresión Intermedia, d) Cordón Isla, e) Precordillera and f) Cordillera.....	108

ÍNDICE DE ANEXOS

CAPÍTULO 3

Anexo 3.1. Análisis de suelo inicial por cada tratamiento (20 cm de profundidad).....62

Anexo 3.2. Análisis de suelo inicial del terreno por cada tratamiento (continuación).....63

CAPÍTULO 4

Anexo 4.1. Precipitación promedio mensual (mm), Agromet INIA, Estación Santa Rosa. Chillán, Chile.82

Anexo 4.2. Germinación (%), semillas ($N^{\circ} \times kg^{-1}$), dosis de siembra ajustada ($kg \times ha^{-1}$). ...82

Anexo 4.3. Temperatura del aire máxima diaria ($^{\circ}C$), Agromet INIA, Estación Santa Rosa. Chillán, Chile.82

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

Las praderas son ecosistemas con una amplia distribución a nivel mundial, cuya vegetación predominante son pastos. Se caracteriza por ser una comunidad ecológica compleja debido a la existencia de relaciones entre las especies pratenses, y entre ellas y el ambiente (López & Valentine, 2003). A pesar de su importancia global, las praderas también incluyen algunos de los ecosistemas más amenazados del planeta, siendo actualmente considerado un bioma en peligro de extinción (Gibson & Newman, 2019). Si bien la pérdida de praderas se ha debido principalmente a la intensificación agrícola y el cambio de uso de suelo, actualmente se encuentran sometidas a las amenazas y cambios ambientales, como el cambio climático, los incendios, las concentraciones elevadas de dióxido de carbono atmosférico, la deposición de nitrógeno, las especies invasoras, la fragmentación del hábitat, la degradación debido al pastoreo excesivo, la expansión de plantas leñosas y el abandono (Blair *et al.*, 2014; Gibson & Newman, 2019).

Dentro de las amenazas ambientales, el cambio climático es, sin duda, la influencia más grande sobre las praderas pues tiene el potencial para reformar los patrones de crecimiento de las comunidades de plantas al cambiar su fenología (Wang *et al.*, 2020). Esto ocurre gracias a que el cambio climático influye en los patrones de precipitación y la presencia de sequía, la cual reduce la productividad de las plantas, induce una mortalidad vegetal generalizada y limita la distribución geográfica de las mismas (Craine *et al.*, 2013). Desde el punto de vista del uso de las praderas para la producción de forraje, existen actualmente cada vez más pruebas de que el impacto del cambio climático en la productividad de las praderas dependerá, en parte, de su biodiversidad. Altas tasas de biodiversidad en las praderas les pueden conferir estabilidad a los ecosistemas frente a cambios ambientales de esta

envergadura. Sin embargo, al intentar uniformar las praderas con fines productivos, se altera su cantidad y calidad en términos de productividad (van Oijen *et al.*, 2018). Existe la necesidad entonces de encontrar el equilibrio exacto entre productividad de las praderas y su supervivencia, especialmente en el contexto del cambio climático.

Chile no ha sido ajeno al fenómeno del cambio climático y su efecto sobre todos los biomas del territorio, incluidas las praderas. De hecho, en los últimos años se ha observado un aumento de la temperatura media en el país, con una tendencia lineal de +0,14 °C por década durante los últimos 50 años (1961-2020) (DGAC, 2021). Además las proyecciones a futuro indican que esta será una tendencia que se mantendrá en el tiempo, esperándose que las temperaturas máximas y mínimas aumenten en todo el territorio a lo largo de todas las estaciones del año hacia finales del siglo XXI (Araya-Osses *et al.*, 2020). Por otra parte, la precipitación en el territorio, a partir del año 2007, se ha presentado bajo el promedio comprendido entre los años 1961 a 1990, alcanzando el año 2020 un déficit de 26%. Estos déficits de precipitación, abarcando 14 años consecutivos, han favorecido a la extensa sequía que afecta a Chile (DGAC, 2021). Hacia el futuro, esta disminución pluviométrica y la reducción en la capacidad de regulación hidrológica de las cuencas en los Andes tendría graves efectos sobre la disponibilidad de agua, la cual es fundamental para el desarrollo de la agricultura en todo el país y especialmente en las zonas de riego (Santibáñez, 2017). Se ha visto que transformaciones ambientales de este tipo en los territorios tendrán consecuencias multidimensionales en especial sobre el ganado, que aumentará sus índices patológicos durante eventos climáticos extremos, afectándose también otros factores críticos para la producción ganadera, como disponibilidad de agua y forraje a partir de las praderas que les alimentan (Nardone *et al.*, 2010; Rojas-Downing *et al.*, 2017; West, 2003).

A medida que los climas en todo el planeta se están volviendo más cálidos, y los patrones de precipitación muestran variaciones significativas, tanto hoy como en el futuro, comprender la distribución, fisiología y fenología de las plantas resulta fundamental para predecir la función del ecosistema y la resiliencia del mismo al cambio climático. Por otra parte, analizar y determinar cómo los cambios fenológicos afectan a la producción de biomasa durante las diferentes etapas de crecimiento de las praderas es la clave para comprender como éstas responden al cambio climático, y permitirá actuar frente a estas respuestas. Para ello, existen una serie de técnicas y metodologías, que permiten no sólo evaluar las praderas en el instante, sino aportar elementos y variables fundamentales para describir su comportamiento a futuro.

1.1 Praderas

1.1.1 Definición: Aspectos generales

En términos generales, las praderas son ecosistemas definidos como tierras en las que la vegetación predominante son pastos (Forage & Grassland Terminology Committee, 1991) con predominancia graminoide en un paisaje abierto, con baja o nula presencia de árboles y arbustos. Las praderas y otros hábitats dominados por pastos y gramíneas pueden encontrarse en todos los continentes, excepto en la Antártida (con algunas excepciones, como el *Deschampsia antártica*) (Anderson, 2006; Fasanella *et al.*, 2017). Aquellas praderas que incluyen sabanas, estepas, tundras, y matorrales abiertos y cerrados suelen denominarse praderas naturales (Sanderson *et al.*, 2009). Éstas se encuentran dominadas por especies nativas y en su mayoría están controladas por procesos naturales. Por su parte, el término pradera “no natural” si bien tiende a la ambigüedad y no es ampliamente utilizado en la literatura, puede atribuirse a praderas que han sido creadas en ocasiones plantando especies no nativas o favoreciendo las especies naturales de la pradera, con clara influencia humana. En este caso, el término "seminatural" es más ampliamente utilizado para describir este tipo de praderas (Faber-Langendoen & Josse, 2010). A esta clasificación se suma el clima como elemento determinante. Aquellas praderas que resultan de las condiciones climáticas predominantes suelen ser las praderas naturales, a diferencia de las praderas plantadas, seminaturales o artificiales. Además, las praderas climáticamente determinadas suelen sujetas a sequías periódicas, lo que contribuye a la acumulación de detritos vegetales altamente inflamables y a la ocurrencia de incendios periódicos (Blair *et al.*, 2014).

Las praderas cubren más área que cualquier otro tipo de bioma en el mundo, alcanzando una cobertura del 31 al 43 por ciento de los hábitats terrestres. Su principal relevancia radica en que ofrecen una gran variedad de servicios ecosistémicos que incluyen almacenamiento de carbono, depósitos de biodiversidad y biocombustibles (Gibson & Newman, 2019). En este mismo sentido, juegan un rol crítico en la conservación de los recursos naturales, desempeñando un papel importante en la prevención de la desertificación y la conservación del suelo y el agua en las regiones áridas y semiáridas (Lu *et al.*, 2019).

Por otra parte, las praderas mantienen una larga e íntima relación con el ser humano, debido a que históricamente le han aportado plantas, desde aquellas con propiedades medicinales e industriales, hasta las que utiliza mundialmente en la producción de forrajes para el ganado (Katata *et al.*, 2020; Zarei *et al.*, 2020). Se cree que los seres humanos modernos se originaron en las praderas abiertas y las sabanas de África, lugar donde las praderas le proporcionaron

la materia prima biológica para el desarrollo de la agricultura, con el protagonismo de pastos que lograron domesticarse, como el maíz, el arroz, el trigo, la avena y el sorgo (Blair *et al.*, 2014). En este mismo sentido, las praderas no solo son utilizadas directamente por los humanos, sino que también apoyan la producción de ganado doméstico para uso humano, asociándose a su alimentación humana de manera indirecta. Las praderas, ligadas a la ganadería, presentan una gran diversidad de especies de plantas son el núcleo de la producción de forrajes en todo el mundo (Bellocchi & Picon-Cochard, 2021). La forma en que el ser humano interactúa en las actividades pastoriles con la pradera es diversa, variando en su grado de intensidad de manejo y pudiéndose catalogar de acuerdo con a dicho criterio. Así, su clasificación comprende desde praderas y sabanas con manejo de tipo extensivo, con tasas de carga animal y regímenes de incendios como principales variables de manejo, hasta praderas con manejo intensivo con regímenes de fertilización, riego y cambios de especies (Verchot *et al.*, 2006).

Las praderas se pueden localizar en una amplia diversidad de regiones y climas a nivel mundial, así como a diferentes alturas a las cuales están adaptadas. Existen praderas en áreas costeras cerca del nivel del mar y en regiones montañosas en elevaciones de hasta 4.500 m como páramos neotropicales y prados o parques montañosos templados. Aquellas praderas gestionadas intensivamente, plantadas y mantenidas por los humanos (por ejemplo, pastos, céspedes, etc.) son posibles de encontrar en todo el mundo, dada su gestión altamente controlada la cual permite su adaptación artificial a múltiples territorios (Blair *et al.*, 2014). Respecto a la variabilidad de los tipos de praderas, según Dixon (2014), existen 49 tipos de pastizales taxonómicamente y espacialmente distintos, dispuestos en todo el mundo, siendo su distribución y variedad dominante en al menos una ecorregión muy variable (Dixon *et al.*, 2014). La principal consecuencia de esta distribución tan vasta es el amplio rango de temperatura media anual y precipitaciones a las cuales las praderas se encuentran sometidas, con climas que varían de templado a tropical con precipitaciones anuales que oscilan entre 250 mm x año⁻¹ en las praderas áridas y más de 1000 mm x año⁻¹ en las praderas de clima mésico. Las temperaturas medias anuales varían desde cerca de 0 °C hasta alrededor de 26 °C (Blair *et al.*, 2014).

El clima y las precipitaciones determinan además los rasgos fisiológicos manifestados en la pradera. Esto determina el tipo de vía fotosintética utilizada, pudiéndose encontrar dos amplios grupos de: aquellas de estación fría (C3) y aquellas de estación cálida (C4) (Bohnert *et al.*, 2011). En los pastos de estación fría, el primer compuesto formado a partir de la fijación fotosintética de dióxido de carbono (CO₂) en la hoja contiene tres átomos de carbono (de

ahí su nombre, C3). Por lo general, los pastos de estación fría se desarrollan mejor en climas fríos y húmedos, en latitudes más altas o elevaciones más altas. La mayoría de las plantas vasculares utilizan esta vía fotosintética (y aproximadamente el 50% de todas las especies de gramíneas) (Blair *et al.*, 2014). Por su parte, los pastos de estación cálida fijan carbono en un compuesto de cuatro carbonos, de ahí su nombre, C4. Este mecanismo concentra el dióxido de carbono y facilita su absorción ante la existencia de mayores resistencias provocadas cuando los estomas se cierran en respuesta a temperaturas más altas, menor humedad del suelo y mayores niveles de luz. En esta característica radica la principal diferencia entre ambas vías fotosintéticas. Los pastos C3 no pueden concentrar CO₂ de esta manera, por lo que su crecimiento está más severamente restringido por el calor y la humedad limitada (Sanderson *et al.*, 2009). En Chile es posible encontrar gran variedad de gramíneas, cuya existencia dependerá primordialmente de la disponibilidad hídrica y la ubicación geográfica de la pradera. Por ejemplo, especies como ballica anual (*Lolium rigidum* o *L. multiflorum*) y falaris (*Phalaris aquatica*) predominarán en ambientes con fuerte restricción hídrica, mientras que especies como el pasto ovilla (*Dactylis glomerata*) y la festuca (*Festuca arundinacea*) predominarán en ambientes de secano de precordillera o secano interior y/o costero, donde suelen existir precipitaciones anuales superiores a los 800 mm (Ovalle, 2011).

Además de las gramíneas, existe otra clase de plantas las cuales suelen constituir la base de las praderas, especialmente si se destinan a pastoreo. Estas son las leguminosas, las cuales se caracterizan por su alta palatabilidad y disponibilidad de especies. Suelen asociarse a las gramíneas para mejorar las características de la pradera, cuya mezcla depende de las condiciones de pluviosidad propias de cada terreno (Ovalle, 2011). Estas mezclas, además de cultivarse para aumentar la productividad, ayudan a reducir la necesidad de fertilizantes en base a nitrógeno. Esto ocurre debido a que las leguminosas, gracias a las relaciones simbióticas que establecen a nivel de su raíz, fijan el nitrógeno de forma natural a la planta. Esto lleva, además, a un aumento potencial disponibilidad de proteína en la pradera, sin la necesidad de fertilizantes costosos y en muchas ocasiones, con graves consecuencias ambientales (Barneze *et al.*, 2019). En Chile existe una gran variedad de especies de leguminosas las cuales, al igual que las gramíneas, se establecerán de acuerdo a las condiciones agroclimáticas predominantes a nivel local. Así, especies como trébol subterráneo (*Trifolium subterraneum*) suelen constituirse como el componente principal de la pradera, en mezcla con trébol balansa (*Trifolium michelianum*), hualputra (*Medicago polymorpha*), trébol vesiculoso (*Trifolium vesiculosum*) y serradella (*Ornithopus sativus*), entre otros (Ovalle, 2011).

1.1.2 Componentes vegetacionales de una pradera

Como ecosistemas, las praderas se caracterizan por tener una cobertura relativamente alta de vegetación graminoide en un paisaje abierto, a menudo ondulado, con poca o ninguna cobertura de árboles y arbustos. No obstante, en términos generales el término pradera comprende a ecosistemas con una importante cobertura de pastos intercalados con diversos grados de vegetación leñosa, incluidas sabanas y bosques relativamente abiertos y algunos desiertos y praderas arbustivos (Blair *et al.*, 2014).

Respecto de las especies que componen las praderas, está dominada por vegetación gramínea, incluidas las gramíneas verdaderas (familia Poaceae, con alrededor de 10.000 especies en todo el mundo) (Gibson, 2009). Las especies subdominantes en las praderas incluyen leguminosas y otras hierbas (plantas herbáceas de hoja ancha), árboles y arbustos según las condiciones climáticas, los suelos y el manejo de las praderas. La diversidad de plantas en praderas nativas puede variar desde unos pocos pastos y leguminosas hasta docenas de especies nativas e introducidas (Sanderson *et al.*, 2009). Mundialmente, las especies formadoras de la matriz de la mayoría de las praderas son pastos perennes que tienen una vida relativamente larga y que pueden reproducirse sexual o asexualmente, pero también existen algunas praderas que se encuentran dominadas por especies anuales que deben reproducirse cada año, denominadas praderas anuales (Blair *et al.*, 2014). Actualmente la reducción de la biodiversidad y por ende, del valor nutricional asociado a las praderas, representa uno de los principales problemas agroecológicos que enfrentan estos ecosistemas (García-Baquero *et al.*, 2020).

La composición de la comunidad vegetal anteriormente descrita, está severamente influenciada por las interacciones entre los individuos, las cuales se encuentran restringidas por la falta de movilidad de las plantas. Esta falta de movilidad se ve subsanada por la posición espacial de las plantas respecto de sus vecinas en donde, particularmente las praderas perennes, la posición espacial suele estar limitada por la arquitectura y el crecimiento de las partes de plantas subterráneas, como las raíces (Wildová *et al.*, 2007). Cabe mencionar que las raíces ayudan en la absorción de agua y nutrientes, proporcionando una entrada de carbono (C) para el secuestro de C del suelo. Las proporciones raíz/brote se utilizan para estimar la biomasa de las raíces de los cultivos y los aportes de C (Sainju *et al.*, 2017). Respecto de la distribución de la biomasa, en su gran mayoría las praderas se caracterizan por una gran inversión en biomasa de raíces y una alta relación raíz/brote; sin embargo, la relación de biomasa descrita no es una constante. Esto se debe a que los sistemas de raíces de diferentes praderas son extremadamente variables respecto de las especies, biomasa total invertida,

tipos de raíces producidas y distribución a lo largo del perfil del suelo. Si bien muchas especies de gramíneas comparten características similares, que son: raíces finas y ramificadas, de naturaleza fibrosa, y concentradas en el perfil superior del suelo (20–50 cm superiores), las especies de herbáceas y leñosas manifiestan otra condición, coexistiendo en las praderas tipos de raíces con amplias variaciones, distribuciones de profundidad y asignación de biomasa de raíz a brotes. Dada la relación de biomasa anteriormente descrita entre la raíz y el tallo, uno de los rasgos característicos de las praderas es una asignación relativamente alta de biomasa vegetal bajo tierra que, junto con las tasas de descomposición, contribuyen a grandes acumulaciones de materia orgánica y nutrientes a nivel del suelo. Esto genera una alta fertilidad la pradera conduciendo a que las praderas sean ecosistemas ampliamente explotados con fines agrícolas (Blair *et al.*, 2014).

Desde el punto de vista del desarrollo y distribución de las plantas que componen las praderas, y hablando específicamente de las gramíneas, algunas praderas están dominadas por especies de pastos que producen macollos individuales distribuidos uniformemente por el suelo y a menudo unidos por tallos subterráneos llamados rizomas, que crecen horizontalmente debajo de la superficie del suelo, o estolones, que crecen apoyados sobre la superficie del suelo (Bonvissuto, 2011). También, existe otro grupo de praderas que están dominadas por especies que producen grupos densamente compactos de cultivadores que son distintos entre sí y a menudo separados por espacios de suelo desnudo. Por su parte, la porción aérea de la pradera de gramíneas se organiza en los denominados macollos, que son brotes individuales que crecen desde la base de la planta, constituyéndose como la unidad estructural de la gran mayoría de las especies gramíneas. Estos pueden ser vegetativos o reproductivos y constan de una o más unidades repetidas llamadas fitómeros, los cuales son las unidades de construcción básicas de todos los brotes de las praderas (Hewson, 2015; Yang *et al.*, 2020).

Respecto de las leguminosas, el desarrollo y distribución de éstas en las praderas permite dividir las en dos categorías. En primer lugar están las variedades enanas o arbustivas, las cuales en general que no requieren soporte trepador y maduran temprano, y aquellas variedades trepadoras, las cuales suelen tardar más en madurar y requieren soporte (Allaire y Brady, 2010). Habitualmente las praderas naturalizadas suelen tener una escasa abundancia de leguminosas, lo cual puede atribuirse a múltiples factores, entre los que destacan la competencia con gramíneas, los bajos niveles de fósforo disponible a nivel de suelo y la frecuencia e intensidad con que ocurre la defoliación (Hepp *et al.*, 2005).

1.1.3 Ecología o dinámica de una pradera en el tiempo

Las praderas brindan un sinnúmero de servicios ecosistémicos, como almacenamiento de carbono y nitrógeno en el suelo, control de la erosión del suelo dado que estabilizan el sitio y constituyen un hábitat común para los polinizadores y la vida silvestre (Xu & Guo, 2015). La capacidad de las praderas para continuar funcionando y haciendo esto, a pesar de los cambios y la variabilidad climática, depende de la biodiversidad vegetal, la cual se encuentra estrechamente vinculada con la salud y el funcionamiento del suelo, a través de sus efectos beneficiosos sobre los microorganismos y especies animales (Bellocchi & Picon-Cochard, 2021). Sin embargo, y en una relación recíproca, la biodiversidad depende también de los cambios ambientales, a los cuales los ciclos ecológicos de las praderas son altamente sensibles. Esta sensibilidad se expresa particularmente ante cambios en la cantidad de precipitación, así como en la estacionalidad de ésta. Otras interacciones de relevancia son las existentes entre la cantidad de lluvia y la temperatura, donde la relación entre la precipitación y la evapotranspiración potencial suele ser el mejor predictor de las propiedades ecológicas de los suelos y las praderas (Blair *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2020).

Con respecto a la dinámica de la población de las plantas que se pueden encontrar en las praderas, que va desde sus historias de vida hasta sus características reproductivas, dependen de la demografía de las especies que viven allí. Por ejemplo, las praderas templadas se pueden clasificar en dos tipos según las características del ciclo de vida de las especies de pastos dominantes: las praderas anuales y las praderas perennes. Dentro de las primeras, el reclutamiento de nuevos individuos se basa exclusivamente en la reproducción sexual. Por su parte, el reclutamiento de nuevos individuos en praderas perennes está mucho menos influenciado por la reproducción sexual y la dinámica de las semillas. En este caso, la reproducción asexual es primordial, con un rol protagónico de los rizomas y las yemas subterráneas asociadas, las cuales se constituyen como el medio principal de reproducción (Blair *et al.*, 2014).

1.1.4 Degradación ecológica de una pradera

La degradación de las praderas es motivo de creciente preocupación a nivel mundial debido a su impacto adverso sobre la productividad agronómica y su capacidad para proporcionar bienes y servicios al ser humano (Gang *et al.*, 2014). Este fenómeno puede ser definido como una disminución de la condición del suelo o de aquellos procesos que provocan una disminución o pérdida de la diversidad biológica, las funciones de los ecosistemas o los servicios de los ecosistemas (Scholes *et al.*, 2018). La degradación de las praderas además

puede ser examinada desde una perspectiva socioecológica, en la cual se consideran degradadas si el suministro de múltiples servicios ecosistémicos no llega a lo que exigen los interesados. En el fondo, una perspectiva socioecológica de la degradación de las praderas reconoce que este fenómeno altera el suministro de los servicios ecosistémicos de las praderas en relación con su demanda humana. Este enfoque es beneficioso a las partes interesadas pues proporciona un marco para orientar la restauración de las praderas degradadas con el fin de beneficiar a todos los involucrados (Bardgett *et al.*, 2021).

El cambio climático y las actividades humanas se reconocen comúnmente como los dos grandes impulsores que conducen a la degradación de las praderas. Respecto del primero, Gang *et al.* (2014) comprobaron que entre 2000 y 2010 casi la mitad (49,25%) de los ecosistemas de praderas experimentaron degradación a escala mundial, siendo el cambio climático la principal influencia (Gang *et al.*, 2014). La influencia del cambio climático se materializa en el impacto que produce sobre los ciclos del agua y las precipitaciones, así como el ciclo del carbono al alterar el intercambio de gases de las plantas (Song *et al.*, 2016).

En términos generales, la fluctuación de la cobertura vegetal en las praderas se asocia con la oscilación de las variables climáticas, especialmente en años secos (Zarei *et al.*, 2020). Durante esos años la humedad del suelo tiende a limitar el crecimiento de las plantas y los componentes de la pradera (Petersen *et al.*, 2021). La prevalencia de años secos se espera que aumente con el cambio climático. Por otra parte, y debido a que la sequía extrema reduce la productividad primaria neta en las praderas (Hoover *et al.*, 2014), se estima que el cambio climático también afecte este ámbito (Wu *et al.*, 2021). Además la elevación de la temperatura media del aire relacionada con el cambio climático acelera la madurez de la planta, lo cual influye en el valor nutritivo de la pradera como forraje (Deroche *et al.*, 2020).

Además del cambio climático, las praderas se encuentran a merced de las actividades humanas, las cuales siguen siendo uno de los principales impulsores de su degradación. El pastoreo excesivo o una mayor frecuencia de incendios reducen la cobertura vegetal, aumentando la susceptibilidad a la erosión del suelo y la desertificación (Bardgett *et al.*, 2021). Liu *et al.* (2019) seleccionaron a la productividad primaria neta real como un indicador para investigar la dinámica de las praderas de 2000 a 2013 a nivel mundial, en términos de la restauración, pero también de su degradación. Encontraron que las actividades humanas representaron alrededor del 40,11% del total de la degradación de las praderas en el globo, superando al cambio climático como principal influencia en continentes como América del Norte y Europa (Liu *et al.*, 2019).

1.1.5 Zonas homogéneas en Chile y zona de Ñuble y Bío Bío

Las condiciones geográficas y sismológicas de Chile, así como su extensión, han dado pie a la existencia de diversos ecosistemas y biomas. Estas condiciones geográficas, en conjunto a los ecosistemas que en ellas se desarrollan, han sido clasificadas en términos de macro áreas, las denominadas áreas agroecológicas homogéneas. Su relevancia radica en los potenciales de desarrollo agrícola diferenciados que pueden ser desarrollados en el país. De acuerdo a la adecuación realizada por ODEPA (2000), las áreas homogéneas en Chile son, de norte a sur: desierto, el cual posee un régimen hídrico seco; secano norte chico, caracterizado por ser una zona semiárida sin influencia marítima; secano interior, el cual considera la vertiente oriental de la cordillera de la costa; secano costero, que considera la vertiente occidental de la cordillera de la costa; valle transversal, el cual consta de sectores con moderada pendiente con clima semiárido; depresión intermedia, la cual posee una estación seca de más de cinco meses; cordón isla, el cual refiere a relieves de extensión suave no vinculados a otros de importancia en el país; el valle secano, con un régimen más húmedo que la depresión intermedia y una estación seca corta; ñadis, caracterizado por sueños de trumao con mal drenaje y alto contenido férrico; Chiloé insular y Chiloé occidental; precordillera transandina, con condiciones templadas; bosque lluvioso, donde predomina el bosque nativo lluvioso; transición, con menor pluviosidad que el bosque lluvioso y menor aridez que el coironal; y finalmente coironal en el sur, la cual corresponde a estepa patagónica. Además está la cordillera, la cual corresponde a los cordones de altura de la cordillera de los Andes que se extiende por la mayor parte del territorio así como la precordillera, que corresponde a pendientes suaves de la cordillera. Finalmente existe el territorio insular occidental, el cual corresponde a los territorios de Isla de Pascua y Juan Fernández (ODEPA, 2000).

La zona de estudio, comprendida por las actuales Regiones de Bío Bío y Ñuble, se encuentra en la zona centro sur de Chile. Esta zona comprende los territorios emplazados entre las Regiones del Maule al Bío Bío. Esta área presenta un clima mediterráneo, con períodos fríos y húmedos en invierno, y secos y calurosos en verano, con una gran variación en las precipitaciones interanuales. Las áreas agroecológicas homogéneas que se encuentran en este territorio son el secano costero, el secano interior, cerro isla, el valle central regado y la precordillera andina. La primera zona es el secano costero en esta zona se caracteriza por poseer una amplitud térmica menor que las otras tres áreas agroclimáticas dada la influencia oceánica. La temperatura mínima del mes más frío que ocurre en julio, y es de 7,3°C mayor que la que se registra en las otras áreas (4,7°C para el secano interior, 3,7°C para el valle regado y 4,2 °C para la precordillera andina). El mes más cálido se registra en enero, y la

temperatura máxima (18,7°C) es menor a las que registran otras áreas (27, 28,7 y 27,9°C para el secano interior, valle central y precordillera, respectivamente). La segunda zona es el secano interior, el cual presenta una menor precipitación que el secano costero y que el valle central debido a la presencia de la cordillera de la costa (Dietl & Fernández, 2009). Tanto esta zona como la del secano costero poseen una condición de altas pendientes y una baja disponibilidad de agua, por ello, la superficie regada es limitada y basada en riego localizado. Un aspecto de importancia a considerar es la presencia dominante de pradera natural, cuyas características de volumen producido y calidad de forraje no permiten mayor desarrollo tecnológico de las actividades agrícolas en la zona (González, 2020). La tercera zona, el valle central, posee temperaturas similares a las del secano interior, pero mayor precipitación, menor evapotranspiración y suelos con una alta capacidad de almacenamiento de humedad (Dietl & Fernández, 2009). Esta zona se caracteriza por una mayor oferta de forrajes de praderas y cultivos suplementarios, lo cual ofrece mayores posibilidades para desarrollar sistemas de producción semi extensivos e intensivos, con una carga animal por hectárea superior comparada a otras zonas agroecológicas. Además, este territorio se caracteriza por presentar una mayor diversidad de praderas y forrajes suplementarios, lo cual facilita la diversificación e intensificación de la ganadería (González, 2020). La última zona es la precordillera andina, la cual posee la mayor precipitación de todas las áreas, registrando además las menores temperaturas (Dietl & Fernández, 2009). Esta zona agroecológica se caracteriza por poseer una oferta forrajera potencial relevante, con sistemas de producción en su mayoría extensivos, y en algunas ocasiones, semi intensivos. La base alimentaria es predominantemente pradera natural con baja producción de forraje, estacionalidad y calidad. Sin embargo, en esta zona existe una amplia diversidad de especies forrajeras mejoradas, permanentes y cultivos suplementarios. Esta característica es la que permite que en esta zona también sea posible encontrar sistemas de producción animal intensivos. Las praderas se pueden utilizar de variadas maneras, dado que las condiciones edafoclimáticas más favorables así lo permiten. Dado lo anterior, es posible encontrar sistemas de pastoreo, corte/soiling, corte/heno y corte/ensilaje (González, 2020). Dentro de las áreas agroecológicas de esta zona de Chile, es posible encontrar además los llamados “cerros islas”, como el Cerro Chepe y el Cerro la Pólvora en la Región del Bío Bío. Estas áreas se caracterizan por ser parches de hábitats naturales ubicados en sectores premontorios y que, por lo general, se encuentran aislados de otros cerros o cordones montañosos (Forray *et al.*, 2012).

1.1.6 Praderas en Chile y zona de Ñuble y Bío Bío

En Chile, las praderas son la base de la alimentación del ganado bovino, siendo una fuente relevante de nutrientes a un costo inferior que el resto de los alimentos proporcionados a los animales. Según Dietl y Fernández (2009), en Chile suele hablarse de la existencia de 3 tipos principales de praderas, de acuerdo con la relación que el ser humano establece con ellas:

- Praderas naturales: en este tipo de pradera las especies vegetales aparecen de forma natural, sin la intervención del ser humano. Suelen encontrarse en las zonas de la precordillera, donde desarrollan dependencia a las precipitaciones y de los nutrientes que posea el suelo. Su valor nutricional suele ser menor a especies forrajeras establecidas (Dietl & Fernández, 2009).
- Praderas mejoradas: son praderas naturales que presentan alguna forma de modificación antrópica, sea resembrando, aplicando riego, fertilizando, entre otras. Estas modificaciones buscan mejorar el valor nutricional de la pradera para el animal, así como una mayor duración de la misma (Dietl & Fernández, 2009).
- Praderas artificiales: establecidas en su totalidad por el ser humano, el cual selecciona la semilla a sembrar e interviene hasta la cosecha. Poseen un alto valor nutricional y adecuados kilogramos de materia seca para el animal, persisten de en el tiempo, y logran resistir la adversidad ambiental según las características de la semilla (Dietl & Fernández, 2009). Sin embargo, su costo es superior (Salazar, 2020).

1.1.7 Praderas en la zona de Ñuble y Bío Bío

En la zona de estudio, que comprende a las Regiones de Ñuble y Bío Bío, es posible encontrar en términos generales tres tipos de praderas. Las primeras son las praderas de secano, las cuales son no regadas. Dentro de ellas están las praderas pobres no fertilizadas, como el espinal y matorral con arbustos, y las praderas naturales mejoradas, las cuales poseen cobertura herbácea con plantas forrajeras anuales. El segundo tipo de pradera es la pradera de zona de riego. Dentro de este tipo de pradera es posible hallar dos subtipos: praderas pastoreadas pobres o poco fertilizadas, y cultivos forrajeros sembrados y fertilizados. En tercer lugar, existen las praderas de vegas, las cuales se encuentran en zonas predominantemente húmedas, y poseen especies por lo general no consumibles para el ganado (Dietl & Fernández, 2009).

Dentro de todos los tipos de praderas, han sido las praderas naturales aquellas que han revestido una importante fuente económica para la agricultura y ganadería de las Regiones de Ñuble y Bío Bío. En especial en la Región de Ñuble la ganadería ha sido un actor

importante que se sostiene en base a la producción pratense natural. Los datos oficiales de la superficie de praderas naturales de la zona de Ñuble y Bío Bío no han sido censados desde el año 2007, por lo cual deben ser considerados con cautela. Para esa fecha, la provincia de Ñuble (actual Región de Ñuble) registraba más de 280.000 hectáreas (INE, 2007), equivalentes al 50% del total de la entonces Región del Bío Bío (de la cual formó parte hasta el año 2017). Esta última registraba un total de 558.951 hectáreas de pradera natural (González, 2020).

La diversidad de praderas de la zona no ha estado ajena a los efectos del cambio climático, que se han proyectado hacia los productores pecuarios. Según datos de INE (2017) la Región del Bío Bío (incluyendo la Región de Ñuble) tiene 22.613 cabezas de ganado ovino en rebaños de 60 o más cabezas, y 18.485 de ganado caprino en rebaños de 20 o más cabezas. Ambas especies han experimentado una disminución en la masa ganadera durante la última década (2007-2017). En ambos casos la variable climática juega un rol fundamental en el deterioro de la actividad. Sin embargo, es el ganado bovino en donde los ganaderos manifiestan mayor desmedro en términos de la producción. La Región del Bío Bío (incluyendo a la Región de Ñuble) tiene 334.666 cabezas de ganado. El año 2017, comparado a 2007 ha habido una variación negativa en el tiempo (-14.8%). Los ganaderos expresan que, para esta especie, los factores climáticos (específicamente la sequía) contribuyeron con un 7,7% de las causas de pérdida de ganado. Además, los productores hacen explícito que es la calidad de las praderas una de las principales limitantes de la producción bovina en la zona, contribuyendo con un 26,6% de las limitaciones a la actividad (INE, 2017).

1.2 Evaluación de praderas

Existen diversas metodologías para llevar a cabo la evaluación de las praderas, las cuales dependen de los objetivos que se persigan y las condiciones de la medición. Éstas se encuentran condicionadas por factores humanos, como la disponibilidad de recursos humanos y materiales, así como vegetacionales, como la posibilidad de acceso a los lotes y las características de la vegetación, entre otros. Además, depende de la precisión que se requiera y la escala de operación, y la decisión de si muestrear o no la pradera (Mónaco *et al.*, 2015). La evaluación de praderas ha evolucionado a lo largo del tiempo. En un principio, estas técnicas se enfocaron en mediciones de campo y modelado. Con el paso del tiempo, y sobre la base del aumento en la disponibilidad de datos y productos de teledetección, se espera que la teledetección pueda proporcionar respuestas rápidas y definitivas a los desafíos de detectar y monitorear las condiciones de las praderas, así como sus cambios y dinámicas en el tiempo (Dabrowska-Zielinska Instytut Geodezji Kartografii *et al.*, 2015).

1.2.1 Evaluación de disponibilidad de fitomasa aérea

Uno de los indicadores clave para evaluar el estado de las praderas es la biomasa aérea, la cual se constituye como una aproximación a los procesos ambientales, como el ciclo hidrológico, la erosión y degradación del suelo, entre otros (Morais *et al.*, 2021). Los métodos aplicados para el conocimiento de la biomasa y su dinámica se pueden agrupar en dos categorías: destructivos y no destructivos (Mónaco *et al.*, 2015). Tradicionalmente, la fitomasa aérea se mide a través de métodos destructivos, limitados a áreas pequeñas dado su naturaleza, tiempo, gastos y mano de obra involucrada. Por su parte, los métodos no destructivos se basan en mediciones indirectas basadas en sensores próximos o remotos (Morais *et al.*, 2021). La medición final se llama "biomasa aérea disponible", que conlleva todo el material vegetal aéreo cosechado, expresado en kilogramos de materia seca por hectárea (Varano, 2007).

1.2.1.1 Método directo

Los métodos directos o destructivos consisten en cortar un determinado número de muestras de material vegetal en una superficie conocida, secarlo en estufa y pesarlo. Estas técnicas son confiables, ya que se obtiene el peso de manera directa en lugar de estimarlo, pero consumen mucho tiempo y esfuerzo (Varano, 2007). Así, el corte y pesaje se encuentra entre los métodos destructivos de medida de la biomasa, la cual se realiza a través del corte, secado y pesado de material vegetal (Mónaco *et al.*, 2015).

Existen dos tipos de métodos de corte. El primero es el corte total de pasto, mediante el cual se estiman producciones a través de la realización de reservas (rollos y/o ensilajes) de una superficie conocida, contabilizando las unidades y cantidades producidas. El segundo es el corte parcial con pesado, técnica basada en el muestreo de pequeñas áreas de superficie conocida dentro de una pradera. Posteriormente, estas pequeñas muestras extrapolan a muestras más grandes, emulando las dimensiones de la pradera (Sciaretta, 2012).

1.2.1.2 Métodos indirectos

Los métodos indirectos o no destructivos permiten estimar la productividad primaria neta de manera indirecta (Varano, 2007). La principal desventaja de los métodos no destructivos es que suelen tener menos precisión que los métodos destructivos. No obstante, presentan la ventaja de requerir menos tiempo y esfuerzo en su realización, así como una menor cantidad de recursos económicos. Su uso se justifica en áreas muy grandes y cuando no hay suficientes recursos para realizar un muestreo destructivo (Mónaco *et al.*, 2015).

- Estimación visual. Dentro de los métodos no destructivos, uno de los más populares en campo para determinar las proporciones relativas de especies individuales en comunidades de plantas es la estimación visual de la cobertura. Se recomienda la utilización de esta técnica para la vegetación de bajo crecimiento, como pastizales, pantanos y marismas, así como para las comunidades de líquenes y musgos, todas las cuales pueden ser fácilmente visualizadas desde arriba (Fenner, 1997). Este análisis se basa en la integración por parte del evaluador de varios atributos de las praderas tales como la altura, cobertura, densidad, composición botánica, relación tallo-hoja, entre otros. Una de las desventajas de esta técnica es que su utilización requiere entrenamiento previo por parte del observador, que le permitiera ajustar su observación con algún otro método directo (Sciaretta, 2012).
- Altura No disturbada. Para llevar a cabo el método de altura no disturbada, uno de los instrumentos utilizados es el de "método de la vara de hierba" o "sward stick" (Barthram, 1986), el cual consiste en una regla de metal de 45 cm con graduaciones de 0,5 cm, con una manga que sostiene una pieza de metacrilato transparente de 2x1 cm la cual sobresale. Para llevar a cabo la técnica, la regla se sostiene verticalmente, y la manga se baja hasta que el metacrilato toque la primera pieza de vegetación verde que no florece. A partir de allí se procede a leer la altura en la regla (Stewart *et al.*, 2001). Una de las ventajas del uso del "sward stick", al compararse con otros métodos indirectos, es que las lecturas se pueden aplicar directamente a la práctica (Virkajärvi, 1999).
- Altura Comprimida. Este método de medición de la altura de la pradera consiste en una placa circular de acrílico que se desliza sobre una escala. Para llevar a cabo la medición, se debe posicionar el disco sobre la vegetación y comprimirla levemente, y se detiene al obtener suficiente resistencia. De esta manera, la densidad de la pradera influye en la altura registrada, relacionándose directamente con la biomasa aérea disponible (Varano, 2007). Una de las principales ventajas del uso de disco de altura comprimida, comparado con otros métodos indirectos, es la mayor estabilidad de los parámetros medidos en diferentes días o momentos de medición (Virkajärvi, 1999).
- Capacitancia electrónica. Esta técnica se realiza a través de un pasturómetro de capacitancia. Este instrumento utiliza como principio de funcionamiento la diferencia de capacitancia entre el aire y el material vegetal presente en la pradera, es decir, estima la disponibilidad de forraje, a través de la conductividad eléctrica que produce un capacitómetro electrónico sobre la pradera. Este aparato consiste en un bastón con dos conductores: una barra cuyo extremo sobresale en la parte inferior del bastón, y un tubo

de metal rodeándola. La diferencia entre la capacitancia del aire y la pradera se relaciona con la biomasa aérea disponible. Es uno de los principales métodos indirectos (Varano, 2007).

- Sensores remotos y Teledetección. La cobertura vegetal fue uno de los primeros focos de la investigación de la evaluación y manejo de las praderas, usando imágenes de satélite. Después del lanzamiento del primer satélite Landsat en 1972, las imágenes de satélite comenzaron a popularizarse entre los investigadores ecológicos (Xu & Guo, 2015). Con el tiempo, tanto el Landsat y otros sistemas satelitales de observación de la tierra como el SPOT y NOAA, entre otros, ofrecen imágenes multitemporales que permiten evaluar y monitorear el estado de la vegetación, tanto local como globalmente. Para lograr esto, la información satelital se entrega a través de una imagen multibanda, la cual debe ser posteriormente categorizada y agrupada, para permitir discriminar un área con características particulares de otra. Para expresar esta categorización y agrupamiento se han elaborado diversos índices, los cuales son un conjunto de operaciones algebraicas y matemáticas efectuadas sobre los valores numéricos de los píxeles (Muñoz, 2013).

En los últimos años, y cuando el objetivo es generar información de carácter operacional y en un ámbito regional, un sensor que se ha popularizado es el MODIS (Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada). Este sensor, gratuito, se encuentra a bordo de dos plataformas, Acqua y Terra, y obtiene diariamente imágenes en 36 bandas espectrales, a partir de las cuales se generan y distribuyen productos con diferentes niveles de procesamiento casi en tiempo real (Fontana *et al.*, 2018). Sin embargo, aún siguen siendo populares los datos proporcionados por Landsat, los cuales son un recurso imprescindible para quienes trabajan en agricultura, así como en numerosas áreas que requieren de la observación terrestres en sus ámbitos de estudio (Masek *et al.*, 2020). Sus imágenes, de alta resolución, han sido unas de las más longevas y empleadas a nivel mundial, pero para poder masificar su uso, se hace necesario contar con plataformas como Google Earth Engine y así acortar el tiempo de procesamiento y facilitar la observación (Vidal Solórzano *et al.*, 2020).

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es un índice de vegetación de teledetección comúnmente utilizado en estudios de clima y fenología. Dentro de todos los índices, es el más conocido y extensamente utilizado (Sun & Qin, 2016), debido a la simplicidad de cálculo dado su rango de variación fijo (entre -1 y +1) (Muñoz, 2013; Sun & Qin, 2016). El NDVI tiene variadas aplicaciones, y se puede utilizar como un buen indicador para evaluar la variabilidad potencial en los ecosistemas regionales y

bajo el cambio climático (Zhang *et al.*, 2015). Se calcula a partir de las reflectancias en las bandas roja e infrarroja cercana del espectro electromagnético, constituyéndose como una medida de la actividad fotosintética dentro del área cubierta por un píxel (Fontana *et al.*, 2001). La combinación de los datos proporcionados por el NDVI y el sensor MODIS ayudan enormemente a identificar y cartografiar las praderas existentes y sus condiciones (Cicarini *et al.*, 2016). Sin embargo, como gran desventaja, esta técnica es sensible a la reflectividad del suelo sobre el cual se sitúa la planta, limitando su discriminación (Muñoz, 2013; Sun & Qin, 2016).

- Otros métodos indirectos. Dentro de estos métodos están los sensores ultrasónicos los que, se han utilizado desde finales de la década de 1980, y pueden proporcionar alta eficiencia a bajo costo, utilizándose en muchos estudios para la estimación de biomasa (Fricke *et al.*, 2011; Legg & Bradley, 2019). Estos sensores funcionan como tecnologías complementarias capaces de proporcionar características estructurales y funcionales integrales de la vegetación (Moeckel *et al.*, 2017).

1.2.2 Evaluación de la composición botánica

La caracterización de la composición botánica de la vegetación presente en una pradera es uno de los aspectos más relevantes a evaluar. Este análisis refleja tanto las condiciones del sitio como los factores de su gestión, lo cual es relevante en términos del rendimiento y la calidad del forraje presente en la pradera (Peratoner & Pötsch, 2019). Varios métodos se han empleado para determinar la composición botánica de las praderas. Existen aquellos de carácter objetivo, que requieren el corte y pesaje de la muestra; y los de carácter subjetivo, en los que la determinación de la composición botánica se realiza a través de estimaciones visuales gracias a la acción de observadores entrenados (Sotolongo *et al.*, 2020).

La evaluación de la composición botánica permite determinar la presencia de especies en una pradera, es decir, el aporte concreto de cada una de ellas a la biomasa de la pradera. Su composición revela muchos factores y atributos (Whalley & Hardy, 2000).

1.2.2.1 Evaluación de densidad (número)

En el análisis de la composición botánica de una pradera la densidad representa el número de individuos por unidad de área (Peratoner & Pötsch, 2019). Específicamente para las gramíneas, la densidad de la pradera puede ser expresada por el número de macollos por metro cuadrado (Dumont, 2001). La relevancia de estimar la densidad de las praderas radica en que se ha observado que praderas densas suelen estimular el consumo por parte de los animales. Además, este parámetro es relevante al momento de evaluar los efectos

cuantitativos de las medidas utilizadas previamente en el control de las malezas sobre el número de plantas o partes de las mismas (Dumont, 2001; Peratoner & Pötsch, 2019).

1.2.2.2 Evaluación de frecuencia

La frecuencia es la proporción de casos en los que una especie en específico se detecta en un número definido de puntos o subáreas de observación (Peratoner & Pötsch, 2019). Es una medida específica para las especies. Esta estimación es útil para evaluar las propiedades de los ecosistemas que dependen del número y la dispersión espacial de los individuos, las cuales por lo general se relacionan a la resiliencia a los disturbios ambientales (como eventos extremos) o a la variabilidad, por ejemplo, derivada de la acción climática (Lavorel *et al.*, 2008).

1.2.2.3 Evaluación de cobertura

La cobertura, por su parte, es la proyección de plantas o partes de plantas sobre la superficie del suelo, la cual puede ser medida como cobertura de dosel o cobertura basal. Tomado como una aproximación para la biomasa, las estimaciones de cobertura pueden usarse para calcular índices de diversidad funcional (Lavorel *et al.*, 2008). Además, es ampliamente utilizada en análisis de en la ecología de la vegetación y los estudios fisiológicos de las plantas (Peratoner & Pötsch, 2019).

1.2.2.4 Evaluación morfológica de las plantas y sus componentes

La evaluación de la morfología de las especies que se encuentran en una pradera es esencial para determinar la productividad y propiedades de la misma. Permite además dilucidar el estado fenológico de las plantas que componen la pradera. Por lo general hace referencia a la proporción de hojas, tallos, pseudo-tallos, espigas y material muerto de la pradera (Parga *et al.*, 2007).

- **Tamaño de hojas.** Las hojas son fundamentales para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Éstas son los órganos con mayor área de contacto con el medio aéreo y siendo más sensibles a la mayor parte de los cambios ambientales. Generalmente, el tamaño de la hoja se considera un rasgo morfológico clave, debido a que determina el tamaño de la superficie fotosintética y, por lo tanto, la capacidad de la hoja para capturar la luz y mantener la estabilidad termodinámica y el equilibrio hídrico de la planta. En este método, las hojas se colectan desde la pradera, se agrupan por especies, se colocan en hileras y se transportan al lugar donde se realizarán las mediciones. El tamaño de hoja se expresa como área de hoja por cm² (Ren *et al.*, 2021).

- Número de hojas. El número de hojas es otro criterio relevante, el cual ha sido utilizado como guía para el ingreso de los animales al pastoreo en las praderas. Consiste en contabilizar el número de hojas expandidas por macollo. En el caso de las gramíneas, esta estimación varía entre las diversas especies, las que pueden mantener un número diferente de hojas vivas por macollo. Este análisis se realiza recorriendo el potrero y seleccionando al azar al menos diez macollos en áreas que hayan sido efectivamente consumidas en el pastoreo anterior. Luego, para cada uno de los macollos seleccionados se identifican las hojas, desde la más vieja a la más nueva. Aquellas hojas que están creciendo con la punta cortada, producto de la defoliación en el pastoreo anterior, también deben ser contabilizadas (Canseco *et al.*, 2007). Para el caso de las leguminosas, el conteo del número de hojas se utiliza como forma de expresión del desarrollo de la planta (Febles *et al.*, 2003). El análisis es similar al de las gramíneas, pero en lugar de medir el número de hojas en relación al número de macollos totales, se suelen contabilizar el número de hojas en relación al número de plantas totales en los sitios o parcelaciones donde se desee realizar el análisis. Según Arin *et al.* (2018), el número de hojas en las leguminosas además pudiese verse afectado cuando hay suministro exógeno de nitrógeno a la forma de fertilizante.
- Longitud estolones. La longitud y diámetro de los estolones generalmente se realiza utilizando pinzas y reglas simples, bajo un procedimiento que suele ser lento y laborioso. Los estolones y suelen ser ampliamente estudiados por su papel en las estrategias de propagación de planta, su capacidad de recuperación y el almacenamiento de hidratos de carbono (Pornaro *et al.*, 2019).
- Condición ecológica. La estimación de la condición ecológica de una pradera es importante de realizar; esto porque la pradera manejada de forma cuidadosa y con una buena condición ecológica será económica y socialmente sostenible en el tiempo. Además, si existen cambios en las condiciones ecológicas de la pradera siempre se afectará a la totalidad de la misma. Estas consecuencias, que si bien pueden ser positivas o negativas, sólo se dejarán ver en el largo plazo, con lo cual una pradera con una condición ecológica adecuada siempre será una inversión (Dietl & Fernández, 2009).

En la condición ecológica de una pradera intervienen las condiciones abióticas o bióticas presentes en el entorno. Estos elementos son la base de los patrones de los ecosistemas, como el mantenimiento de la diversidad y su relación con el ecosistema en sí (Barry *et al.*, 2019). Esta relación se vuelve relevante a nivel praterense en términos de la producción, dado que una mayor diversidad vegetal aumenta la productividad (Wrage *et al.*, 2011). En

este sentido la estimación de la diversidad ecológica se vuelve relevante. Esta técnica consiste en la descripción del número de especies por unidad de área (también conocido como riqueza de especies). Es el parámetro cualitativo más utilizado, pues determina la presencia o ausencia de la especie (Peratoner & Pötsch, 2019). Este análisis se ha utilizado tradicionalmente para evaluar la respuesta de los diversos ecosistemas a los factores ambientales, vinculándose a la funcionalidad de los mismos (Nunes *et al.*, 2014).

1.2.2.5 Técnicas usadas en la evaluación botánica de praderas

Para poder caracterizar botánicamente una pradera, se requiere ejecutar alguna técnica particular de evaluación, con la cual se obtendrán parámetros como la cobertura, número o frecuencia, entre otras. La elección de la técnica de evaluación a aplicar, dependerá de la superficie a evaluar o al objetivo de ésta, dado que no es posible realizar todas las determinaciones solo con una de las técnicas. Las técnicas más utilizadas de evaluación botánica de praderas son las siguientes:

- Estimación visual. Este método, de carácter subjetivo, se realiza a través de la observación de la pradera efectuada por observadores expertos y entrenados. Su ventaja respecto de otros métodos radica en la independencia de dispositivos técnicos así como de numerosa mano de obra, y el corto periodo de tiempo en el cual puede ser realizado (Hidalgo *et al.*, 1990). Además, si el observador posee conocimiento previo de la composición botánica de la pradera o de la comunidad vegetal en cuestión, podrá realizar una búsqueda específica de las especies que estime conveniente en el minuto (Peratoner & Pötsch, 2019). Otra de las ventajas de esta técnica es que se evita la separación manual por especie, lo cual resultaba costoso y laborioso (Hidalgo *et al.*, 1990). Sin embargo, al ser un método subjetivo, es dependiente del nivel de preparación, experiencia y rutina del observador. Por otra parte, al depender del desempeño del observador, aquellas observaciones al final de una larga jornada de trabajo tienden a ser además menos precisas que las del comienzo de la jornada. Las estimaciones visuales son adecuadas principalmente para determinar la proporción de cobertura y rendimiento (Peratoner & Pötsch, 2019).
- Cuadrante de transecto. El método de cuadrante de transecto, también conocido como método de intersección de puntos, cuadrantes de puntos o método de puntos, detecta la presencia de una especie la cual no se registra dentro de un área determinada, sino en un punto predeterminado a lo largo de un transecto (Nunes *et al.*, 2014; Peratoner & Pötsch, 2019). Este método está diseñado para muestrear la variación dentro de la pradera y

cuantificar los cambios en la cobertura y altura de las especies de plantas a lo largo del tiempo (Caratti, 2006).

Este método se realiza utilizando los pasadores de alambre los cuales se bajan verticalmente en los puntos de intersección de un marco de rejilla o a través de orificios localizados de forma regular en un marco (Peratoner & Pötsch, 2019). En primer lugar, se establece una línea de base en la cual se orientan los transectos, para posteriormente bajar de forma sistemática los puntos de intersección previamente determinados, contabilizando los contactos con una especie de planta o clase de cobertura del suelo. Además se registra la altura de cada especie de planta a lo largo del transecto (Caratti, 2006).

En general este método es más adecuado para monitorear cambios en la cobertura de especies de menos de un metro de altura, siendo un método excelente para evaluar comunidades herbáceas de textura fina, especies de plantas de hojas finas y especies con dosel abierto, como praderas densas y húmedas (Caratti, 2006). Una de sus principales ventajas es otorgar una mayor objetividad y precisión del análisis de la dinámica de la pradera que la estimación visual. Sin embargo, su principal desventaja radica en el elevado esfuerzo y tiempo utilizado. Además, si durante el día del análisis existen condiciones de viento y vegetación alta, pueden surgir dificultades en las mediciones o incluso hacerlas prácticamente imposibles (Peratoner & Pötsch, 2019).

- Punto cuadrante. El punto cuadrante se utiliza para medir el valor pastoral, el cual es un índice que resume el rendimiento y la calidad del forraje a utilizar para el pastoreo de ganado. Se utiliza principalmente en la gestión de praderas para determinar la capacidad de carga. Este método permite una estimación precisa de la abundancia de las principales especies en la pradera (Daget & Poissonet, 1971; Nota *et al.*, 2020).). Esta es probablemente la técnica más adecuada para determinar porcentaje de cobertura en praderas densas. En ella, se mide la frecuencia y la cobertura de las especies individuales y la cobertura total. El método consiste en observar cien puntos cada 2 ó 4 cm., sobre un borde graduado con un metro o huincha metálica dispuesta a la altura de crecimiento de la pradera. Las lecturas se efectúan haciendo descender verticalmente una aguja metálica en la vegetación que se encuentra en la pradera, y posteriormente, se debe contar el número de veces en que se realiza contacto (Balocchi *et al.*, s.f).
- Parker. El método Tres Pasos de Parker, conocido igualmente como el “Método Histórico”, es uno de los primeros y probablemente el más generalizado de todos los

métodos para determinar la condición de la pradera (Cabrero, 2017). Parker (Parker, 1954) desarrolló este método para obtener e interpretar los registros de datos de factores de vegetación y suelo en parcelas de pastoreo (Ruyle & Dyess, 2010). Su desarrollo es similar al método punto cuadrante, pero se obtienen 100 puntos en 50 m de longitud (Balocchi *et al.*, s.f).

- Punta de pie. Este método consiste caminar y anotar las especies vegetales con las cuales se entra en contacto durante la caminata, dejando una marca con la punta del zapato. El terreno se debe recorrer dando 100 pasos dobles (Quevedo, 2020). Se realiza sobre un transecto lineal, anotando en la caminata todas las especies posibles de observar, así como sus diversas formas de vida. Es un método rápido, preciso y objetivo para determinar parámetros como composición botánica, frecuencia y cobertura de la vegetación. Además, otorga mediciones adicionales, como suelo desnudo o la existencia de cubierta vegetal muerto sobre el suelo (Agüero *et al.*, 2020).

1.2.3 Evaluación de la composición química del forraje de la pradera

El análisis químico de la materia prima es una parte vital e importante de todo proceso. Proporciona la información crítica sobre la biomasa necesaria para un diseño racional o una mejor comprensión de todo proceso (Basu, 2013), incluyendo los forrajes para la alimentación animal. Para evaluar la composición química del forraje de una pradera, los métodos de laboratorio tradicionales involucran varios procedimientos físicos y químicos que van desde el secado y el quemado para determinar sus principales componentes, especialmente si su utilización se destina a alimentación animal (Fulgueira *et al.*, 2007).

1.2.3.1 Determinación de humedad

La humedad corresponde al porcentaje de forraje que no es agua. Tradicionalmente se ha determinado mediante el secado de forrajes a altas temperaturas durante cortos períodos de tiempo. Sin embargo, durante este proceso también se pueden evaporar otros compuestos volátiles. Su relevancia radica en que el contenido de humedad de los forrajes varía según la especie de cultivo, el estado fisiológico y la estación. Por lo tanto, todos los resultados deben expresarse en base a materia seca (Fulgueira *et al.*, 2007). Al determinar el porcentaje de humedad se determina la materia seca de los alimentos. Esta es la porción sin humedad de un ingrediente. La suma porcentual del contenido de humedad y materia seca de un alimento siempre será igual a 100. La materia seca es la porción del alimento que contiene los nutrientes esenciales (van Saun, 2013).

1.2.3.2 Determinación de pH

La determinación de pH se considera el parámetro individual que mejor determina la calidad, fermentación y conservación de forrajes con alto contenido de humedad (sobre todo si es superior al 65%). Este método es rápido y simple: se coloca una sonda de pHmetro en una muestra de fluido obtenida por prensado, molido o maceración (Fulgueira *et al.*, 2007).

1.2.3.3 Determinaciones de la composición nutricional del forraje

- Proteína. Las proteínas son un componente abundante en todas las células, con importantes funciones biológicas y de estructura celular. Las proteínas alimentarias, por su parte, son muy complejas. Tienen una alta variabilidad respecto de su masa molecular, que va desde aproximadamente 5000 hasta más de un millón de Dalton. En términos generales, están compuestos de elementos que incluyen hidrógeno, carbono, nitrógeno, oxígeno y azufre. Dentro de ellos, el nitrógeno es el elemento más distintivo presente en las proteínas (Chang, 2010).

El análisis de proteínas no es sencillo, una de sus principales dificultades es que el nitrógeno no proteico puede provenir tanto de aminoácidos libres, péptidos pequeños, ácidos nucleicos, fosfolípidos, aminoazúcares, porfirina y algunas vitaminas, alcaloides, ácido úrico, urea e iones de amonio, y no sólo de proteína verdadera. De este modo, el nitrógeno orgánico total representaría el de proteínas pero también de todas las sustancias no proteicas que contienen nitrógeno orgánico. Esto explica la enorme cantidad de metodologías asociadas al análisis de proteínas. Los principios en los cuales estos métodos se desarrollan incluyen las determinaciones de nitrógeno, enlaces peptídicos, aminoácidos aromáticos, capacidad de unión a colorantes, capacidad de absorción ultravioleta de las proteínas y propiedades de dispersión de la luz. Los tres principales procedimientos son el Kjeldahl, Dumas (N combustión) y espectroscopia infrarroja (Chang, 2010).

La Proteína Cruda representa todo el nitrógeno que se encuentra en forma de nitrógeno no proteico, que va desde nitratos, amoníaco, urea y aminoácidos simples, así como el nitrógeno presente como proteína verdadera. Para obtener la concentración de nitrógeno total de una muestra generalmente se determina mediante alguna variante del método Kjeldhal. Al final del análisis se obtiene la proteína cruda, la cual se encuentra representada por la cantidad total de nitrógeno multiplicado por un factor de conversión de 6,25. Lo anterior se basa en la suposición de que toda proteína verdadera está compuesta por un 16% de nitrógeno (Fulgueira *et al.*, 2007). Si bien es un método que

está bajo cuestionamientos, sigue siendo un análisis de calidad de los piensos que se sigue utilizando habitualmente (van Saun, 2013).

La determinación de proteína específica para rumiantes, se denomina proteína disponible, y es la porción de proteína cruda que es digerible por el animal. Sin embargo, debido a la velocidad de alimentación y al tiempo de retención del rumen, no todas las proteínas presentes en el alimento finalmente pueden digerirse. La regla general indica que sólo se puede asimilar entre el 70 y el 72% de la proteína total (Fulgueira *et al.*, 2007).

El Nitrógeno Amoniaco, es generalmente una parte sustancial de la fracción de proteína del forraje, que se degrada a péptidos, aminoácidos, aminas y amoníaco por las enzimas vegetales y microbianas, lo que reduce el valor nutricional del alimento. Durante esta degradación ocurre la liberación de amoníaco, el cual se usa igualmente como un indicador de la degradación de la proteína (Fulgueira *et al.*, 2007).

- Determinación de fibras. Si bien se desarrolló a principios del siglo XIX, muchas estimaciones del valor nutritivo de los forrajes todavía se calculan sobre la base de los valores de fibra cruda utilizando el llamado método Weende. Sin embargo, gracias a las aportaciones de investigadores como Peter J. Van Soest (van Soest *et al.*, 1991), los nutricionistas ganaderos han comenzado a usar fibra detergente neutro, fibra detergente ácido y lignina detergente ácido como indicadores de la ingesta y la energía dietética, sobre todo si se trata de dietas en rumiantes. Estas fracciones de fibra han ido reemplazando gradualmente a la fibra cruda en las formulaciones de raciones en muchas partes del mundo. La fibra detergente neutra es un excelente indicador del volumen y, por lo tanto, de la ingesta de alimento por parte del animal. Por su parte, la fibra de detergente ácido es un buen indicador de la digestibilidad y, por lo tanto, de la ingesta energética por parte del rumiante (Fulgueira *et al.*, 2007; Jaimes *et al.*, 2018).

La fibra cruda (FC) corresponde a todas las sustancias orgánicas no nitrogenadas, que no se disuelven tras hidrólisis sucesivas; una en medio ácido y otra en uno alcalino. Luego del procesamiento, quedan los componentes de la fibra cruda que son: celulosa (90%), hemicelulosas y lignina (García Ochoa *et al.*, 2008). Aun considerando las limitaciones que este método presenta, con el consecuente reemplazo de este por nuevos métodos, en la actualidad la AOAC dispone de dos técnicas oficiales para el análisis de fibra cruda en alimentos para animales. Uno es el 962.09 cuya primera acción para su adopción fue en 1962. El otro método es el 978.10, con una primera acción en 1978 y una final en 1979 (Jaimes *et al.*, 2018).

La fibra detergente neutro (FDN) determina el contenido total de fibra de un forraje (celulosa, hemicelulosa, lignina), y se constituye como la porción del alimento insoluble en detergente en condiciones neutrales. Dependiendo del cultivo forrajero y la etapa de madurez, la fibra detergente neutro es parcialmente digerible (Fulgueira *et al.*, 2007). A medida que aumenta el contenido de fibra detergente neutro, la ingesta de materia seca disminuirá y aumentará la actividad de masticación por parte del animal (van Saun, 2013).

La fibra detergente ácido (FDA) mide el contenido total de celulosa y lignina de una planta y muestra la capacidad del rumiante para digerir un forraje. En el fondo, es la parte insoluble de un detergente bajo condiciones ácidas. Si los niveles de fibra detergente ácido son altos, la digestibilidad del forraje se ve disminuida (Fulgueira *et al.*, 2007). Esto se debe a que la fibra de detergente ácido contiene los componentes de la pared celular de difícil digestión, convirtiéndose en un excelente indicador de la calidad del alimento (van Saun, 2013).

La lignina es una sustancia sin carbohidratos, principal componente de la planta que influye en la digestibilidad de la pared celular vegetal. No posee valor energético, y afecta la digestibilidad de los otros componentes del alimento. En términos generales, sus niveles deseables deben ser bajos (Fulgueira *et al.*, 2007).

- Cenizas. La ceniza es el residuo inorgánico que queda después de la ignición o la oxidación completa de la materia orgánica en un producto alimenticio o forraje (Marshall, 2010). En el fondo, es el contenido mineral total de un forraje, y representa del 3 al 12% de la materia seca (Fulgueira *et al.*, 2007). Para poder determinar las cenizas se utilizan dos tipos principales de incineración: incineración seca y la incineración húmeda (o por oxidación) (Marshall, 2010).
- Extracto no nitrogenado (ENN). En términos generales, el extracto no nitrogenado constituye los elementos restantes de los análisis descritos, que en general son los carbohidratos no estructurales. Éstos son la fuente principal de energía presente en los alimentos. Aquellos digeribles, que se convierten en monosacáridos, tienden a absorberse rápidamente y proporcionar energía metabólica. Los métodos para medir los carbohidratos han evolucionado: desde pruebas de color cualitativas, adaptación de la prueba de color para azúcares reductores (prueba de Fehling) hasta métodos enzimáticos y actualmente, cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) (BeMiller, 2010).

- Extracto Etéreo (EE). En los alimentos, los lípidos son un grupo de sustancias que, en general, se caracterizan por ser solubles en éter, cloroformo u otros disolventes orgánicos, pero son escasamente solubles en agua (hidrofobia). No obstante, la familia de los llamados lípidos es bastante amplia. Algunos de ellos, como los triacilgliceroles, son muy hidrófobos, y otros como los di y monoacilgliceroles, tienen restos hidrófobos e hidrófilos en sus moléculas. Los triacilgliceroles son aquellas grasas y aceites que representan la categoría más prevalente dentro de estos compuestos químicos. Para poder analizarlos, los disolventes ideales deben tener un alto poder disolvente para lípidos y un poder disolvente bajo o nulo para las proteínas, los aminoácidos y los carbohidratos. Además, deben tener una rápida evaporación, y no dejar residuos. Para la extracción continua con solvente, este fluye continuamente sobre la muestra contenida en un dedal. Para medir el contenido final de grasa se cuantifica la pérdida de peso de la muestra o el peso de la grasa que el solvente consiguió extraer. Los métodos continuos proporcionan una extracción rápida y eficiente que otros métodos, como los semicontinuos. Un ejemplo de métodos continuos es el método Goldfish. El método Soxhlet, por su parte, es un ejemplo del método de extracción semicontinua (Min & Ellefson, 2010).
- Energía. Para la formulación de dietas y el rendimiento animal, es fundamental predecir con precisión la energía digestible de los alimentos, lo cual además sirve para evaluar su calidad (van Saun, 2013). En general, las técnicas de medición de energía requieren equipos muy sofisticados y ensayos de metabolismo animal, in vivo o in vitro. Existen diferentes medidas para describir el valor energético de los alimentos, donde los más conocidos son la energía neta (NE), nutrientes digestibles totales (TDN) y valores relativos de alimentación (RFV) (Fulgueira *et al.*, 2007).

La energía neta se constituye como la energía utilizada por el animal tanto como para el mantenimiento, como para otros fines, como los productivos que incluyen el crecimiento, la gestación y la lactancia. Para calcularla, se realizan estudios con animales midiendo la energía bruta menos la energía fecal, menos la energía perdida en la orina y menos los gases combustibles y la pérdida total de calor (Fulgueira *et al.*, 2007).

Los Nutrientes digestibles totales (TDN) es un índice que representa la porción digestible de un alimento y también se puede utilizar para estimar el contenido energético de un forraje. Para calcularlo, es necesario realizar ensayos de digestión previos, para luego aplicar una serie de fórmulas. Actualmente, esta es: $TDN (\%) = \text{proteína cruda digerible } (\%) + \text{fibra cruda digerible } (\%) + \text{almidón y azúcares digeribles}$

(%) + grasas digeribles x 2,25. Este último factor se utiliza por que las grasas se multiplican por 2,25 al contener más energía por unidad de peso que las demás sustancias (Fulgueira *et al.*, 2007).

1.3 Referencias

- Agüero, W., Molina, J., & Biurrun, F. (2020). Caracterización fisionómica-florística de la vegetación. In L. Blanco & R. Quiroga (Eds.), *Manual para evaluación de pastizales naturales del Chaco Árido con fines ganaderos* (pp. 40–51). Inta Ediciones. https://inta.gob.ar/sites/default/files/manual_evaluacion_de_pastizales_20-02-2020.pdf.
- Allaire, H., & Brady, T. (2010). Classification and botanical description of legumes. *Retrieved from* https://academics.hamilton.edu/foodforthought/our_research_files/beans_peas.pdf *View.*
- Anderson, R. C. (2006). Evolution and origin of the Central Grassland of North America: climate, fire, and mammalian grazers1. *The Journal of the Torrey Botanical Society*, 133(4), 626–647.
- Araya-Osses, D., Casanueva, A., Román-Figueroa, C., Uribe, J. M., & Paneque, M. (2020). Climate change projections of temperature and precipitation in Chile based on statistical downscaling. *Climate Dynamics*, 54(9–10), 4309–4330. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05231-4>.
- Arin Scheitler, M. J., Dabezies Artagaveytia, S., Garese Pastorino, J., & Mailhos Algorta, M. E. (2018). Efecto de la incorporación de nitrógeno y leguminosas en verdes anuales invernales en el establecimiento y producción inicial.
- Bardgett, R. D., Bullock, J. M., Lavorel, S., Manning, P., Schaffner, U., Ostle, N., Chomel, M., Durigan, G., L. Fry, E., Johnson, D., Lavalley, J. M., le Provost, G., Luo, S., Png, K., Sankaran, M., Hou, X., Zhou, H., Ma, L., Ren, W., ... Shi, H. (2021). Combatting global grassland degradation. In *Nature Reviews Earth and Environment* (Vol. 2, Issue 10, pp. 720–735). Springer Nature. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00207-2>.
- Barneze, A. S., Whitaker, J., McNamara, N. P., & Ostle, N. J. (2020). Legumes increase grassland productivity with no effect on nitrous oxide emissions. *Plant and Soil*, 446(1), 163–177.
- Barry, K. E., de Kroon, H., Dietrich, P., Harpole, W. S., Roeder, A., Schmid, B., Clark, A. T., Mayfield, M. M., Wagg, C., & Roscher, C. (2019). Linking local species coexistence to ecosystem functioning: a conceptual framework from ecological first principles in grassland ecosystems. *Advances in Ecological Research*, 61, 265–296.
- Barthram, G. T. (1986). Experimental techniques: the HFRO sward stick. 1984. Penicuik: Hill *Farming Research Organization*, 1986. Biennial Report, 1985, 81–90.
- Basu, P. (2013). Analytical Techniques. In *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction* (pp. 439–455). *Elsevier*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396488-5.00013-7>.

- Balocchi, O., Carrillo, R., Fuentes, R., López, I., Nisse, J., Pinochet, D. Libro de Manejo de Praderas. Universidad Austral de Chile. *Disponible en:* https://kupdf.net/download/libro-manejo-de-praderas-uach-2006_5988ebd7dc0d60ee1e300d1b_pdf.
- Bellocchi, G., & Picon-Cochard, C. (2021). Effects of climate change on grassland biodiversity and productivity. *In Agronomy* (Vol. 11, Issue 6). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061047>.
- BeMiller, J. N. (2010). Carbohydrate analysis. *In Food analysis* (pp. 147–177). Springer.
- Blair, J., Nippert, J., & Briggs, J. (2014). Grassland ecology. In *Ecology and the Environment* (pp. 389–423). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7501-9_14.
- Bohnert, D. W., DelCurto, T., Clark, A. A., Merrill, M. L., Falck, S. J., & Harmon, D. L. (2011). Protein supplementation of ruminants consuming low-quality cool-or warm-season forage: Differences in intake and digestibility. *Journal of animal science*, 89(11), 3707–3717.
- Bonvissuto, G. 2011. Propagación en pastizales naturales: rizomas y estolones vs semillas ¿quién gana? Ecología de Pastizales Naturales Recursos Naturales. *INTA EEA Bariloche*. N° 58, pp. 32-34
- Cabrero, C. (2017). “Evaluación de metodologías para estimar la condición y tendencia de pastizales alto andinos.”
- Canseco, C., Demanet, R., Balocchi, O., Parga, J., Anwandter, V., Abarzúa, A., Teuber, N., & Lopetegui, J. (2007). Determinación de la disponibilidad de materia seca de praderas en pastoreo. *Manejo Del Pastoreo*. Imprenta América, Osorno, Chile, 23–50.
- Caratti, J. F. (2006). Point Intercept (PO). In D. C. ; Lutes, R. E. ; Keane, J. F. ; Caratti, C. H. ; Key, N. C. Benson, S. Sutherland, & L. J. Gangi (Eds.), *FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system*. <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/24062>.
- Chang, S. K. C. (2010). Protein analysis. **In Food analysis** (pp. 315–331). Springer.
- Cicarini, M., de Carvalho, L. M. T., Antunes, M. A. H., dos Santos, P. A., Arantes, T. B., de Resende, J. C., & da Rocha, W. S. D. (2016). Vegetative growth of grasslands based on hyper-temporal NDVI data from the Modis sensor. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 51(7), 858–868. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000700009>.
- Craine, J. M., Ocheltree, T. W., Nippert, J. B., Towne, E. G., Skibbe, A. M., Kembel, S. W., & Fargione, J. E. (2013). Global diversity of drought tolerance and grassland climate-change resilience. *Nature Climate Change*, 3(1), 63–67. <https://doi.org/10.1038/nclimate1634>.
- Dabrowska-Zielinska Instytut Geodezji Kartografii, K., Goliński, P., Jørgensen, M., Mølmann, J., Dabrowska -Zielinska, K. A., Goliński, P. B., Mølmann, J. C., Taff, G. C., Tomaszewska, M. A., Golińska, B. B., Budzynska, M. A., & Gatkowska, M. A. (2015). New methodologies for grasslands monitoring. Use of remote sensing for increased precision in forage production. *View project New methodologies for grasslands monitoring*. <https://www.researchgate.net/publication/296333831>.
- Daget, P., & Poissonet, J. (1971). Une méthode d’analyse phytologique des prairies: critères d’application.

Deroche, B., Pradel, P., & Baumont, R. (2020). Long-term evolution and prediction of feed value for permanent mountain grassland hay: Analysis of a 32-year data set in relation to climate change. *Grass and Forage Science*, 75(1), 18–27. <https://doi.org/10.1111/gfs.12465>.

Dirección General de Aeronáutica civil (DGAC), D. G. de A. C. (2021). *Reporte anual de la evolución del clima en Chile. 2021*. <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/publicaciones/documentoPdf/reportEvolucionClima/reportEvolucionClima2020.pdf>.

Dietl, W., & Fernández, F. (2009). Manejo sostenible de praderas. Su flora y vegetación. *Boletín INLA No 187*.

Dixon, A. P., Faber-Langendoen, D., Josse, C., Morrison, J., & Loucks, C. J. (2014). Distribution mapping of world grassland types. *Journal of Biogeography*, 41(11), 2003–2019. <https://doi.org/10.1111/jbi.12381>.

Dumont, J. C. (2001). Estrategias en el uso de praderas para la producción lechera. *Serie Actas-Instituto de Investigaciones Agropecuarias*.

Faber-Langendoen, D., & Josse, C. (2010). World Grasslands And Biodiversity Patterns A Report to IUCN Ecosystem Management Programme. www.natureserve.org.

Fasanella, M., Premoli, A. C., Urdampilleta, J. D., González, M. L., & Chiapella, J. O. (2017). How did a grass reach Antarctica? The Patagonian connection of *Deschampsia antarctica* (Poaceae). *Botanical Journal of the Linnean Society*, 185(4), 511-524.

Febles, G., Ruiz, T. E., Alonso, J., & Gutiérrez, J. C. (2003). Efecto de la duración de la luz diaria en el crecimiento y desarrollo inicial de especies arbóreas tropicales. Nota técnica. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 37(1), 55-58.

Fenner, M. (1997). Evaluation of methods for estimating vegetation cover in a simulated grassland sward. In *Journal of Biological Education* (Vol. 31, Issue 1, pp. 49–54). *Institute of Biology*. <https://doi.org/10.1080/00219266.1997.9655532>.

Fontana, D. C., Junges, A. H., Bremm, C., Schaparini, L. P., Mengue, V. P., Wagner, A. P. L., & Carvalho, P. (2018). NDVI and meteorological data as indicators of the pampa biome natural grasslands growth. *Bragantia*, 77(2), 404–414. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.2017222>.

Fontana, F., Rixen, C., Jonas, T., Aberegg, G., & Wunderle, S. (2001). Alpine Grassland Phenology as Seen in AVHRR, VEGETATION, and MODIS NDVI Time Series - a Comparison with In Situ Measurements. *Sensors*, 8, 2833–2853. www.mdpi.org/sensors.

Forage & Grassland Terminology Committee. (1991). Terminology for grazing lands and grazing animals. *Pocahontas Press*.

Forray, R., Arellano, E., Picon, C., Fernández, I., Ruiz, F., Besa, Antonia., Lefranc, Etienne. Plan de integración de los cerros isla al sistema de áreas verdes de Santiago. Propuestas para Chile. Concurso políticas públicas 2012. *Centro de Políticas Públicas UC*. Disponible en: <https://politicaspUBLICAS.uc.cl/wp-content/uploads/2015/01/ppt-plan-de-integracion-cerros-isla-rm.pdf>.

- Fricke, T., Richter, F., & Wachendorf, M. (2011). Assessment of forage mass from grassland swards by height measurement using an ultrasonic sensor. *Computers and Electronics in Agriculture*, 79(2), 142–152. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.09.005>.
- Fulgueira, C. L., Amigot, S. L., Gaggiotti, M., Luis, •, Romero, A., & Basílico, J. C. (2007). Forage Quality: Techniques for Testing.
- Gang, C., Zhou, W., Chen, Y., Wang, Z., Sun, Z., Li, J., Qi, J., & Odeh, I. (2014). Quantitative assessment of the contributions of climate change and human activities on global grassland degradation. *Environmental Earth Sciences*, 72(11), 4273–4282. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3322-6>.
- García Ochoa, O. E., Infante, R. B., & Rivera, C. J. (2008). Hacia una definición de fibra alimentaria. *Anales Venezolanos de Nutrición*, 21(1), 25–30.
- García-Baquero, G., Odriozola, I., & Aldezabal, A. (2020). Floristic Composition Mediates Change in Forage Nutritive Quality of Atlantic Mountain Grasslands after Experimental Grazing Exclusion. *In. Agronomy*. <https://doi.org/10.3390/agronomy1101>.
- Gibson, D. J. (2009). Grasses and grassland ecology. *Oxford University Press*.
- Gibson, D. J., & Newman, J. A. (2019). Grasslands and climate change. *In Grasslands and Climate Change*. <https://doi.org/10.1017/9781108163941>.
- González J. (Ed.) 2020. “Agricultura de la nueva Región de Ñuble: una caracterización sectorial”. Libro INIA N° 39, 378 p. *Instituto de Investigaciones Agropecuarias*. Chillán. Chile.
- Hepp, C., Valentine, I., Hodgson, J., y Kemp, D. (2005). Factores que afectan la abundancia de leguminosas en praderas naturalizadas de zonas montañosas: I. Efecto de la competencia de gramíneas. Libro de resúmenes, XXX Reunión Anual de la Sociedad Chilena de Producción Animal. Universidad de la Frontera, Temuco.
- Hidalgo, L. G., Cauhepe, M. A., Viviani, E. M., Galatoire, A., Meijome, I., & Colabelli, M. (1990). Evaluación de un método no destructivo para estimación de biomasa forrajera. *Turrialba Volumen 40*.
- Hewson, N. (2015). Manipulation of the tillering dynamics in a perennial ryegrass seed crop as a response to sowing date, sowing rate and grazing (*Doctoral dissertation, Lincoln University*).
- Hoover, D. L., Knapp, A. K., & Smith, M. D. (2014). Resistance and resilience of a grassland ecosystem to climate extremes. *Ecology*, 95(9), 2646–2656. <https://doi.org/10.1890/13-2186.1>.
- Instituto Nacional de estadísticas (INE). (2007). Censo Agropecuario. VII Censo Agropecuario y Forestal. *Disponible en* <https://www.ine.cl/estadisticas/economia/agricultura-agroindustria-y-pesca/censos-agropecuarios>.
- Instituto Nacional de estadísticas (INE). (2017). Producción pecuaria. Estadísticas Agricultura, Agroindustria y Pesca. *Disponible en* <https://www.ine.cl/estadisticas/economia/agricultura-agroindustria-y-pesca>.

- Jaimes, L. J., María, A., M Y Héctor, G., & Correa, J. (2018). De Parmentier a Van Soest y más allá: un análisis histórico del concepto y métodos de determinación de la fibra en alimentos para rumiantes. In *Livestock Research for Rural Development* (Vol. 30, Issue 7). <http://www.lrrd.org/lrrd30/7/hjco30126.html>.
- Katata, G., Grote, R., Mauder, M., Zeeman, M. J., & Ota, M. (2020). Wintertime grassland dynamics may influence belowground biomass under climate change: A model analysis. *Biogeosciences*, 17(4), 1071–1085. <https://doi.org/10.5194/bg-17-1071-2020>.
- Lavorel, S., Grigulis, K., McIntyre, S., Williams, N. S. G., Garden, D., Dorrough, J., Berman, S., Quétier, F., Thébault, A., & Bonis, A. (2008). Assessing functional diversity in the field - Methodology matters! In *Functional Ecology* (Vol. 22, Issue 1, pp. 134–147). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2007.01339.x>.
- Legg, M., & Bradley, S. (2019). Ultrasonic proximal sensing of pasture biomass. *Remote Sensing*, 11(20). <https://doi.org/10.3390/rs11202459>.
- Liu, Y., Zhang, Z., Tong, L., Khalifa, M., Wang, Q., Gang, C., Wang, Z., Li, J., & Sun, Z. (2019). Assessing the effects of climate variation and human activities on grassland degradation and restoration across the globe. *Ecological Indicators*, 106, 105504.
- López, I. F., & Valentine, I. (2003). Rol de la diversidad pratense y de los grupos funcionales de especies sobre la condición de la pradera y su estabilidad. *Agro Sur*, 31(1), 60–76.
- Lu, Q., Zhao, D., Wu, S., Dai, E., & Gao, J. (2019). Using the NDVI to analyze trends and stability of grassland vegetation cover in Inner Mongolia. *Theoretical and Applied Climatology*, 135(3–4), 1629–1640. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2614-2>
- Marshall, M. R. (2010). Ash analysis. In *Food analysis* (pp. 105–115). Springer.
- Masek, J. G., Wulder, M. A., Markham, B., McCorkel, J., Crawford, C. J., Storey, J., & Jenstrom, D. T. (2020). Landsat 9: Empowering open science and applications through continuity. *Remote Sensing of Environment*, 248, 111968.
- Mín, D. B., & Ellefson, W. C. (2010). Fat analysis. In *Food analysis* (pp. 117–132). Springer.
- Moeckel, T., Safari, H., Reddersen, B., Fricke, T., & Wachendorf, M. (2017). Fusion of ultrasonic and spectral sensor data for improving the estimation of biomass in grasslands with heterogeneous sward structure. *Remote Sensing*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/rs9010098>.
- Mónaco, N., Rosa, M. J., Santa, V., Aufrán, V., & Heguiabehere, A. (2015). Utilización de estimadores para determinación de biomasa a campo. In *European Scientific Journal* (Vol. 11, Issue 33).
- Morais, T. G., Teixeira, R. F. M., Figueiredo, M., & Domingos, T. (2021). The use of machine learning methods to estimate aboveground biomass of grasslands: A review. In *Ecological Indicators* (Vol. 130). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108081>.
- Muñoz, P. (2013). Apuntes de Teledetección: Índices de vegetación. *Centro de Información de Recursos Naturales*, 15. [http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26389/Tema Índices de vegetación%2C Pedro Muñoz A.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26389/Tema%20Indices%20de%20vegetación%2C%20Pedro%20Muñoz%20A.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

- Nardone, A., Ronchi, B., Lacetera, N., Ranieri, M. S., & Bernabucci, U. (2010). Effects of climate changes on animal production and sustainability of livestock systems. *Livestock Science*, 130(1–3), 57–69. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2010.02.011>.
- Nota, G., Pittarello, M., Ravetto Enri, S., Lonati, M., & Lombardi, G. (2020). Società Italiana di Agronomia XLIX *Convegno Nazionale Gestione sostenibile dei sistemi colturali Bari*, 16-18 settembre 2020 Point-quadrat vs Phytosociological Method to Assess the Pastoral Value of Dry Grasslands in NW Alps.
- Nunes, A., Tapia, S., Pinho, P., Correia, O., & Branquinho, C. (2014). Advantages of the point-intercept method for assessing functional diversity in semi-arid areas. *IForest-Biogeosciences and Forestry*, 8(4), 471.
- ODEPA. (2000). Clasificación de las explotaciones agrícolas del VI Censo Nacional Agropecuario según el tipo de productor y localización geográfica. *Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA)* Santiago.
- Ovalle, C. (2011). Especies y variedades de praderas permanentes para sistemas silvopastorales en la zona centro-sur de Chile. Serie Actas-Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Parga, J., Teuber, N., Balocchi, O., Anwandter, V., Canseco, C., Abarzúa, A., Lopetegui, J., & Demanet, R. (2007). Comportamiento del animal en pastoreo. In N. Teuber, O. Balocchi, & J. Parga M (Eds.), *Manejo del Pastoreo*.
- Parker, K. W. (1954). Application of ecology in the determination of range condition and trend.
- Peratoner, G., & Pötsch, E. M. (2019). Methods to describe the botanical composition of vegetation in grassland research. *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment*, 70(1), 1–18.
- Petersen, K., Kraus, D., Calanca, P., Semenov, M. A., Butterbach-Bahl, K., & Kiese, R. (2021). Dynamic simulation of management events for assessing impacts of climate change on pre-alpine grassland productivity. *European Journal of Agronomy*, 128. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126306>.
- Pornaro, C., Macolino, S., & Richardson, M. D. (2019). Measuring Stolons and Rhizomes of Turfgrasses Using a Digital Image Analysis System. *Journal of Visualized Experiments: JoVE*, 144. <https://doi.org/10.3791/58042>.
- Quevedo, W. (2020). Propuesta para manejo sostenible de praderas nativas en las comunidades sorojchi y yoroqa del municipio ravelo. *Revista Ciencia, Tecnología e Innovación*, 18(21), 103–127.
- Ren, T., He, N., Liu, Z., Li, M., Zhang, J., Li, A., Wei, C., Lü, X., & Han, X. (2021). Environmental filtering rather than phylogeny determines plant leaf size in three floristically distinctive plateaus. *Ecological Indicators*, 130. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108049>.
- Rojas-Downing, M. M., Nejadhashemi, A. P., Harrigan, T., & Woznicki, S. A. (2017). Climate change and livestock: Impacts, adaptation, and mitigation. *Climate Risk Management*, 16, 145–163. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2017.02.001>.

- Ruyle, G. B. ; & Dyess, J. (2010). Rangeland Monitoring and the Parker 3-Step Method: Overview, Perspectives and Current Applications Item Type text; Pamphlet E TENSION Rangeland Monitoring and the Parker 3-Step Method: Overview, Perspectives and Current Applications. <http://hdl.handle.net/10150/146925>.
- Sainju, U. M., Allen, B. L., Lenssen, A. W., & Ghimire, R. P. (2017). Root biomass, root/shoot ratio, and soil water content under perennial grasses with different nitrogen rates. *Field Crops Research*, 210, 183–191. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.05.029>.
- Salazar, S. (2020). Guía 3: Cultivos y Praderas. *Liceo el Huertón Los Ángeles*. https://www.curriculumnacional.cl/614/articles-181407_recurso_pdf.pdf.
- Sanderson, M. A., Wedin, D., & Tracy, B. (2009). Grassland: Definition, origins, extent, and future. In *Grassland: Quietness and Strength for a New American Agriculture* (pp. 55–74). Wiley. <https://doi.org/10.2134/2009.grassland.c4>.
- Santibáñez, F. (2017). El cambio climático y los recursos hídricos de Chile. In A. Apey, D. Barrera, & T. Rivas (Eds.), Santiago, ODEPA (1st ed.). *Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA)*. https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2018/01/ReflexDesaf_2030-1.pdf.
- Scholes, R. J., Montanarella, L., Brainich, E., Barger, N., ten Brink, B., Cantele, M., Erasmus, B., Fisher, J., Gardner, T., Holland, T. G., Kohler, F., Kotiaho, J., von Maltitz, G., Nangendo, G., Pandit, R., Parrotta, J., Potts, M., Prince, S., Sankaran, M., & Willemsen, L. (2018). IPBES (2018): Summary for policymakers of the assessment report on land degradation and restoration of the. *Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. <https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/63998/1/ipbes%20spm%202018.pdf>.
- Sciaretta, F. (2012). Estimaciones forrajeras, claves para un rendimiento óptimo. *Sitio Argentino de producción animal. Disponible en* https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pastoreo%20sistemas/149-ESTIMACIONES_FORRAJERAS.pdf.
- Song, B., Niu, S., & Wan, S. (2016). Precipitation regulates plant gas exchange and its long-term response to climate change in a temperate grassland. *Journal of Plant Ecology*, 9(5), 531–541. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtw010>.
- Sotolongo, D. M., Marrero, D. F., Calero, C. M., Bernabe, N. Q., Ormond, J., Delannay, L., Laudat, T. A., & Morales, A. G. (2020). Validación de una herramienta informática para el muestreo de superficies cubiertas de pastos/validation of a computer tool for the sample of past cover surfaces. *Universidad&Ciencia*, 9(2), 85–99.
- Stewart, K. E. J., Bourn, N. A. D., & Thomas, J. A. (2001). Sward height measurement An evaluation of three quick methods commonly used to assess sward height in ecology. In *Journal of Applied Ecology* (Vol. 38).
- Sun, J., & Qin, X. (2016). Precipitation and temperature regulate the seasonal changes of NDVI across the Tibetan Plateau. *Environmental Earth Sciences*, 75(4), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5177-x>.
- van Oijen, M., Bellocchi, G., & H glind, M. (2018). Effects of climate change on grassland biodiversity and productivity: The need for a diversity of models. In *Agronomy* (Vol. 8, Issue 2). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/agronomy8020014>.

- van Saun, R. (2013). Determining Forage Quality: Understanding Feed Analysis. *PennState Extension*. <https://extension.psu.edu/determining-forage-quality-understanding-feed-analysis>.
- van Soest, P. J. van, Robertson, J. B., & Lewis, B. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74(10), 3583–3597.
- Varano, L. (2007). Medición de la productividad primaria neta en mallines del noroeste de patagonia, mediante métodos destructivos y no destructivos.
- Verchot, L., Krug, T., Lasco, R. D., Ogle, S., Raison, J., Li, Y., Martino, D. L., McConkey, B. G., Smith, P., & Karunditu, M. W. (2006). Grassland. In *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories* (Vol. 4, pp. 1–6). IGES Japan, Hayama, Kanagawa.
- Vidal Solórzano, J., Gallardo-Cruz, J. A., & Peralta-Carreta, C. (2020). The potential of the available Landsat imagery in Google Earth Engine for the study of the Mexican territory. *Investigaciones Geográficas*, 101.
- Virkajärvi, P. (1999). Comparison of three indirect methods for prediction of herbage mass on timothy-meadow fescue pastures. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Plant Soil Science*, 49(2), 75–81.
- Wang, H., Liu, H., Cao, G., Ma, Z., Li, Y., Zhang, F., Zhao, X., Zhao, X., Jiang, L., Sanders, N. J., Classen, A. T., & He, J. S. (2020). Alpine grassland plants grow earlier and faster but biomass remains unchanged over 35 years of climate change. *Ecology Letters*, 23(4), 701–710. <https://doi.org/10.1111/ele.13474>.
- West, J. W. (2003). Effects of heat-stress on production in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 86(6), 2131–2144. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73803-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73803-X).
- Whalley, R., & Hardy, M. (2000). Measuring botanical composition of grasslands (W. L. t'Mannetje & R. Jones, Eds.). <https://www.researchgate.net/publication/279524122>.
- Wildová, R., Wild, J., & Herben, T. (2007). Fine-scale dynamics of rhizomes in a grassland community. *Ecography*, 30(2), 264–276.
- Williams, D. L., Goward, S., & Arvidson, T. (2006). Landsat. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(10), 1171–1178.
- Wrage, N., Strodthoff, J., Cuchillo, H. M., Isselstein, J., & Kayser, M. (2011). Phytodiversity of temperate permanent grasslands: ecosystem services for agriculture and livestock management for diversity conservation. *Biodiversity and Conservation*, 20(14), 3317–3339.
- Wu, G. L., Cheng, Z., Alatalo, J. M., Zhao, J., & Liu, Y. (2021). Climate Warming Consistently Reduces Grassland Ecosystem Productivity. *Earth's Future*, 9(6). <https://doi.org/10.1029/2020EF001837>.
- Xu, D., & Guo, X. (2015). Some insights on grassland health assessment based on remote sensing. In *Sensors* (Switzerland) (Vol. 15, Issue 2, pp. 3070–3089). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/s150203070>.

Yang, F., Schäufele, R., Liu, H. T., Ostler, U., Schnyder, H., & Gong, X. Y. (2019). Gross and net nitrogen export from leaves of a vegetative C4 grass. *Journal of Plant Physiology*, 153093. doi:10.1016/j.jplph.2019.153093.

Zarei, A., Asadi, E., Ebrahimi, A., Jafari, M., Malekian, A., Mohammadi Nasrabadi, H., Chemura, A., & Maskell, G. (2020). Prediction of future grassland vegetation cover fluctuation under climate change scenarios. *Ecological Indicators*, 119. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106858>.

Zhang, X., Lu, X., & Wang, X. (2015). Spatial-Temporal NDVI Variation of Different Alpine Grassland Classes and Groups in Northern Tibet from 2000 to 2013. *Mountain Research and Development*, 35(3), 254–263. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-14-00110.1>.

Zhang, X., Du, X., & Zhu, Z. (2020). Effects of precipitation and temperature on precipitation use efficiency of alpine grassland in Northern Tibet, China. *Scientific Reports*, 10(1), 1-9.

CAPÍTULO 2 OBJETIVOS DE LA TESIS

En consideración de la problemática ambiental existente, de la complejidad e importancia de la evaluación de praderas y de los importantes cambios tecnológicos que se han generado a nivel de mejoramiento genético del material forrajero y de las herramientas de teledetección, se plantea que es necesario reevaluar la adaptabilidad y comportamiento de especies forrajeras a las nuevas condiciones de crecimiento y evaluar el potencial uso de la teledetección como herramienta que permita mejorar el monitoreo y la toma de decisiones en el uso de recursos naturales como las praderas. En este contexto se plantea realizar tres trabajos cuyos objetivos pretenden dar respuesta a la problemática expuesta; los cuales se detallan a continuación.

- **Evaluación agronómica y adaptación de variedades de alfalfa (*Medicago sativa* L.) Con distintos grados de latencia en la Región de Ñuble.**

La hipótesis de este estudio es que praderas de alfalfa (*Medicago sativa* L.) de segundo año con distintos grados de latencia presentan diferencias en rendimiento de materia seca y calidad nutricional a lo largo de la temporada, en Valle Central Regado de la Región de Ñuble, como resultado de su mejoramiento genético y de los cambios de las condiciones ambientales del área.

El objetivo de este estudio es evaluar la adaptación de praderas de alfalfa con distintos grados de latencia, en condiciones de riego, en las condiciones ambientales actuales de la Provincia de Punilla, Región de Ñuble.

Para dar respuesta a ese objetivo se plantean como objetivos específicos, evaluar la disponibilidad y producción de forraje, la composición química de éste y algunos componentes estructurales de las plantas (proporción y tamaño de hojas).

- **Evaluación del comportamiento morfológico de tres cultivares de *Trifolium repens* L. con distinto tamaño de hoja, formando una pradera mixta con *Lolium perenne* L. en Chillán, Región de Ñuble.**

La hipótesis de investigación establece que los cultivares de trébol blanco con distinto tamaño de hoja tienen diferente comportamiento morfológico formando una pradera mixta con ballica perenne, en el Valle Central Regado, de la Región de Ñuble, dado por su distinta composición genética.

El objetivo en este estudio fue evaluar el crecimiento y comportamiento morfológico, de tres cultivares de trébol blanco en mezcla con ballica perenne, en condiciones de corte simulando pastoreo.

- **Respuesta de la fenología de las praderas a las condiciones climáticas en Bío Bío, Chile. Desde 2001 a 2020.**

El objetivo de este estudio fue hacer un seguimiento de los cambios fenológicos de las praderas en Bío Bío, Chile, usando imágenes del Espectrorradiómetro de imágenes de media resolución (MODIS), el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y series de tiempo.

Los objetivos específicos de este estudio que intentan dar respuesta al objetivo general, se establecieron con estas preguntas:

¿Existen diferencias significativas en el momento en que ocurren los marcadores fenológicos?

¿Qué variables climáticas contribuyen a ellos?

¿Existen tendencias en estos marcadores en el período 2001-2020?

CAPÍTULO 3 EVALUACIÓN AGRONÓMICA Y ADAPTACIÓN DE VARIEDADES DE ALFALFA (*MEDICAGO SATIVA* L.) CON DISTINTOS GRADOS DE LATENCIA EN LA REGIÓN DE ÑUBLE

Agronomic evaluation and adaptability of alfalfa varieties (*Medicago sativa* L.) With different degrees of dormancy in the Region Ñuble.

Palabras índice adicionales: Reposo invernal, disponibilidad, rendimiento, calidad nutricional.

3.1 Resumen

El estudio se desarrolló durante los meses de noviembre del 2015 a octubre del 2016 en la Estación Experimental El Nogal, Facultad de Agronomía de la Universidad de Concepción, se evaluó agronómicamente una pradera de alfalfa en su segundo año de producción, la cual constaba con tres latencias y por cada latencia tres variedades. Su análisis se realizó entre los distintos valores de latencias y anidando los cultivares por latencias. Respecto a la altura no disturbada, las plantas de latencia 9 fueron las más altas y dentro de las de latencia 4 se destacan los cultivares VPC-a y WL330, para las de latencia 6 al cultivar VPC-b y para las de latencia 9 el cultivar VPC-c, como el más altos. Con respecto a la proporción de hojas, destacan las plantas de latencias 4 y 6, para el área foliar destaca la latencia 9. Para la disponibilidad, en el segundo y tercer uso las plantas de latencia 4 fueron mayores y en el sexto uso destaca la latencia 9, no existiendo diferencias significativas ($P \leq 0,05$) en el rendimiento acumulado entre latencias, para las plantas dentro de la latencia 4, latencia 6 y latencia 9 no existieron diferencias significativas ($P \leq$

0,05). Por último, se destacan a los cultivares con mejores características nutricionales en la época de primavera al cultivar Súper Lechera, en la época de verano al cultivar WL 330, en la época de otoño a los cultivares WL 330 y 450 acb y en invierno al cultivar WL 903. Este estudio sugiere que sería posible el uso de variedades de alfalfa asignadas normalmente a zona central (mayor latencia) en la zona centro sur.

3.2 Summary

The study was developed during the months of November 2015 to October 2016 at El Nogal Experimental Station, of the Faculty of Agronomy at the University of Concepción, where an alfalfa meadow in its second year of production was agronomically evaluated along with a chemical analysis, which consisted of three latencies and three varieties for each latency. Its description was made between the different latency values and nesting the cultivars in their respective latencies. Regarding the undisturbed height, the plants with latency 9 were the highest and within those with latency 4, the cultivars VPC-a and WL330 stand out, for those with latency 6 when cultivating VPC-b and for those with latency 9 the cultivar VPC-c, as the highest. Regarding the proportion of leaves, the plants with latencies 4 and 6 stand out, for the leaf area latency 9 stands out. For availability, the 4 latency plants, in the second and third use, were higher and in the sixth use latency 9 stands out, even so there were no significant differences ($P \leq 0.05$) in the accumulated yield between latencies, on the other hand, for the plants within latency 4, latency 6 and latency 9, there were no significant differences ($P \leq 0.05$). Finally, the cultivars with better nutritional characteristics stand out in the spring season when cultivating Súper Lechera, in the summer season when cultivating WL 330, in the autumn season with cultivars WL 330 and 450 acb and for the winter season when growing WL 903. This study suggests that it would be possible to use alfalfa varieties normally assigned to the zona central (greater dormancy) in the zona centro sur.

3.3 Introducción

Existen numerosas especies de leguminosas, clasificadas como forrajeras, una de ellas es alfalfa (*Medicago sativa* L.). Esta especie se encuentra distribuida a lo largo de todo el mundo, su zona de origen es Medio Oriente, Asia menor y sur del Cáucaso (Del Pozo, 1983), la cual fue traída a América por los conquistadores españoles en el siglo XV (Del Pozo, 1983; Suttie, 2003). La importancia de alfalfa para la alimentación animal se debe por su alto contenido en proteína junto a un buen rendimiento, el cual puede variar de un

17 a 25% de proteína cruda (PC) Base materia seca (BMS) (Soto, 2000a), acompañados de rendimientos anuales que van desde 8,6 t MS x ha⁻¹ a 18,7 t MS x ha⁻¹, (Chahín, 1990; Lloverás y Angels, 2015).

Alfalfa posee distintos requerimientos de temperaturas y fotoperiodos que caracterizan su crecimiento durante la época de otoño invierno, se le llama latencia, a la característica genética en alfalfa que produce la disminución de la tasa de crecimiento durante periodos de bajas temperaturas, principalmente en la época de otoño invierno, de esta manera logra sobrevivir a las heladas invernales (Rossanigo, 1997; Rebuffo *et al.*, 2000). Se conocen varias subespecies de alfalfa, una de ellas es llamada *M. sativa* subsp. *varia*, la cual se originó de un cruzamiento entre *M. sativa* subsp. *sativa* (sin latencia) y *M. sativa* subsp. *falcata* (con latencia) (Suttie, 2003); la subespecie *varia*, posee latencias intermedias, que por estímulo de las bajas temperaturas y disminución del fotoperiodo durante la época de otoño invierno, disminuye su tasa de crecimiento (Soto, 2000a). Cabe destacar que la subespecie *varia* (latencia intermedia) posee una mayor tasa de crecimiento durante el periodo de otoño invierno que la subespecie *falcata* (con latencia) (Rossanigo *et al.*, 1995).

Los grados de latencia indican cuanto crece alfalfa en periodos de bajas temperaturas invernales. Este es uno de los aspectos más relevantes de las características varietales, ya que determina la distribución estacional de forraje, en particular el potencial de crecimiento en climas con bajas temperaturas (Rebuffo *et al.*, 2000).

La clasificación de los grados de latencias en alfalfa es establecida por el National Alfalfa & Forrage Alliance (USA) y Association of Official Seed Certifying Agencies (AOSCA), la cual clasifica en 6 categorías con 11 grados de latencias distintos los cuales se observan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Categorías según los distintos grados de latencias descritas por el Certified Alfalfa Seed Council.

GRADO DE LATENCIA	CATEGORÍAS
1-2	Muy latente
3-4	Latente
5	Moderadamente latente
6-7	Semi-latente
8-9	No latente
10-11	Muy no latente

Fuente: National Alfalfa & Forrage Alliance (NAFA) (2018).

Una alfalfa dentro de la categoría muy latente, que presenta grados de latencia 1 o 2, es aquella que con los primeros fríos de otoño de inmediato disminuye su tasa de crecimiento, iniciando su latencia hasta la primavera siguiente. Por el contrario, una alfalfa con grado de latencia 10 u 11, categoría “muy no latente”, muestra una mayor tasa de crecimiento, aún con las bajas temperaturas de otoño e invierno y comienza a crecer más temprano en la primavera. Entre estas dos categorías, se encuentran categorías intermedias (Rossanigo *et al.*, 1995).

En praderas de alfalfa es necesario identificar las características productivas, tanto de calidad y productividad, de los diferentes grados de latencias según la época del año, ya que variedades de alfalfas con distintos grados de latencias tienen producciones diferentes según las condiciones climáticas, en donde independiente del grado de latencia, alfalfa tiene un 65 a 75% del total de su producción en el periodo primavera verano y la producción netamente de verano está entre 28 a 33% del total anual, es en el periodo de otoño invierno, que se presentan las diferencias de producción entre los grados de latencias, ya que las variedades dentro de las categorías “muy no latente” y “no latente” producen un 16 a 20% del forraje mientras que las variedades que se encuentran en las categorías “muy latente” y “latente” producen un 6 a 10% de forraje en el mismo periodo (Rebuffo *et al.*, 2000).

Una característica relevante de los cultivares de alfalfa, que se encuentran dentro de las categorías “Muy no latentes” y “no latentes”, es la posibilidad de obtener mayor número de usos, ya que estas variedades tienen mayor tasa de crecimiento durante el periodo de otoño invierno que las variedades que se encuentran en el resto de las categorías (Rebuffo *et al.*, 2000) pero cabe destacar que al tener un determinado crecimiento durante el periodo de invierno, en donde se registran bajas temperaturas, las heladas invernales pueden dañar considerablemente a las plantas que se encuentran en estas categorías, dando como resultado la muerte de éstas (Rebuffo *et al.*, 2000; Soto, 2000).

“El uso eficiente de alfalfa se basa en el conocimiento de sus procesos de crecimiento, para lograr un manejo racional que permita la obtención de un alto rendimiento y calidad del forraje, como también, el logro de una persistencia aceptable de la pradera” (Soto, 2000). Para lograr esto es indispensable conocer el crecimiento de la planta y el momento oportuno de cada uso. Para ello lo que se busca es un equilibrio entre la mayor cantidad de materia seca acompañado de un alto porcentaje de proteína bruta y una buena

persistencia durante las próximas temporadas. Un criterio de uso, para el periodo de producción de la segunda temporada, que se recomienda es el de realizar al menos un uso cuando la alfalfa haya alcanzado un 10% de floración o cuando se observa la aparición de rebrotes de corona y ellos alcancen una altura entre 5 a 7 cm, esto indica que la planta ha logrado recuperar las reservas utilizadas en el nuevo crecimiento después del uso (Del Pozo, 1983; Chahín, 1990; Rossanigo, 1997; Soto, 2000b; Cornacchione, 2003). El resto de los cortes se puede realizar en estado de pre-yema, con ello se puede obtener altos rendimientos de forraje de buena calidad y que perdure en el tiempo. El uso con la aparición de rebrotes de corona, se recomienda que sea en invierno (Chahín, 1990; Soto, 2000b), permitiendo una mejor sobrevivencia de plantas durante el invierno y buen rebrote del próximo crecimiento en primavera, si de lo contrario la planta no alcanza a reservar una buena cantidad de carbohidratos que le permita un rápido crecimiento posterior, esto podría disminuir el número de rebrotes, mayor incidencia de enfermedades y un crecimiento en primavera más lento (Soto, 2000a). De acuerdo a lo anterior es importante establecer la variedad de alfalfa, según su grado de latencia, más apta para la zona edafoclimática en la cual se desea establecer el cultivo con el fin de obtener buenos rendimientos acompañado de una buena calidad del forraje y una buena persistencia, es así que Becerra (2003), indica que en los valles transversales de la Zona Norte y Centro Norte del país (Región de Arica y Parinacota hasta la Región de Coquimbo) tiene las mejores condiciones para las variedades de alfalfa con grado de latencia 8 y 9; para el Valle Central de la Zona Centro Sur (Región Metropolitana hasta la Región del Bío Bío) se pueden utilizar variedades con grado de latencia 4 a 9, y para la Zona Sur (Región de la Araucanía hasta la Región de los Lagos) se pueden utilizar variedades con grados de latencia 1 a 4.

Debido a las variaciones de temperatura registradas en los últimos años, existe la posibilidad del traslado de las condiciones climáticas, de la Zona Centro Norte a la Zona Centro Sur de Chile (Abdón *et al.*, 2008) y con ello la introducción de nuevas variedades de alfalfa, lleva a reubicar las variedades de alfalfa, según su latencia y así desarrollar un mejor potencial productivo según la zona edafoclimática.

La hipótesis de este estudio es que praderas de alfalfa (*Medicago sativa* L.) de segundo año con distintos grados de latencia presentan diferencias en rendimiento de materia seca y calidad nutricional a lo largo de la temporada, en Valle Central Regado de la Región de

Ñuble, como resultado de su mejoramiento genético y de los cambios de las condiciones ambientales del área.

El objetivo de este estudio es evaluar la adaptación de praderas de alfalfa con distintos grados de latencia, en condiciones de riego, en las condiciones ambientales actuales de la Provincia de Punilla, Región de Ñuble.

Para dar respuesta a ese objetivo se plantean como objetivos específicos, evaluar la disponibilidad y producción de forraje, la composición química de éste y algunos componentes estructurales de las plantas (proporción y tamaño de hojas).

3.4 Materiales y métodos

3.4.1 Ubicación del estudio

La investigación se realizó en la Estación Experimental El Nogal perteneciente a la Facultad de Agronomía de la Universidad de Concepción del Campus Chillán, la cual se encuentra ubicada en las coordenadas 36°35'50.67" S y 72°04'41.79" O, en Provincia de Diguillín, Región de Ñuble El estudio se desarrolló entre los meses de noviembre del 2015 hasta octubre del 2016.

3.4.2 Características del suelo

La ubicación de este estudio corresponde a la serie Bulnes, con texturas franco arcillosas a franco, su drenaje es bueno, pero con una lenta permeabilidad, pH en los rangos de 5,6 a 6,0; porcentaje de materia orgánica bajo (< 5%). Su topografía es casi plana a ligeramente ondulada y su profundidad varía desde muy delgada a moderadamente profunda (Stolpe, 2006) (análisis de suelo inicial año 2, en anexos 3.1 y 3.2).

3.4.3 Especie forrajera usada y sus variedades

Se utilizaron nueve variedades de alfalfa (*Medicago sativa* L.), con tres grados de latencia (4, 6 y 9), utilizándose por cada latencia tres variedades (Tabla 3.2).

- Variedad WL 330. Variedad con grado de latencia 4, ideal para zona Sur y la precordillera, donde las alfalfas menos dormantes tienen restricciones por las bajas temperaturas. Especial para la elaboración de heno, logrando un contenido de proteína mayor a 20% BMS (Anasac, 2016).
- Variedad WL 458. Variedad con grado de latencia 6, se recomienda para la Zona Centro y Centro Sur de Chile, especialmente indicado para lechería o sistemas de

conservación de forraje, es un cultivar el cual puede llegar a producir en 4 años un promedio de 19,5 t MS x ha⁻¹ x año⁻¹ (Anasac, 2016).

Tabla 3.2. Variedades de alfalfa utilizadas con su grado de latencia.

GRADO DE LATENCIA	TRATAMIENTO
4	Variedad pre comercial A (VPC-A)
	WL 330
	350 ACB
6	Variedad pre comercial B (VPC-B)
	WL 458
	450 ACB
9	Variedad pre comercial C (VPC-C)
	WL 903
	Súper lechera (SL)

- Variedad WL 903. Variedad con grado de latencia 9, se recomienda para la zona centro y centro sur de Chile, especialmente para lecherías intensivas y sistemas que requieren producción de alfalfa durante todo el año (Anasac, 2016).
- Variedad 350 acb. Variedad con grado de latencia 4, se recomienda desde zona sur hasta Punta Arenas, poco crecimiento en invierno ideal para su utilización en forma de heno, 4 a 5 usos por temporada con una buena persistencia (A.C. Baldrich Chile, 2017).
- Variedad 450 acb. Variedad con grado de latencia 6, se recomienda desde la zona centro y pre cordillera de la zona centro sur, 4 a 6 usos por temporadas con una persistencia de 4 a 5 años (A.C. Baldrich Chile, 2017).
- Variedad Súper Lechera. Variedad con grado de latencia 9, se recomienda desde Arica hasta los Ángeles. Su potencial productivo aproximado, es de 22% de proteína cruda y 9 usos por temporada (A.C. Baldrich Chile, 2017).

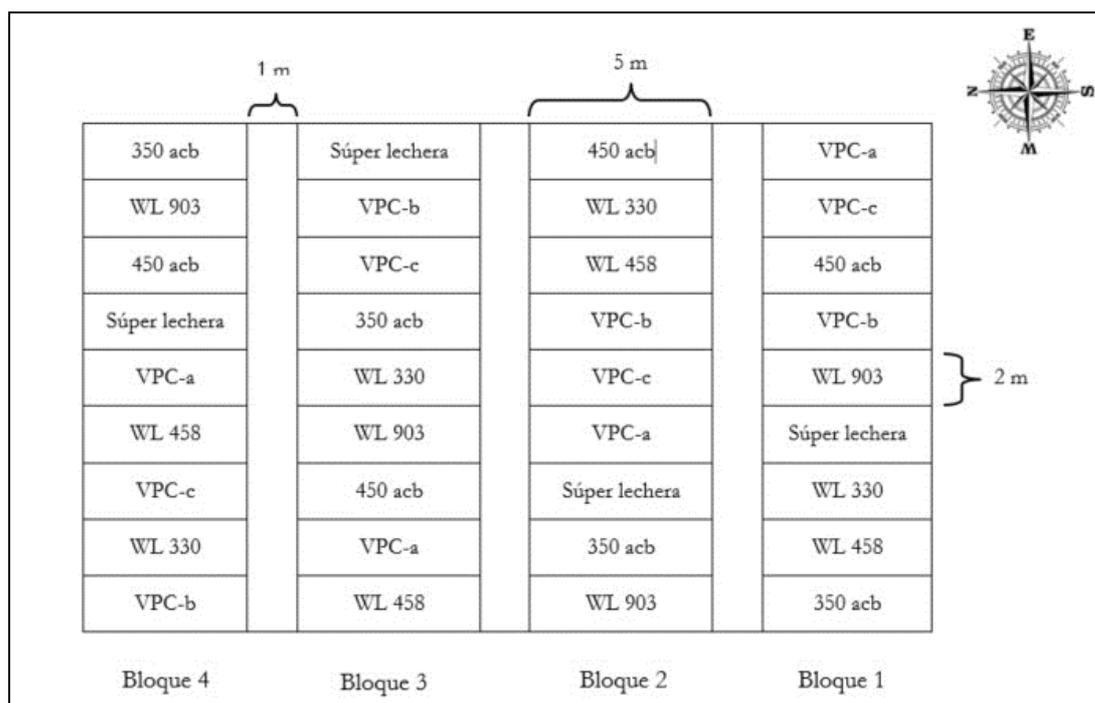
3.4.4 Siembra y manejos agronómicos durante el primer año de estudio

El suelo se preparó, dejando una cama de siembra mullida. Al momento de la siembra (07 de octubre de 2014), se fertilizó el sector de acuerdo a los requerimientos del cultivo y el análisis de suelo, con el fin de que los nutrientes no sean una limitante durante el desarrollo, quedando así una dosis de siembra de 400 kg x ha⁻¹ de una mezcla de NPK a la razón de 15:22:22, posteriormente se depositaron las semillas de forma continua en

hileras separadas a 20 cm y con una profundidad de 2 cm, el control de malezas se realizó con el ingrediente activo (i.a.) Imazetapir (Pivot®) a una dosis de 1 L x ha⁻¹, una vez que las plantas alcanzaron las 3 hojas verdaderas y los riegos se realizaron a través de un pivote central, el cual fue reponiendo la lámina de agua que se perdía durante la semana hasta la finalización del estudio. Se realizaron cinco cortes durante la primera temporada dejando 9 cm de residuo.

El diseño experimental utilizado fue de bloques completos al Azar (BCA), con nueve tratamientos, los que se agruparon de acuerdo a los grados de latencia (latencias 4, 6 y 9). Por cada tratamiento se realizó cuatro repeticiones, obteniendo un total de 36 unidades experimentales. En lo referente al sitio experimental, la Figura 3.1 muestra la superficie del estudio, la cual tiene un área de 500 m², divididas en cuatro bloques, que representan cada repetición, cada uno con nueve parcelas de 10 m² para cada unidad experimental, y 1 m de separación entre cada bloque.

Figura 3.1. Distribución de tratamientos.



VPC-a= Variedad pre comercial a; VPC-b= Variedad pre comercial b; VPC-c= Variedad pre comercial c.

El criterio de uso, desde el primero al sexto uso, fue cuando uno de los tratamientos alcanzó el estado de pre-yema y el séptimo (último uso) se realizó cuando uno de los cultivares presentó un crecimiento de rebrote de una altura de 5 cm. Las muestras se

obtuvieron cortando la pradera con una máquina cortadora de césped marca (MURRAY® Briggs & Stratton serie 625Ede 190cc), dejando un residuo de 9 cm.

El control de malezas se realizó con el i.a. Cletodima (CENTURION® SÚPER) a razón de 4 L x ha⁻¹ de producto comercial, el cual es un herbicida sistémico para el control de gramíneas anuales y perennes. Este se aplicó con una máquina pulverizadora de espalda con una boquilla y una capacidad total de estanque de 15 litros, se aplicó el día siguiente del primer uso (07-11-2015).

3.4.5 Evaluaciones

Las evaluaciones realizadas consistieron en la determinación de:

- Altura no disturbada de la pradera (cm). Se midió con una huincha métrica antes de cada uso, 10 veces por cada unidad experimental, los datos fueron expresados en centímetros.
- Disponibilidad forraje (kg MS x ha⁻¹). Previo a realizar los cortes de cada unidad experimental, se eliminaron los primeros y últimos 50 cm de cada bloque para así evitar el efecto borde en la toma de datos, luego se cortaron las hileras centrales (5, 6 y 7) de cada unidad experimental (2,4 m²), finalmente se procedió a homogeneizar toda la pradera, cortando todo el material restante a una altura de 9 cm, la muestra obtenida fue pesada en una balanza digital (Roble-10J). Los resultados obtenidos fueron expresados en kilogramos de materia verde por hectárea (kg MV x ha⁻¹). Luego se obtuvo una submuestra de 200 g por cada unidad experimental, la cual fue depositada en una bolsa individual de papel rotulada y posteriormente ingresada a un horno con ventilación forzada marca Köttermann® a 65° C, hasta alcanzar un peso constante, finalmente las muestras secas se pesaron en una balanza digital marca Mettler-Toledo PB8001 con 0,1 g de sensibilidad. Con los datos de materia verde (MV) y materia seca (MS) se estimó el porcentaje de MS y disponibilidad en kilogramos de materia seca por hectárea (kg MS x ha⁻¹).
- Producción de forraje (kg MS x ha⁻¹ x temporada⁻¹). Corresponde a la sumatoria de las disponibilidades (kg MS x ha⁻¹) de cada unidad experimental a lo largo de la temporada, esto permitió estimar el rendimiento que obtuvo cada unidad experimental considerando una altura de residuo de 9 cm.

- Proporción de hojas (% BMS). En cada uso se tomó una submuestra de plantas por cada unidad experimental y se procedió a descomponer las distintas estructuras de la planta, separando así las hojas de los tallos y en algunos casos de las yemas florales o flores. Posteriormente todas las estructuras fueron ingresadas a un horno con ventilación forzada marca Köttermann® a 65° C hasta que alcanzaron un peso constante. Con estos valores de peso seco de cada estructura, se calculó el aporte porcentual de hojas de cada tratamiento.
- Composición química del forraje. Se utilizó una muestra compuesta por plantas de alfalfa de cada uso, agrupándolos, según la época en la que se realizaron. La muestra fue realizada proporcional al aporte realizado de cada uso, donde el primer uso fue el de primavera, el segundo, tercero y cuarto uso se agruparon como el grupo de verano, el quinto y sexto uso como el grupo de otoño y el séptimo fue de invierno. Las muestras fueron enviadas al Laboratorio de Nutrición Animal, perteneciente al Departamento de Producción Animal de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Concepción del Campus Chillán, donde se realizó el análisis nutricional, determinándose proteína cruda (PC)(método Kjeldahl AOAC, 991.20, AOAC, 2005), fibra detergente neutro (FDN) y fibra detergente ácida (método de Van Soest (1991)), lignina (método de lignina AOAC, 973.18, (AOAC, 2005)), cenizas totales (método de calcinación AOAC 923.05 (AOAC, 2005)) y se calculó la energía metabolizable (EM) con la fórmula propuesta por Marble (1984) utilizando el valor de FDA (%).

$$EM = \{0,0428 \times [88,9 - (0,779 \times FDA)] - 0,027\} \times 0,82$$

- Área foliar (mm² x hoja⁻¹). A inicio de primavera por cada unidad experimental se extrajeron 10 hojas plenamente extendidas (compuestas por sus foliolo, peciolulo, peciolo, y estípula) principalmente de la zona fotosintéticamente activa (dos tercios superior de cada planta) de diversas plantas al azar, de las hileras centrales, para posteriormente medir el área foliar en milímetros cuadrados de cada una de las hoja de los distintos tratamientos, se ubicó cada hoja a analizar en una base Ivens, para ser analizada por el instrumento ΔT Area Meter MKZ, mostrando los resultado en un monitor.

3.4.6 Análisis de datos

Los datos obtenidos de, altura no disturbada, proporción de hojas, área foliar, disponibilidad y rendimiento fueron sometidos a análisis de varianza (ANDEVA). Previo

a la comprobación de los supuestos de varianza de normalidad con el test de Shapiro-Wilks modificado y la de homogeneidad con la prueba de Levene. Las variables que presentaron diferencia estadística significativa ($P \leq 0,05$) se les realizó una prueba de comparación de medias, con el test de Duncan a un nivel de confianza del 95%, agrupando por latencia y anidando los tratamientos en su respectiva latencia. Los datos de la variable calidad nutricional, se les analizó por medio de un análisis descriptivo. Los análisis estadísticos fueron analizados en el programa estadístico INFOSTAT® (Balzarini *et al.*, 2008).

3.5 Resultados y discusión

3.5.1 Altura de la pradera.

La Tabla 3.3 muestra la altura de la pradera agrupadas por latencia. Desde el primer uso, se presentó una diferencia significativa entre tratamientos ($P \leq 0,05$) donde las plantas de latencia 9, en seis de los usos, presentaron las mayores alturas, siendo igual a las de latencia 6 en el uso de diciembre, mientras que las plantas de latencia 4 en el uso de marzo mostraron una altura significativamente mayor que las de latencia 6. Esto podría deberse a que las plantas de latencia 4 y 6 tuvieron una tasa de crecimiento menor que las plantas de latencia 9 a salida de invierno. Lo anterior concuerda con lo presentado por Rebuffo *et al.* (2000), quienes indican que las plantas con mayor grado de latencia comienzan su crecimiento antes que las de menor grado, al terminar su receso invernal. En los usos de verano y otoño las plantas de latencia 9 fueron las que presentaron una mayor altura, esto se puede deber a que acercándose el otoño las plantas de latencia 4 y 6 comienzan su latencia por causa de la reducción de las horas luz y temperatura (Jung *et al.*, 1972; Rebuffo *et al.*, 2000).

Tabla 3.3. Altura (cm) no disturbada de la pradera por cada latencia, previo al uso. (2ª temporada). Provincia de Diguillín, Región de Ñuble.

LATENCIA	ALTURA DE PLANTAS (CM)					
	06/11/15	24/12/15	20/01/16	23/02/16	22/03/16	25/04/16
4	57 A	77 A	72 A	58 A	50 B	25 A
6	56 A	80 AB	72 A	56 A	46 A	25 A
9	60 B	81 B	76 B	62 B	58 C	44 B
C.V. (%)	10	12	16	23	15	29

Valores con letras distintas en sentido vertical indica, diferencia estadística significativa, según prueba de comparación múltiple de Duncan ($P \leq 0,05$); C.V.: Coeficiente de variación.

La Tabla 3.4 muestra la altura de los tratamientos, donde en el primer uso, los tratamientos *VPC-a* y *WL330* se comportaron de manera similar, mostrando las mayores alturas y el tratamiento *350 acb* fue significativamente menor ($P \leq 0,05$) esto podría deberse a que el tratamiento *350 acb* salió del periodo de latencia más tarde que el resto, en el tercer y quinto uso destaca la altura significativamente mayor ($P \leq 0,05$) el tratamiento *VPC-a* esto se podría deber a que este tratamiento tendría una tasa de crecimiento mayor, posiblemente por una mejora genética, no obstante en el sexto uso destaca significativamente la altura de la variedad *350 acb*, posiblemente porque los demás tratamientos entran en periodo de latencia y disminuyen su tasa de crecimiento.

Tabla 3.4. Altura (cm) no disturbada de los tratamientos agrupados por latencia 4, 6 y 9 previo a cada uso. (2ª temporada). Provincia de Diguillín, Región de Ñuble.

LAT.	TTO.	ALTURA DE PLANTAS (CM)					
		06/11/15	24/12/15	20/01/16	23/02/16	22/03/16	25/04/16
4	<i>VPC-A</i>	59 B	78 A	77 C	62 B	55 C	26 B
	<i>WL 330</i>	58 B	75 A	66 A	54 A	44 A	21 A
	<i>350 ACB</i>	55 A	78 A	72 B	59 B	51 B	30 C
	C.V. (%)	9	13	15	19	13	31
6	<i>VPC-B</i>	58 B	84 C	74 A	59 A	48 B	29 B
	<i>WL 458</i>	55 A	76 A	71 A	57 A	44 A	22 A
	<i>450 ACB</i>	56 A	79 B	70 A	54 A	45 A	25 A
	C.V. (%)	9	10	17	27	14	32
9	<i>VPC-C</i>	65 C	84 B	75 A	62 AB	59 A	47 B
	<i>WL 903</i>	60 B	79 A	82 B	66 B	57 A	42 A
	<i>S.L.</i>	56 A	80 AB	72 A	57 A	58 A	43 AB
	C.V. (%)	10	11	13	22	15	23

Valores con letras distintas en sentido vertical dentro de cada latencia indica diferencia estadística significativa, según prueba de comparación múltiple de Duncan ($P \leq 0,05$); LAT.: Latencia.; Tto: Tratamiento; C.V.: Coeficiente de variación.; VPC-a: Variedad pre-comercial a.; VPC-b: Variedad pre-comercial b.; VPC-c: Variedad pre-comercial c; S.L: Súper Lechera.

Al comparar las alturas de los tratamientos de alfalfa con latencia 6 (Tabla 3.4), donde el tratamiento *VPC-b* destaca por su altura significativamente mayor ($P \leq 0,05$), en el primer, segundo, quinto y sexto uso. Esto se podría deber a que el tratamiento *VPC-b* podría presentar una tasa de crecimiento mayor. Al analizar la altura de los tratamientos de alfalfa de latencia 9 (Tabla 3.4), en el primer, segundo, cuarto y sexto uso destaca la variedad *VPC-c*, siendo en el primer uso estadísticamente mayor ($P \leq 0,05$), que la variedad *WL*

903 y *Súper Lechera*, en el segundo uso la variedad *VPC-c* se comporta de manera similar a la variedad *Súper Lechera* y siendo estadísticamente mayor que la variedad *WL 903*, en el cuarto uso las variedades *WL 903* y *VPC-c* son estadísticamente similares siendo este último estadísticamente similar a la variedad *Súper Lechera*, en el sexto uso la variedad *VPC-c* es estadísticamente mayor ($P \leq 0,05$) que la variedad *WL 903* y a su vez estadísticamente similar a *Súper Lechera*. Esto es destacable, ya que el rendimiento de una pradera de alfalfa está influenciado por la altura de las plantas, y a mayor altura de la pradera al momento del corte mayor es el rendimiento en materia seca según lo mencionado por Ayala *et al.* (2006) y Chahín (1990).

3.5.2 Área Foliar

La Tabla 3.5 presenta los valores de área foliar de los tratamientos agrupados por latencia. Los tratamientos agrupados en la latencia 9 fueron significativamente mayores ($P \leq 0,05$), esto concuerda con lo presentado por Rossanigo (1997), quien menciona que las plantas con grados de latencia invernal 8 y 9, poseen folíolos de mayor tamaño, que las plantas con grados de latencias menor, compensando la estructura de sus tallos más finos

Tabla 3.5. Área foliar (mm²) por hojas de cada latencia, (2^a temporada). Provincia de Diguillín, Región de Ñuble.

LATENCIA	ÁREA FOLIAR (MM ²) 07/10/16
4	788,05 A
6	839,06 A
9	918,16 B
Coefficiente de variación (%)	30

Valores con letras distintas en sentido vertical indica, diferencia estadística significativa, según prueba de comparación múltiple de Duncan ($P \leq 0,05$).

En la Tabla 3.6, se muestra el área foliar de los tratamientos por latencia, donde dentro de los tratamientos de alfalfa de latencia 4, el tratamiento *VPC-a* fue el que obtuvo mayor área foliar seguido del tratamiento *350 acb*, *WL330*, respectivamente.

Respecto a la latencia 6 (Tabla 3.6) las variedades de mayor área foliar fueron *450 acb* y *VPC-b*, siendo este último estadísticamente similar a la variedad *WL-458* presentando el valor más bajo. Los tratamientos de alfalfa de latencia 9 (Tabla 3.6) no presentaron diferencias entre sí ($P > 0,05$). El área foliar representa un indicador de calidad en alfalfa

por su rico aporte en proteína cruda en comparación al tallo el cual posee tres veces más fibra que las hojas según Del Pozo (1983).

Tabla 3.6. Área foliar (mm²) por hojas de cada tratamiento agrupados por latencia 4, 6 y 9. 2^a temporada. Provincia de Diguillín, Región de Ñuble.

LATENCIA	TRATAMIENTOS	ÁREA FOLIAR (MM ²) 07/10/16
4	VPC-A	891,80 C
	WL 330	681,13 A
	350 ACB	791,23 B
	Coefficiente de variación (%)	28
6	VPC-B	837,18 AB
	WL 458	774,58 A
	450 ACB	905,43 B
	Coefficiente de variación (%)	30
9	VPC-C	852,45 A
	WL 903	937,43 A
	Súper lechera	964,60 A
	Coefficiente de variación (%)	29

Valores con letras distintas en sentido vertical dentro de cada latencia indica, diferencia estadística significativa, según prueba de comparación múltiple de Duncan ($P \leq 0,05$); VPC-a: Variedad pre comercial a.; VPC-b: Variedad pre comercial b.; VPC-c: Variedad pre comercial c.

3.5.3 Proporción de Hojas

De la proporción de hojas que registró cada grupo de latencia (Tabla 3.7), se observa que desde el tercer al sexto uso, los tratamientos de latencia 4 y 6 obtuvieron la mayor proporción de hojas en comparación a los de latencia 9. Esto concordaría con lo presentado por Rossanigo (1997), quien afirma que las variedades con menor latencia (grados de latencia 8 y 9) poseen menor proporción de hojas que las variedades con mayor latencia (grados de latencia 4 y 6).

Tabla 3.7. Proporción de hojas (% BMS) de las plantas de cada latencia, previo a cada uso. 2ª temporada. Provincia de Diguillín, Región de Ñuble.

LAT.	PROPORCIÓN DE HOJAS (% BMS)						
	06/11/15	24/12/15	20/01/16	23/02/16	22/03/16	25/04/16	27/08/16
4	42 A	37 A	48 B	58 B	60 B	71 B	61 A
6	42 A	34 A	48 B	56 AB	60 B	75 B	59 A
9	39 A	34 A	44 A	51 A	52 A	57 A	55 A
C.V. (%)	14	11	7	13	7	9	13

Valores con letras distintas en sentido vertical indica, diferencia estadística significativa, según prueba de comparación múltiple de Duncan ($P \leq 0,05$); LAT.: Latencia; C.V.: Coeficiente de variación.

Al comparar la proporción de hojas de cada tratamiento agrupados según su latencia (Tabla 3.8), dentro de los tratamientos de latencia 4, en el quinto uso existió diferencia estadística significativa entre las variedades, donde los tratamientos *VPC-a* y *WL 330* fueron iguales entre sí, esta última similar estadísticamente a la variedad *350 acb* siendo este el de menor proporción de hojas. En el resto de los usos no hubo diferencias entre tratamientos ($P > 0,05$). Esto podría deberse a que el tratamiento *350 acb* se encontraría en un estado de desarrollo más avanzado por ende disminuiría la proporción de hoja y aumentaría la proporción de tallo, lo que concuerda con lo dicho por Cornacchione (2003). Por otro lado, los tratamientos de latencia 6, en el sexto uso existió diferencia estadística significativa entre las variedades, donde el tratamiento *WL 458* tuvo la mayor proporción de hojas, la variedad *VPC-b* fue la menor y la variedad *450 acb* un valor intermedio y similar a las dos anteriores.

Mientras que en el caso de los tratamientos de latencia 9 (Tabla 3.8), en el segundo y cuarto uso, existieron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0,05$), donde el tratamiento Súper Lechera tuvo la mayor proporción de hojas, *VPC-c* la menor proporción de hojas y *WL 903* presentó un valor intermedio y similar a las dos anteriores, esto se puede atribuir a una diferencia de estructura de las plantas al momento de la medición. De acuerdo a esto la proporción de hojas en la planta está relacionada directamente con el estado de desarrollo de la misma, siendo mayor la proporción de hojas en la fase vegetativa y disminuyendo según progresa la fase reproductiva, aumentando la proporción de tallo (Del Pozo, 1983; Cornacchione, 2003).

Tabla 3.8. Proporción de hojas (% BMS) de los tratamientos agrupados por latencia 4, 6 y 9. (2ª temporada). Provincia de Diguillín, Región de Ñuble.

LAT.	TTO.	PROPORCIÓN DE HOJAS (% BMS)						
		USO 1	USO 2	USO 3	USO 4	USO 5	USO 6	USO 7
4	VPC-A	42 A	38 A	48 A	58 A	64 B	68 A	60 A
	WL 330	42 A	37 A	49 A	60 A	60 AB	75 A	64 A
	350 ACB	43 A	35 A	48 A	57 A	57 A	71 A	61 A
	C.V. (%)	9	12	7	12	7	9	9
6	VPC-B	40 A	33 A	46 A	55 A	59 A	71 A	57 A
	WL 458	43 A	35 A	49 A	54 A	63 A	80 B	55 A
	450 ACB	42 A	35 A	49 A	60 A	60 A	73 AB	63 A
	C.V. (%)	19	11	9	17	7	7	21
9	VPC-C	38 A	32 A	43 A	47 A	53 A	58 A	54 A
	WL 903	35 A	34 AB	44 A	52 AB	52 A	55 A	54 A
	S.L.	43 A	38 B	45 A	55 B	51 A	59 A	58 A
	C.V. (%)	13	10	7	9	7	8	9

Valores con letras distintas en sentido vertical dentro de cada latencia indica, diferencia estadística significativa, según prueba de comparación múltiple de Duncan ($P \leq 0,05$); LAT.: Latencia.; Tto.: Tratamiento.; C.V.: Coeficiente de variación.; VPC-a: Variedad pre comercial a.; VPC-b: Variedad pre comercial b.; VPC-c: Variedad pre comercial c.; S.L.: Súper Lechera. Uso 1: 06/11/2015.; Uso 2: 24/12/2015.; Uso 3: 20/01/2016.; Uso 4: 23/02/2016.; Uso 5: 22/03/2016.; Uso 6: 25/04/2016.; Uso 7: 27/08/2016.

3.5.4 Disponibilidad y Rendimiento de Materia Seca

La Tabla 3.9 muestra la disponibilidad de materia seca al momento del uso de las distintas latencias de los tratamientos. En el segundo y tercer uso existió diferencias significativas ($P \leq 0,05$) donde la disponibilidad de forraje fue mayor en los tratamiento de latencia 4, esto se podría deber a que las plantas de este grado de latencia, pudieron acumular mayor reservas, después del uso en el periodo de invierno, en comparación a las otras dos latencias, pudiendo obtener una mayor disponibilidad en su próximo uso, lo cual concuerda con Rossanigo (1997) y Cangiano (2007) quien dice que las plantas con grados de latencia bajos 3 o 4 poseen mayor acumulación de carbohidratos de reservas durante el periodo de bajas temperaturas. En el sexto uso fue mayor la disponibilidad de los tratamientos de latencia 9, mientras que en los tratamientos de latencia 4 y 6, no existió diferencia significativa ente sí ($P > 0,05$). Esto coincide con las plantas de latencia 9 las cuales presentaron mayor altura (Tabla 3.3) al momento del uso, lo que indicaría que se obtuvo una mayor cantidad de material en comparación a las demás latencias, lo cual

concuera con lo mencionado por Chahín (1990) y Spada (2007), quien menciona que, los cultivares con reposo, latencia 4 y 6, exhiben en el otoño tallos cortos y postrados, por el contrario, los cultivares sin reposo, latencia 9, continúan creciendo durante el otoño y presentan tallos más erectos.

El rendimiento de cada grupo de latencia (Tabla 3.9) no presentó diferencias estadísticas significativas ($P > 0,05$), concordando con lo presentado por Rebuffo *et al.* (2000) y Rossanigo (1997) los cuales mencionan que, sin importar el grado de latencia de las plantas, la producción final será similar entre sí. Reborá *et al.* (2015) obtuvo resultados similares a los presentados, al comparar el rendimiento final de un alfalfar de primer año con distintos grados de reposos invernales, donde sin importar el grado de reposo, el rendimiento final no presentó diferencias estadísticas significativas.

Tabla 3.9. Disponibilidad (kg MS x ha^{-1}) y rendimiento ($\text{kg MS x ha}^{-1} \times \text{Temporada}^{-1}$) de cada latencia. (2ª temporada). Provincia de Diguillín, Región de Ñuble.

LAT.	DISPONIBILIDAD (KG MS X HA^{-1})							RDTO.
	USO 1	USO 2	USO 3	USO 4	USO 5	USO 6	USO 7	
4	2.161 A	2.530 B	1.985 B	1.376 A	1.217 A	719 A	854 A	10.843 A
6	2.178 A	2.445 B	1.592 A	1.268 A	1.082 A	674 A	954 A	10.193 A
9	2.048 A	2.013 A	1.581 A	1.213 A	1.146 A	992 B	888 A	9.881 A
C.V. (%)	9	18	22	29	17	24	25	11

Valores con letras distintas en sentido vertical indica, diferencia estadística significativa, según prueba de comparación múltiple de Duncan ($P \leq 0,05$); RDTO.: Rendimiento.; LAT.: Latencia.; C.V.: Coeficiente de variación. Uso 1: 06/11/2015.; Uso 2: 24/12/2015.; Uso 3: 20/01/2016.; Uso 4: 23/02/2016.; Uso 5: 22/03/2016.; Uso 6: 25/04/2016.; Uso 7: 27/08/2016.

En la Tabla 3.10 se observan las disponibilidades de forraje de cada tratamiento categorizados por sus latencias, donde los tratamientos de latencia 4 solo en el quinto y sexto uso existieron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0,05$), donde en el quinto uso la variedad *VPC-a* fue el de mayor valor, la variedad *WL 330* obtuvo el menor valor y la variedad *350 acb* un valor intermedio y similar a los dos anteriores, en el sexto uso el de mayor valor fue la variedad *VPC-a* siendo estadísticamente mayor ($P \leq 0,05$) a las demás del grupo.

Para la disponibilidad de forraje de los tratamientos del grupo de latencia 6 (Tabla 3.10), en ninguno de los usos existió diferencias estadísticas significativas entre las variedades ($P > 0,05$). Para los tratamientos de latencia 9 (Tabla 3.10), en el segundo uso presentaron

diferencia estadística significativa ($P \leq 0,05$), siendo la variedad *Súper lechera* la de mayor disponibilidad, *VPC-c* el de menor y la variedad *WL 903* con un valor intermedio y similar a los dos anteriores ,esto coincide con la mayor altura de la variedad *Súper lechera* al momento del uso (Tabla 3.4) lo que implicaría que se recolecto mayor cantidad de material, lo cual coincide con Chahín (1990), quien afirma que el rendimiento estaría influenciado por la altura del corte.

Tabla 3.10. Disponibilidad (kg MS x ha⁻¹) de los tratamientos de latencia 4, 6 y 9. (2^a temporada). Provincia de Diguillín, Región de Ñuble.

LAT.	TTO.	DISPONIBILIDAD (KG MS HA ⁻¹)						
		USO 1	USO 2	USO 3	USO 4	USO 5	USO 6	USO 7
4	VPC-A	2.155 A	2.567 A	2.254 A	1.503 A	1.427 B	989 C	819 A
	WL 330	2.184 A	2.655 A	1.982 A	1.277 A	1.056 A	444 A	855 A
	350 ACB	2.144 A	2.368 A	1.721 A	1.349 A	1.170 AB	725 B	888 A
	C.V.(%)	7	16	18	28	14	22	37
6	VPC-B	2.053 A	2.262 A	1.445 A	1.185 A	1.036 A	730 A	928 A
	WL 458	2.214 A	2.659 A	1.662 A	1.443 A	1.037 A	604 A	1.015 A
	450 ACB	2.266 A	2.413 A	1.670 A	1.176 A	1.174 A	689 A	919 A
	C.V.(%)	14	24	24	33	17	15	25
9	VPC-C	2.110 A	1.857 A	1.322 A	1.113 A	1.031 A	923 A	953 A
	WL 903	2.005 A	1.952 AB	1.748 A	1.401 A	1.155 A	853 A	902 A
	S.L.	2.029 A	2.220 B	1.675 A	1.126 A	1.251 A	1.097 A	810 A
	C.V.(%)	5	11	21	29	13	13	19

Valores con letras distintas en sentido vertical dentro de cada latencia indica, diferencia estadística significativa, según prueba de comparación múltiple de Duncan ($P \leq 0,05$); LAT.: Latencia.; Tto.: Tratamiento.; C.V.: Coeficiente de variación.; VPC-a: Variedad pre comercial a.; VPC-b: Variedad pre comercial b.; VPC-c: Variedad pre comercial c.; S.L.: Súper Lechera. Uso 1: 06/11/2015.; Uso 2: 24/12/2015.; Uso 3: 20/01/2016.; Uso 4: 23/02/2016.; Uso 5: 22/03/2016.; Uso 6: 25/04/2016.; Uso 7: 27/08/2016.

La Tabla 3.11 muestra el rendimiento total de forraje en la primera y segunda temporada y total acumulado de cada tratamiento, según su latencia, donde en la segunda temporada, en ninguno de los tratamientos dentro de cada latencia existió diferencias estadísticas significativas ($P > 0,05$). Esto concuerda con lo presentado por Reborá *et al.* (2015) los cuales mencionan que, sin importar el grado de latencia de las plantas, la producción final será similar entre sí.

Tabla 3.11. Rendimiento (kg MS x ha⁻¹) de los tratamientos de latencia 4, 6 y 9. 1ª y 2ª temporada. Provincia de Diguillín, Región de Ñuble.

LAT.	TRATAMIENTOS	RENDIMIENTO (KG MS HA ⁻¹)		
		1ª TEMPORADA	2ª TEMPORADA	TOTAL
4	VPC-A	8.285 AB	11.713 A	19.998 A
	WL 330	7.494 A	10.452 A	17.946 A
	350 ACB	9.864 B	10.365 A	20.231 A
	C.V. (%)	13	9	9
6	VPC-B	9.021 A	9.639 A	18.660 A
	WL 458	7.614 A	10.778 A	18.392 A
	450 ACB	9.130 A	10.161 A	19.291 A
	C.V. (%)	23	14	17
9	VPC-C	7.975 A	9.314 A	17.289 A
	WL 903	9.276 A	10.113 A	19.389 A
	SÚPER LECHERA	9.688 A	10.217 A	19.904 A
	C.V. (%)	14	8	10

Valores con letras distintas en sentido vertical dentro de cada latencia indica, diferencia estadística significativa, según prueba de comparación múltiple de Duncan ($P \leq 0,05$); LAT.: Latencia.; C.V.: Coeficiente de variación.; VPC-a: Variedad pre comercial a.; VPC-b: Variedad pre comercial b.; VPC-c: Variedad pre comercial c.

La Tabla 3.12 muestra el rendimiento de cada latencia en su 1ª temporada, 2ª temporada y el total acumulado de las dos temporadas, en donde no existieron diferencias estadísticas significativas ($P > 0,05$) en ninguno de los casos, esto concuerda con Reborá *et al.* (2015), quienes en su estudio compararon el rendimiento total de un alfalfar de primer y segundo año con distintos grados de reposo invernal, donde sin importar el grado de reposo, el rendimiento total no presentó diferencias estadísticas significativas, aunque si presentaron diferencia en su disponibilidad a lo largo de la temporada.

Tabla 3.12. Rendimiento por latencia. 1ª y 2ª temporada (kg MS ha⁻¹ x Temporada⁻¹) y rendimiento total (kg MS x ha⁻¹). Provincia de Diguillín, Región de Ñuble.

LATENCIA	RENDIMIENTO (KG MS HA ⁻¹)		
	1ª TEMPORADA	2ª TEMPORADA	TOTAL
4	8.548 A	10.843 A	19.391 A
6	8.588 A	10.193 A	18.781 A
9	8.979 A	9.881 A	18.861 A
C.V. (%)	18	11	12

Valores con letras distintas en sentido vertical indica, diferencia estadística significativa, según prueba de comparación múltiple de Duncan ($P \leq 0,05$); C.V.: Coeficiente de variación.

3.5.5 Composición Química del Forraje

La Tabla 3.13 muestra la composición química del forraje de los tratamientos clasificados según la época en la que se realizaron los usos, se puede observar que, en la época de verano, se obtuvo el menor porcentaje de PC y de EM con respecto a las otras estaciones.

Tabla 3.13. Composición química de forraje de una pradera de *Medicago sativa L.* por época del año y tratamientos. Temporada 2016. Provincia de Diguillín. Región de Ñuble.

	ANÁLISIS (UNIDAD)		COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL FORRAJE								
			VPC- A	WL 330	350 ACB	VPC- B	WL 458	450 ACB	VPC- C	WL 903	SL
PRIMAVERA	EM	M.	2,2	2,3	2,2	2,3	2,2	2,2	2,2	2,2	2,3
	PC	%	19,3	19,9	18,7	19,5	19,9	19,3	18,4	19,0	21,2
	CT	%	11,2	11,4	11,3	11,1	11,3	11,3	11,3	11,5	9,9
	FDN	%	40,8	41,6	42,3	41,9	42,5	43,1	45,5	43,4	39,4
	FDA	%	31,8	29,2	33,3	30,1	32,3	33,1	33,6	33,6	30,7
VERANO	EM	M.	2,1	2,1	2,1	2,0	2,0	2,1	2,0	2,0	2,0
	PC	%	17,6	19,0	18,3	16,7	17,4	17,0	13,5	14,3	17,4
	CT	%	10,6	10,9	10,4	10,1	10,3	10,0	9,5	10,0	10,4
	FDN	%	41,2	43,5	43,1	43,7	44,8	46,8	49,1	49,0	45,6
	FDA	%	35,7	34,9	37,1	38,7	39,3	38,3	41,9	41,5	31,3
OTOÑO	EM	M.	2,3	2,2	2,3	2,4	2,4	2,4	2,3	2,3	2,4
	PC	%	26,6	27,4	26,8	26,4	26,4	27,0	23,8	25,5	24,9
	CT	%	12,4	12,7	12,7	12,8	12,9	12,6	12,9	12,7	13,1
	FDN	%	31,7	29,6	29,3	31,5	32,3	32,5	36,5	36,1	34,6
	FDA	%	30,0	31,6	30,8	25,4	25,3	25,2	29,2	28,6	27,3
INVIERNO	EM	M.	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,3	2,3	2,4	2,2
	PC	%	22,7	22,2	24,0	21,0	21,3	20,7	21,8	25,0	24,6
	CT	%	11,0	11,1	11,1	11,2	11,0	10,6	11,3	11,1	11,0
	FDN	%	36,8	36,0	34,1	35,6	36,1	36,8	38,7	38,3	33,2
	FDA	%	25,1	24,9	24,2	25,6	24,1	28,6	28,6	25,5	31,1

VPC-a: Variedad pre-comercial a.; VPC-b: Variedad pre-comercial b.; VPC-c: Variedad pre-comercial c.; SL: Súper Lechera.; PC: Proteína cruda.; EM: Energía metabolizable.; CT: Cenizas totales.; FDN: Fibra detergente neutro.; FDA: Fibra detergente ácido.; M.: Mcal kg MS⁻¹.; Primavera: Primer Uso.; Verano: Segundo, Tercer y Cuarto Uso.; Otoño: Quinto y Sexto Uso.; Invierno: Séptimo Uso.

Los aportes de FDN y de FDA en verano fueron los más altos a lo largo del estudio; esto se podría deber a la baja proporción de hojas que se observó en los cortes de verano (Tabla 3.8). Del Pozo (1983) y Cangiano (2007) mencionan que las hojas contienen la mayor cantidad de proteína cruda en comparación a los tallos, mientras que los tallos poseen tres veces más FDN y FDA que las hojas, de acuerdo con esto, al acercarse a la etapa reproductiva se genera un engrosamiento de los tallos, junto a esto aumenta en el porcentaje de celulosa y lignina en dicha estructura. En la época de otoño se presentan los mayores porcentajes de PC y EM y disminuyen los porcentajes de FDN y FDA, esto se podría deber a que en esa época se observaron las mayores proporciones de hojas (Tabla 3.8) reflejándose en un aumento de la PC, que explicaría la disminución de FDN y FDA.

Cuando se analiza la composición química individual de los tratamientos durante la época de primavera, destaca al tratamiento *SL*, ya que presenta las características nutricionales más deseadas, mostrando altos niveles de EM y de PC, junto con bajos valores en FDN y FDA. Al contrario, el tratamiento *VPC-c* presentó el menor porcentaje de PC y el mayor porcentaje de FDN y FDA.

Con respecto a la composición química de los tratamientos durante la época de verano (Tabla 3.13), destaca el tratamiento *WL 330* con mejores características nutricionales, ya que posee el porcentaje más alto de PC, el valor más alto de EM y segundo más bajo de FDA. Por el contrario, el tratamiento *VPC-c* presentó el nivel más bajo de EM, el más bajo porcentaje de PC y los más altos porcentajes de FDN y FDA.

Observando la composición química de los tratamientos para la época de otoño (Tabla 3.13), destaca el tratamiento *WL 330* con mejores características nutricionales, presentando el más alto porcentaje de PC, el tercer más alto nivel de EM y el segundo más bajo porcentaje de FDN, también destaca el tratamiento *450 acb* presentando el segundo porcentaje más alto de PC, el más alto valor de EM y el porcentaje más bajo de FDA, mientras que por el contrario el tratamiento *VPC-c* presentó el más bajo nivel de PC y el más alto porcentaje de FDN.

Por último y comparando la composición química de los tratamientos para la época de invierno (Tabla 3.13), el cultivar *WL 903* con mejor característica nutricional, presentando el porcentaje más alto de PC junto al valor más alto de EM, por el contrario, el tratamiento *SL* presentó en valor más bajo de EM junto a un porcentaje más alto de FDA.

3.6 Conclusiones

Este capítulo fue desarrollado en el contexto de un clima cambiante, donde las variaciones de temperatura registradas en los últimos años hacen pensar en la posibilidad del traslado de las condiciones climáticas, desde la zona centro norte a la zona centro sur de Chile. Este cambio ambiental podría generar ajustes en cuanto a las recomendaciones de uso de variedades de alfalfa con menor dormancia invernal en zonas geográficas donde habitualmente no se adaptaban, por ser muy frías.

Luego de evaluar praderas de variedades de Alfalfa con distinta dormancia invernal, se puede concluir que no se evidencian diferencias en productividad o calidad del forraje entre los cultivares evaluados, por lo que se puede sugerir que el cambio en las condiciones ambientales han permitido que variedades de alfalfa menos tolerantes al frío, como son las de latencia 9, se adapten en la Región Ñuble bajo condiciones de riego.

Este estudio permitirá sugerir cambios en las recomendaciones de uso de alfalfa según su latencia y zona geográfica, pero se recomienda realizar otros estudios con alfalfa de menor latencia invernal, como las de latencia 9, para evaluar su comportamiento en la pradera en el largo plazo, en aspectos como la persistencia.

3.7 Referencias

- Abdon L. y F. Meza. 2008. Cambio climático: consecuencias y desafíos para Chile. N°19. *Pontificia Universidad Católica De Chile*. Santiago, Chile.
- Anasac. WL alfalfas, de la mejor semilla la mejor alfalfa [tríptico]. *Anasac. Chile*. 2016.
- A.C. Baldrich Chile. 2017. *Super Alfalfas®* [en línea]. Chile. <<https://www.alfalfasbaldrich.cl/super-alfalfas/>> [Consulta: 23 julio 2018].
- AOAC (USA). 2005. Official methods of analysis of AOAC International. (18th. ed.). *AOAC International*. Gaithersburg, USA.
- Balzarini, M.G., L.A. Gonzalez, E.M. Tablada, F. Casanoves, J.A. Di Rienzo y C.W. Robledo. 2008. *InfoStat: software estadístico. Manual del usuario*. Brujas. Córdoba, Argentina.
- Becerra, C.M. 2003. Productividad de cuatro cultivares y tres líneas de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en un Andisol de la Región de La Araucanía. Tesis, Ingeniero Agrónomo. *Universidad de La Frontera, Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales*. Temuco, Chile.
- Cangiano, C. 2007. Crecimiento y manejo de la defoliación. pp: 249-271. En: D.H. Basigalup (Ed.). El cultivo de la alfalfa en la Argentina. *Ediciones INTA*. Buenos Aires, Argentina.

Chahín, G. 1990. Bases fisiológicas para la utilización de la alfalfa. pp: 184-196. Serie Quillamapu N°24. *INLA Quillamapu. Chillán, Chile.*

Cornacchione, M. 2003. Alfalfa, crecimiento y manejo para un uso eficiente como integrante de la cadena forrajera de los sistemas ganaderos locales [en línea]. *Sitio Argentino de Producción Animal*. <http://www.produccionanimal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pasturas_cultivadas_alfalfa/04-alfalfa_sgo_del_estero.pdf>. [Consulta: 16 de abril 2018].

Jung, G.A. and K.L. Larson. 1972. Cold, drought, and heat tolerance. pp: 185-206. In: C.H. Hanson (Ed.). *Alfalfa science and technology. American Society of Agronomy*. Madison, USA.

Lloveras, J. y M^a. Angels. 2015. La calidad en la alfalfa, posibles clasificaciones. *Rev. Vida Rural*. (395):36-40 [en línea].

Marble, V.L. 1984. A new system for determining alfalfa hay quality: acid detergent fiber [en línea]. *University of California Alfalfa & Forages, USA*. <alfalfa.ucdavis.edu/+symposium/proceedings/1984/84-22.pdf>. [Consulta: 02 agosto 2016].

Morales, J., J. Jiménez, V.L. Velasco, Y. Villegas, J. Enríquez del Valle, G. A. Hernández. 2006. Evaluación de 14 variedades de alfalfa con fertirriego en la Mixteca de Oaxaca. *Técnica Pecuaria en México*. 44(3): 277-288. [en línea] <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61344301>>. [Consulta: 5 de septiembre 2019].

National Alfalfa & Forrage Alliance. 2018. Alfalfa variety ratings: winter survival, fall dormancy & pest resistance ratings for alfalfa varieties [en línea]. *NAFA, USA*. <https://www.alfalfa.org/pdf/2018_Variety_Leaflet.pdf>. [Consulta: 16 de abril 2018].

Pozo, M. del. 1983. La alfalfa: su cultivo y aprovechamiento. (3a. ed.). *Ediciones Mundi-Prensa*. Madrid, España.

Rebora, C., A. Barros, L. Ibarguren, A. Betona, C. Antonini y F. Arenas. 2015. Efecto del grado de reposo invernal de alfalfa (*Medicago sativa* L.) sobre el rendimiento de heno en el oasis norte de Mendoza [en línea]. <http://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/7508/04-rebora-fca47-2.pdf>. [Consulta: 20 junio 2019].

Rebuffo, M., D.F. Risso y E. Restaino. 2000. Tecnología en alfalfa. Boletín de Divulgación N°69. *INLA. Montevideo, Uruguay*.

Romero, O. 1990. Perspectivas de la alfalfa en la zona sur (IX y X Región). pp: 197-213. Serie Quillamapu N°24. *INLA Quillamapu. Chillán, Chile.*

Rossanigo, R. 1997. Alfalfa: panorama varietal; plagas; control malezas; utilización y manejo [en línea]. *Sitio Argentino de Producción Animal*. <http://www.produccionanimal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pasturas_cultivadas_alfalfa/25-alfalfa.pdf>. [Consulta: 16 de abril 2018].

Smith, D. 1972. Cutting schedules and maintaining pure stands. pp: 481-493. In: C.H. Hanson (Ed.). Alfalfa science and technology. *American Society of Agronomy*. Madison, USA.

Soto, P. 2000a. Variedades de alfalfa para la zona centro sur. pp: 25-38. En: Alfalfa en la zona centro sur de Chile. Colección Libros INIA N°4. *INIA Quillamapu*. Chillán, Chile.

Soto, P. 2000b. Crecimiento y desarrollo de la alfalfa. pp: 151-162. En: Alfalfa en la zona centro sur de Chile. Colección Libros INIA N°4. *INIA Quillamapu*. Chillán, Chile.

Spada, M. 2007. Evaluación de cultivares y panorama varietal. pp: 133-149. En: D.H. Basigalup (Ed.). El cultivo de la alfalfa en la Argentina. *Ediciones INTA*. Buenos Aires, Argentina.

Stolpe N., 2006. Descripciones de los principales suelos de la VIII Region de Chile. Universidad de Concepción. *Departamento de Suelos y Recursos Naturales. Facultad de Agronomía*. pp: 36-37.

Suttie, J.M. 2003. Conservación de heno y paja para pequeños productores y en condiciones pastoriles. Colección FAO: *Producción y Protección Vegetal N°29*. FAO. Roma, Italia.

Van Soest, P.J., J.B. Robertson and B.A. Lewis. 1991. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *J. Dairy Sci.* 74(10): 3583-3597.

3.8 Anexos

Anexo 3.1. Análisis de suelo inicial por cada tratamiento (20 cm de profundidad).

Tipo de análisis	INICIAL									
	UNIDAD	LPC-A	WL 330	350 ACB	LPC-B	WL 458	450 ACB	LPC-C	WL 903	SL
PH en agua		6,54	6,50	6,54	6,50	6,54	6,49	6,45	6,43	6,34
Materia orgánica	%	4,38	4,59	4,42	4,14	4,35	3,79	4,27	4,05	4,11
Nitratos (N-NO ₃)	MG X KG ⁻¹	10,3	9,4	9,7	9,5	8,3	8,2	9,0	8,9	9,6
Fósforo Olsen	MG X KG ⁻¹	48,6	50,4	43,7	46,7	48,0	43,6	49,4	47,4	47,5
K disponible	MG X KG ⁻¹	397,4	397,4	455,3	415,3	449,3	344,4	383,4	406,3	392,4
K intercambiable	CMOL X KG ⁻¹	1,02	1,02	1,17	1,06	1,15	0,88	0,98	1,04	1,01
Ca intercambiable	CMOL X KG ⁻¹	15,78	14,85	12,90	12,48	17,95	15,31	16,19	17,95	16,75
Mg intercambiable	CMOL X KG ⁻¹	1,78	1,69	1,64	1,73	1,66	1,55	1,69	1,68	1,70
Na intercambiable	CMOL X KG ⁻¹	0,14	0,14	0,13	0,20	0,11	0,18	0,13	0,13	0,15
Suma de bases	CMOL X KG ⁻¹	18,72	17,7	15,84	15,46	20,88	17,93	19,01	20,81	19,61
Al de intercambio	CMOL X KG ⁻¹	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,02	0,04
Cice	CMOL X KG ⁻¹	18,73	17,71	15,86	15,49	20,90	17,96	19,04	20,83	19,64

Anexo 3.2. Análisis de suelo inicial del terreno por cada tratamiento (continuación).

Tipo de análisis	UNIDAD	INICIAL								
		LPC-A	WL 330	350 ACB	LPC-B	WL 458	450 ACB	LPC-C	WL 903	SL
Saturación de Al	%	0,05	0,07	0,14	0,16	0,01	0,17	0,19	0,11	0,19
Saturación de K	%	5,44	5,75	7,36	6,88	5,51	4,92	5,16	5,00	5,12
Saturación de Ca	%	84,26	83,85	81,28	80,55	85,90	85,24	85,05	86,19	85,27
Saturación de Mg	%	9,48	9,51	10,36	11,15	7,94	8,65	8,89	8,05	8,66
S disponible	MG X KG ⁻¹	1,6	1,0	1,0	1,4	1,1	1,0	1,4	1,4	1,3
Fe	MG X KG ⁻¹	108,4	127,0	143,4	157,6	123,6	157,0	133,0	129,8	104,8
Mn	MG X KG ⁻¹	35,4	39,0	33,8	46,2	36,8	42,4	35,2	35,8	31,0
Zn	MG X KG ⁻¹	2,0	2,0	1,8	2,4	2,0	2,1	2,0	1,8	1,7
Cu	MG X KG ⁻¹	3,6	3,7	3,8	4,1	3,7	3,6	3,7	3,5	3,5
B	MG X KG ⁻¹	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3

**CAPÍTULO 4 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO
MORFOLÓGICO DE TRES CULTIVARES DE
TRIFOLIUM REPENS L. CON DISTINTO TAMAÑO DE
HOJA, FORMANDO UNA PRADERA MIXTA CON
LOLIUM PERENNE L. EN CHILLÁN, REGIÓN DE
ÑUBLE**

EVALUATION OF THE MORPHOLOGICAL BEHAVIOR OF THREE
CULTIVARS OF TRIFOLIUM REPENS L. FORMING A MIXED MEADOW
WITH LOLIUM PERENNE L. IN CHILLÁN, ÑUBLE REGION.

Palabras índices adicionales: estolón, área foliar, peciolo.

4.1 Resumen

El estudio se llevó a cabo en la Estación Experimental Marcelo Tima Péndola, perteneciente a la Facultad de Agronomía de la Universidad de Concepción, ubicada 25 km al nororiente de Chillán, entre noviembre de 2013 y abril de 2014. El objetivo fue evaluar el crecimiento y comportamiento morfológico de 3 cultivares de trébol blanco (*Trifolium repens*) (Huia, Bounty, Kopu II), asociados a una mezcla de ballica perenne (*Lolium perenne*) (Nutrapack Juvenil II). Se establecieron 12 parcelas de 12 m² cada una, dispuestas en bloques completos al azar, con tres tratamientos y cuatro repeticiones. Las evaluaciones realizadas fueron: área foliar (cm² x hoja⁻¹), largo de peciolo (cm), peso seco de la hoja (mg MS x hoja⁻¹), contenido de materia seca (%) y frecuencia de aparición de

estolones. Se observaron diferencias significativas para el cultivar Kopu II respecto de los otros, en las evaluaciones de área foliar, largo de peciolo y peso seco de la hoja.

4.2 Summary

The study was carried out at the Marcelo Tima Péndola Experimental Station, belonging to the Faculty of Agronomy of the University of Concepción, located 25 km north-east of Chillán, between November 2013 and April 2014. The objective was to evaluate the morphological behavior of 3 white clover cultivars (*Trifolium repens*) (Huia, Bounty, Kopu II), associated with a mixture of perennial ryegrass (*Lolium perenne*) (Juvenile Nutrapack II). 12 plots of 12 m² each were established, arranged at random in complete blocks, with three treatments and four repetitions. The evaluations were: leaf area (cm² x leaf⁻¹), petiole length (cm), dry weight of the leaf (mg MS x leaf⁻¹), dry matter content (%) and frequency of stolon appearance. Significant differences were observed for evaluations of leaf area, petiole length and dry leaf weight, where Kopu II had a larger leaf size compared to the other crops.

4.3 Introducción

La pradera es una comunidad de plantas herbáceas compuesta por gramíneas, leguminosas y otras especies, en la que existen múltiples relaciones entre ellas y el ambiente. Los factores ambientales cambian constantemente, haciendo que la pradera sea altamente dinámica, lo que se refleja en su producción de forraje, calidad nutricional y composición botánica a lo largo del año (López y Valentine, 2003). La finalidad de la pradera es ser un alimento para rumiantes y otros herbívoros, cuya cubierta de hojas se renueva en forma permanente (Parga, 2003).

En Chile, la superficie de praderas es de 12.760.520 ha, de las cuales 10.799.165 ha son praderas naturales, 1.055.354 ha corresponden a praderas mejoradas, 510.371 ha de praderas anuales y 395.630 ha a praderas de rotación y permanente. La Región de Ñuble¹ posee 347.819 ha de praderas, de las cuales 271.101 ha son praderas naturales, 26.200 ha pertenecen a praderas mejoradas, 30.242 ha de praderas anuales y 20.276 ha praderas de rotación y permanente (Rojas, 2009).

¹ Datos correspondientes a la Provincia de Ñuble, que pasó a ser Región de Ñuble el año 2017.

En diferentes zonas agroecológicas del país se utilizan las praderas como base esencial de un sistema productivo (Rivas, 2005), siendo en algunos casos, el recurso pratense la única fuente de alimento para el ganado (Ruíz, 1996). Aedo (1996) indica que la alimentación del ganado basada principalmente en forrajes usa especies pertenecientes a dos familias: gramíneas y leguminosas. Entre las leguminosas forrajeras, se puede mencionar el trébol rosado (*Trifolium pratense* L.), alfalfa (*Medicago sativa* L.) y trébol blanco (*Trifolium repens* L.), siendo este último el más usado en condiciones de pastoreo en praderas permanentes en la Zona Sur de Chile (Balocchi *et al.*, 2007). Las gramíneas forrajeras comúnmente usadas son ballica (perenne, bianual o de rotación corta y anual), pasto ovillo (*Dactylis glomerata* L.) y festuca (*Festuca arundinacea* L.), siendo ballica perenne (*Lolium perenne* L.) la especie más relevante en sistemas pastoriles de la zona templada de Chile (Demanet, 2013).

La mezcla forrajera más usada para pastoreo en Chile, es la asociación ballica perenne y trébol blanco (Balocchi *et al.*, 2007). Mientras la ballica aporta volumen de forraje a la mezcla, el trébol aporta nitrógeno producto de la fijación simbiótica, reduciendo así la dependencia de fertilizantes nitrogenados y contribuyendo al aumento del valor nutritivo del forraje (Romero, 2005), ambas especies son apropiadas para el pastoreo, ya que sus puntos de crecimiento se ubican a nivel del suelo, permaneciendo así bajo la altura de utilización, impidiendo que sean removidos o dañados (Balocchi *et al.*, 2007).

Ballica perenne (*Lolium perenne* L.), es una gramínea de persistencia superior a 5 años (Aguila, 2004), valorada por su potencial de rendimiento, alta palatabilidad y digestibilidad (Jung *et al.*, 1996). Su estructura básica es el macollo, cada planta está formada por un conjunto de macollos, y a la vez cada macollo está constituido por hojas, tallos y raíces, teniendo la capacidad de producir nuevos macollos a partir de las yemas ubicadas en la axila de la hoja (Balocchi *et al.*, 2007). En Chile se adapta a zonas de clima templado o frío con buena distribución de lluvias. Estas condiciones permiten expresar su máximo potencial en rendimiento y persistencia (López, 1996).

Trébol blanco (*Trifolium repens* L.), es una leguminosa perenne de crecimiento rastrero y de alta persistencia en praderas sometidas a pastoreo (Demanet, 2013). Su reproducción es a través de semillas y estolones (López, 1996), pero sólo a través de la supervivencia del estolón se logra el máximo potencial de crecimiento del trébol blanco, ya que el crecimiento de la plántula es lento y variable (Archer y Robinson, 1989). La persistencia y productividad de trébol blanco están limitadas por una serie de factores, estos incluyen

climas fríos, estrés hídrico, suelos con baja fertilidad, pH, drenaje, entre otros (Aires y Reed, 1993). La interacción entre el genotipo y el ambiente del trébol blanco, las condiciones climáticas y el entorno físico, determinan si el trébol puede establecerse y persistir en un área determinada (Australian Government, 2004).

Los atributos de las variedades, como el hábito de crecimiento y tamaño en trébol blanco, son importantes en la competencia con otras especies (Romero, 2005). Es así como se clasifican respecto al tamaño de sus hojas y específicamente de folíolos en tres tipos (Demanet, 2013):

- Variedad de hojas pequeñas. Presenta un diámetro promedio de folíolo de 11,3 mm (Caradus *et al.*, 1989), de pecíolos pequeños y estolones muy ramificados (3000 m²) (Romero, 2005), se adapta a pastoreos intensos y frecuentes, característica que la convierte en apta para ovinos y camélidos (Demanet, 2013); sin embargo, su productividad es baja, por lo que es poco usado comercialmente (Ruíz, 1996).
- Variedad de hojas intermedias. Se caracteriza por poseer un diámetro promedio de folíolo de 20,3 mm (Caradus *et al.*, 1989), presentando pecíolos largos y estolones cortos y menos ramificados (2000 m²) (Romero, 2005), se adapta a pastoreos largos y frecuentes, ideal para pastoreo en bovinos de carne y leche, con baja tolerancia al déficit hídrico (Demanet, 2013).
- Variedad de hojas grandes. Posee un diámetro de folíolo mayor a 23,2 mm (Caradus *et al.*, 1989) y muestra pecíolos y pedúnculos largos, hojas erectas y menor número de estolones (1000 m²) (Romero, 2005), no resiste periodos secos (Demanet, 2013), sin embargo, se adapta al corte y pastoreo con rezagos relativamente largos (Romero, 2005) con mayor adaptación a sistemas de producción de bovinos de leche (Demanet, 2013).

Los cultivares de trébol blanco que se comercializan en Chile poseen distinta respuesta a las condiciones de fertilidad de suelo y al manejo de pastoreo, es así como cultivares de hoja pequeña son más persistentes y toleran defoliación frecuente y severa, y los de hoja grande producen mayor rendimiento y mayor aporte a la composición botánica de la pradera (Demanet, 2013). Es esta la razón por la que se busca romper la relación negativa entre el tamaño de hoja y capacidad estolonífera, combinando un tamaño de hoja grande con una alta densidad de estolones (Woodfield *et al.*, 2001).

La hipótesis de investigación establece que los cultivares de trébol blanco con distinto tamaño de hoja tienen diferente comportamiento morfológico formando una pradera mixta con ballica perenne, en el valle central regado, de la Región de Ñuble, dado por su distinta composición genética.

El objetivo es evaluar el crecimiento y comportamiento morfológico, para tres cultivares de trébol blanco en mezcla con ballica perenne, en condiciones de corte simulando pastoreo.

4.4 Materiales y método

El estudio se realizó en la Estación Experimental Pecuaria Marcelo Tima Péndola, perteneciente a la Facultad de Agronomía de la Universidad de Concepción, ubicada a 25 km al nororiente de Chillán, comuna de Chillán, Región de Ñuble, (36°33'17" S, 71°52'45" O).

El suelo pertenece a la Serie Chacayal y se caracteriza por tener abundante macroporosidad, con sustrato de gravas y piedras en una matriz franco-arenosa fina, con permeabilidad rápida y escurrimiento superficial lento (Santis, 2005). El clima corresponde a templado mediterráneo, presentando veranos cálidos y secos e inviernos húmedos y fríos. La temperatura promedio anual de 14 °C y su pluviometría es de 1025 mm anuales (Rojas, 2014) (Anexo 4.1).

4.4.1 Cultivares utilizados

4.4.1.1 Trébol blanco

- **Bounty.** De origen neozelandés, sus hojas son de tamaño intermedio, tiene alta densidad de estolones y buena producción de materia seca. Se recomienda su uso en sistemas de pastoreo rotativo, tanto en producción de bovinos u ovinos. Se establece desde la Región Metropolitana a la Región de Los Lagos (ANASAC, 2017).
- **Huia.** Seleccionado por la Grasslands Division del DSIR (Ag Research) de origen Neozelandés. Tiene un hábito de crecimiento rastrero, su hoja es de tamaño intermedio y tiene alta densidad de estolones, esto le permite que, al estar asociado a una gramínea perenne, soporta pastoreos frecuentes e intensos a lo largo de todo el año. En Chile, es el cultivar más usado en praderas permanentes regadas (Demanet, 2013).

- Kopu II. Desarrollado por PGG-Wringston Seeds, con material de origen norteamericano, Europeo y neozelandés. Este cultivar se desarrolló a partir de la selección de veinticuatro genotipos y dos poblaciones experimentales basados en altos rendimientos de trébol, alta densidad de estolones, hojas de tamaño grande y alta persistencia (Woodfield *et al.*, 2001). En Chile su distribución va desde la Región Metropolitana a la Región de Los Lagos (ANASAC, 201?).
- Nutrapack juvenil II. Mezcla física de dos ballicas tetraploides, Pastoral, de floración tardía (Francia) y Banquet II de floración intermedia (Nueva Zelanda). Ambas variedades se complementan no sólo porque no espigan en inicio de primavera, sino porque mantienen altas tasas de crecimiento durante toda la estación. Su utilización es en sistemas intensivos de pastoreo, sola o en asociación con trébol blanco (ANASAC, 201?).

4.4.2 Antecedentes de la pradera

En este estudio se utilizó una pradera ya establecida. Previo al establecimiento de la pradera se realizó un test de germinación, donde posteriormente las semillas de trébol fueron desinfectadas e inoculadas con RizoFix LV® (Biogram). Previo a la siembra se aplicó glifosato (Rango®), se hicieron rastros sucesivos en el suelo, y las piedras se retiraron manualmente para así preparar la cama de semillas para la posterior siembra.

4.4.3 Siembra y diseño experimental

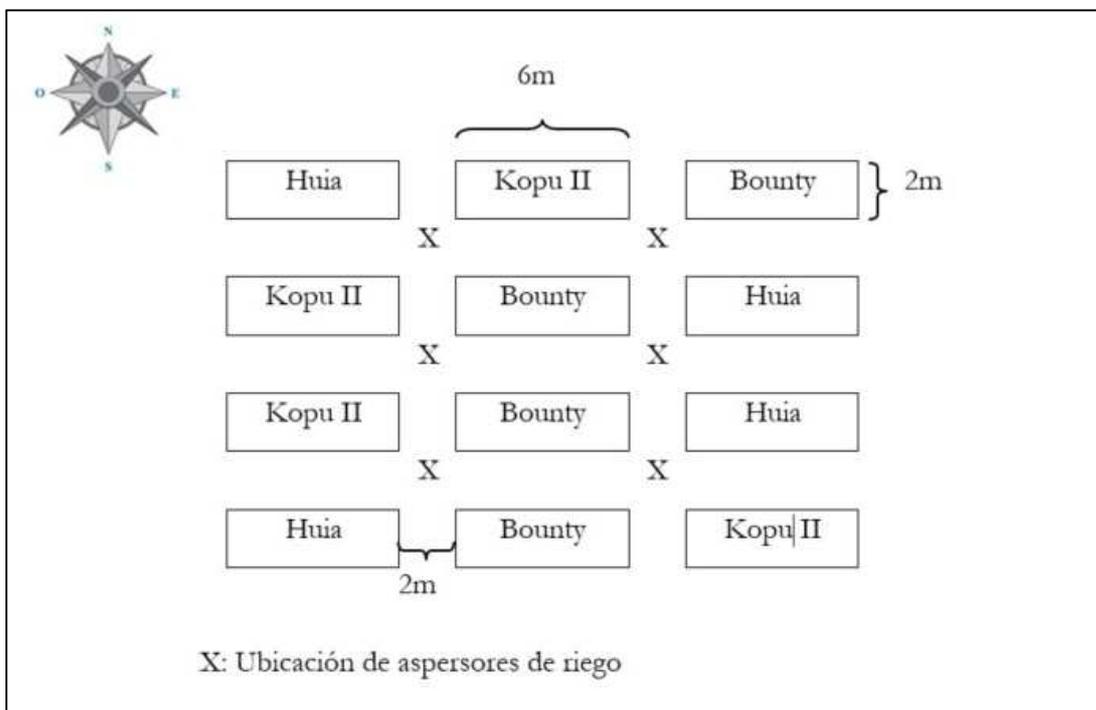
La siembra se llevó a cabo el 2 de octubre de 2013. Esta se realizó a chorro continuo, a una profundidad de 2 cm, con distanciamiento de 20 cm entre hilera (Anexo 4.2). El estudio se emplazó en parcelas de 2 x 6 m (Figura 4.1), con un diseño de bloques completos al azar, con 3 tratamientos y 4 repeticiones cada uno. Los tratamientos son: T1: Nutrapack Juvenil II + Bounty; T2: Nutrapack Juvenil II + Kopu II; T3: Nutrapack juvenil II + Huia.

4.4.4 Fertilización del Suelo

Previo a la siembra, se tomó una muestra compuesta de suelo a 20 cm de profundidad, la que se analizó en el Laboratorio de Suelos y Plantas de la Universidad de Concepción. Con la información del análisis de suelo se calculó la dosis de fertilizante a usar. Al momento de la siembra se fertilizó con 78 unidades de nitrógeno en forma de Amintec® (SQM) y 1000 Kg x ha⁻¹ de mezcla 0:31:15. En Diciembre se aplicó otra dosis de 75

unidades de nitrógeno (Amintec®). Se fertilizó a fin de que la pradera se desarrollase en un ambiente donde este factor no fuese una limitante.

Figura 4.1. Distribución de los tratamientos y dimensión de parcelas.



4.4.5 Riego

La pradera se regó cada dos días, con un tiempo de riego de una hora. Se utilizaron ocho aspersores, modelo VYR-36, con una descarga potencial de $1.800 \text{ L} \times \text{h}^{-1}$, distribuidos de a dos por bloque. La unidad de bombeo utilizada fue de dos bombas Pedrollo® modelo CPM - 158 de 1 HP, con un caudal de hasta $160 \text{ L} \times \text{min}^{-1}$.

4.4.6 Control de malezas

Nueve días después de la siembra, antes de la emergencia de la pradera, se aplicó Paraquat (Gramoxone®), en una dosis equivalente a $3 \text{ L} \times \text{ha}^{-1}$ diluido en 100 L de agua. En noviembre de 2013, se aplicó Flumetsulam (Preside®) en una dosis de $60 \text{ g} \times \text{ha}^{-1}$, diluido en 200 L de agua.

4.4.7 Evaluaciones

Se realizaron durante el periodo enero – abril 2014. Este estudio se manejó en condiciones de corte simulando un pastoreo, el criterio de uso de la pradera fue de 18 cm de altura no disturbada al momento del uso, con un residuo de 5 cm. Las evaluaciones se realizaron previo al corte de la pradera.

- Área foliar ($\text{cm}^2 \times \text{hoja}^{-1}$). Se cortaron 10 hojas al azar por tratamiento y repetición, luego se llevaron al Laboratorio de Forrajes del INIA Quilamapu donde se separó cada foliolo del peciolo, y se midió el área foliar con el equipo Área Meter, MK2. Esto se realizó el 22 enero y 3 de marzo de 2014.
- Largo de peciolo (cm). Se cortaron 10 hojas al azar por tratamiento y repetición. Se separó cada peciolo y se midió la longitud sobre una superficie plana, con una regla graduada en centímetros, desde la inserción de los foliolos hasta la inserción de las estípulas, esta medición se hizo el 22 enero y 3 de marzo de 2014.
- Peso seco de la hoja ($\text{mg MS} \times \text{hoja}^{-1}$). Se utilizaron 10 hojas al azar por tratamiento y repetición, cada una se puso dentro de una bolsa de papel, se rotuló y secó de forma individual en un horno de aire forzado a $65\text{ }^\circ\text{C}$ (Marca Kotterman), hasta que las muestras tuvieron un peso constante. Las evaluaciones se realizaron el 22 enero y 3 de marzo de 2014.
- Contenido de materia seca de hojas (% MS). Se utilizaron 10 hojas al azar por tratamiento y repetición, se registró su peso al momento del corte y luego posterior al secado, al tener los valores de peso verde y peso seco, se calculó el porcentaje de materia seca según la siguiente fórmula:

$$\text{MS}(\%) = 100 \times \left(\frac{\text{peso seco (g)}}{\text{peso verde (g)}} \right)$$

- Presencia de estolones. Se marcaron dos plantas por tratamiento y repetición, se observó la presencia estolón primario, secundario o terciario, y se registró en una planilla, como estolón “presente” o “ausente”. Esta evaluación se realizó cada 10 días durante el período de evaluación, enero a abril de 2014.

4.4.8 Análisis estadístico

Los resultados se analizaron con el programa estadístico Infostat®. Las variables estudiadas se sometieron a un análisis de varianza con un 95% de confianza (ANDEVA), para verificar los supuestos de la varianza se usó el test de Shapiro Wilk modificado y Levene, para la variable largo de peciolo, que cumplió con los supuestos de ANDEVA se utilizó LSD de Fisher con un 95% de confianza, para las variables que originalmente no cumplieron con los supuestos de ANDEVA, área foliar, peso seco de la hoja y contenido de materia seca, se ajustaron mediante la transformación Ln (Steel y Torrie, 1988).

Para la evaluación de presencia de estolones se aplicó estadística descriptiva, utilizando el software Excel 2016 ®.

4.5 Resultados y discusión

4.5.1 Área foliar

En la Tabla 4.1 se observan los resultados para el área foliar de trébol blanco, existen diferencias significativas ($P \leq 0,05$) entre tratamientos para las evaluaciones de enero y marzo, donde el cultivar Kopu II presentó el mayor valor de área foliar, en ambas fechas de evaluación.

Salazar (2017), obtuvo valores de área foliar para Kopu II 5,7 cm² y Huia 4,5 cm², en la temporada de otoño, esto representativo de la misma zona de evaluación, en el Valle Central Regado de la Región de Ñuble; por otra parte Ford *et al.* (2015), en base a una comparación proporcional de áreas foliares en una pradera bajo pastoreo rotativo, obtuvieron que el cultivar Kopu II presentó un 27% más de área foliar respecto Huia, coincidiendo con lo obtenido en este estudio.

Tabla 4.1. Área foliar de *Trifolium repens* L. (cm² x hoja⁻¹).

FECHA	ÁREA FOLIAR (CM ² X HOJA ⁻¹)						C.V.
	KOPU II		BOUNTY		HUIA		
22/01/2014	7,28	B	5,10	A	5,25	A	24,24*
10/03/2014	5,03	B	3,83	A	4,68	A	35,61

Valores con letras distintas en sentido horizontal son significativamente diferentes, según prueba LSD Fisher ($P \leq 0,05$). C.V: Coeficiente de variación. *El análisis de varianza se realizó bajo transformación de Ln.

En enero hubo valores más altos que los registrados por Woodfield *et al.* (2001), donde obtuvieron valores de áreas foliares para Kopu II 5,60 cm² y Huia 2,71 cm², esto pudo ocurrir, debido a que el tamaño y número de hojas es controlado por la luz y la temperatura (Brock *et al.*, 1996); en este estudio la temperatura promedio registrada entre diciembre y enero alcanzó los 31,25 °C. Beinhart (1963) indica que la producción máxima de hojas ocurre entre los 17 °C y 23 °C, y que el aumento de la temperatura no inhibe los meristemas primarios, por el contrario, la producción de hojas primarias a 35 °C fue 1,2 veces mayor que a 10 °C, Woodfield *et al.* (2001) destaca que Kopu II presenta mayor tamaño de hojas respecto a otros cultivares de hoja grande; siendo los resultados similares a lo obtenido en este estudio.

4.5.2 Largo de pecíolo

La Tabla 4.2 presenta los valores para largo de pecíolo, donde se observan diferencias significativas ($P \leq 0,05$) en la fecha de enero y marzo.

Ortega *et al.* (1994), colectaron tréboles blancos nativos entre las regiones de la Araucanía y los Lagos, donde obtuvieron un promedio de largo de pecíolo de 8,72 cm; por otro lado Woodfield *et al.* (2001), obtuvieron un largo de pecíolo de 8,36 cm para Huia y 10,5 cm para Kopu II.

Tabla 4.2. Largo de pecíolo de *Trifolium repens* (cm).

FECHA	KOPU II	LARGO PECIOLO (CM)					C.V.
		B	BOUNTY	A	HUIA	A	
22/01/2014	18,98	B	15,65	A	16,43	A	29,87
10/03/2014	13,13	B	11,75	A	12,61	AB	21,84

Valores con letras distintas en sentido horizontal son significativamente diferentes, según prueba LSD Fisher ($P \leq 0,05$). C.V: Coeficiente de variación. *El análisis de varianza se realizó bajo transformación de Ln.

La longitud del pecíolo encontrada en este trabajo (Tabla 4.2) es mayor a la registrada por otros autores, esto pudo ocurrir como resultado de la temperatura registrada durante el periodo de evaluación, donde en enero fue de 31,25 °C y 28,9 °C para marzo, favoreciendo el crecimiento del trébol, a diferencia de la ballica que crece sin limitaciones entre los 18 °C y 20 °C, reduce su crecimiento sobre los 25 °C y es prácticamente nulo a los 35 °C (Muslera y Ratera, 1991). Los resultados obtenidos coinciden con lo planteado por Nolan *et al.* (2001), donde indican que la extensión de pecíolo es muy sensible a los cambios de temperatura, y es máxima en la época de primavera – verano (Castro *et al.*, 2013).

En el caso de praderas mixtas, donde el trébol blanco está creciendo en mezcla con ballica, ésta puede ejercer sombra sobre el trébol, la que puede favorecer el crecimiento del pecíolo y su elongación (Thompson, 1995), pudiendo aumentar la longitud del pecíolo hasta en un 76% y el tamaño de la hoja sobre un 17% (el ancho de foliolo) (Caradus y Chapman, 1991).

4.5.3 Peso seco de la hoja

La Tabla 4.3 muestra que, para el contenido de peso seco de la hoja, hubo diferencias

significativas ($P \leq 0,05$) entre tratamientos, para ambas fechas.

Tabla 4.3. Peso seco de la hoja *Trifolium repens* (g MS x hoja⁻¹).

FECHA	PESO SECO (G MS X HOJA ⁻¹)						C.V.
	KOPU II	BOUNTY		HUIA			
22/01/2014	0,06	B	0,04	A	0,04	A	13,65*
10/03/2014	0,04	B	0,03	A	0,03	A	11,05*

Valores con letras distintas en sentido horizontal son significativamente diferentes, según prueba LSD Fisher ($P \leq 0,05$). C.V: Coeficiente de variación. *El análisis de varianza se realizó bajo transformación de Ln.

Las diferencias existentes para la evaluación de peso seco, podría atribuirse a que el cultivar Kopu II corresponde a un trébol de tamaño de hoja grande, respecto Bounty y Huia que son de tamaño intermedio.

Kopu II presentó diferencias significativas tanto en peso seco de la hoja como en área foliar, respecto a los otro cultivares, esto puede indicar una relación existente entre ambos parámetros, donde a mayor área foliar, también hay mayor peso seco de la hoja, por lo que es posible inferir que también hay mayor tamaño de la planta, de esta forma, se asemeja a lo que indica Beinhart (1963), quien menciona la correlación existente entre el área de la hoja y el peso seco de la planta, donde afirma que al aumentar el tamaño de la hoja también aumentará el peso de la planta.

4.5.4 Contenido de materia seca de la hoja

En la Tabla 4.4, se muestran los valores de contenido de materia seca de la hoja, donde se observa que no hay diferencias significativas ($P > 0,05$) entre los tratamientos, para ambas fechas donde se evaluó.

Tabla 4.4. Materia seca de hojas de *Trifolium repens* L., por fecha y tratamiento (%).

FECHA	MATERIA SECA (%)						C.V.
	KOPU II	BOUNTY		HUIA			
22/01/2014	21,21	A	22,90	A	21,88	A	20,61*
10/03/2014	20,30	A	20,44	A	20,35	A	16,3

Valores con letras distintas en sentido horizontal son significativamente diferentes, según prueba LSD Fisher ($P \leq 0,05$). C.V: Coeficiente de variación. *El análisis de varianza se realizó bajo transformación de Ln.

La morfología del trébol blanco juega un rol relevante en el contenido de materia seca, es

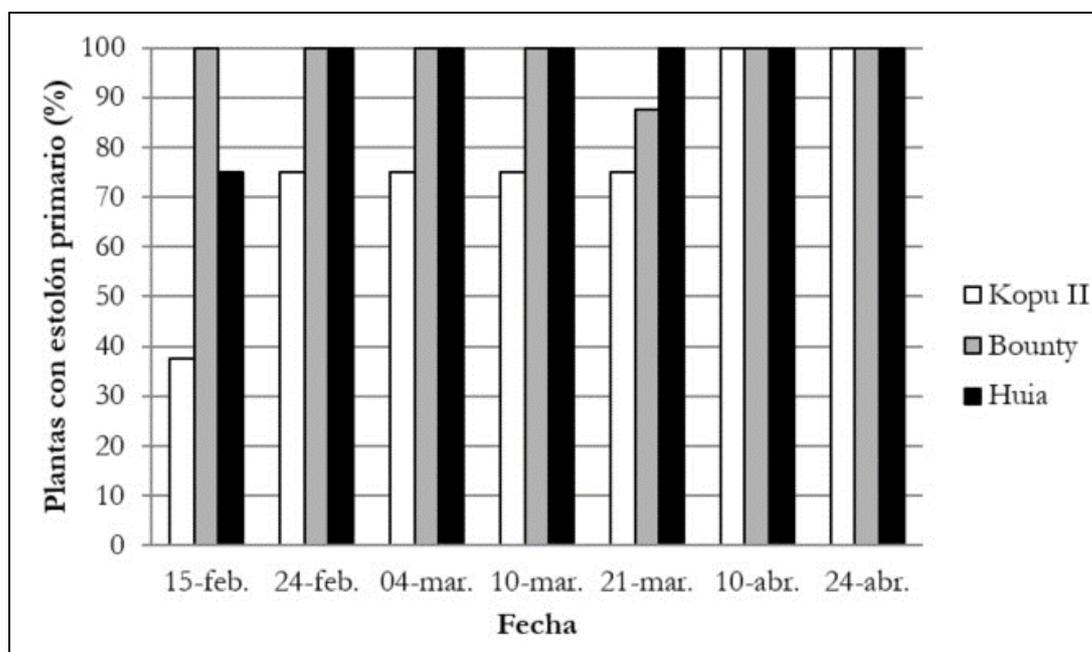
así como variedades de hojas grandes y menor cantidad de estolones tienen mayor producción bajo regímenes de pastoreo liviano, principalmente porque poseen hojas con una gran área foliar y largos peciolo (Rhodes, 1981), por el contrario variedades de hoja pequeña, tienen un mayor número de estolones y producen mayor cantidad de pequeñas hojas con peciolo cortos, en este caso la mayor producción de materia seca se logra con pastoreo más intensivo (Demanet, 2013).

Beinhart (1963), afirma que la acumulación de materia seca es proporcional al área de la hoja en un rango de temperatura de 18 °C a 35 °C, sin embargo, en este estudio, a mayor tamaño de hoja no hubo diferencias significativas en la proporción de materia seca, se puede inferir que la hoja pudo presentar un mayor contenido de humedad.

4.5.5 Frecuencia de aparición de estolones

La Figura 4.2, Figura 4.3 y Figura 4.4, muestran el registro de aparición de estolones primarios, secundarios y terciarios, respectivamente, expresados como una proporción del total de plantas evaluadas. La Figura 4.2 muestra la aparición de estolones primarios, donde el cultivar Bounty fue el primero en presentar todas sus plantas con estolones primarios.

Figura 4.2. Presencia de plantas con estolón primario en los diferentes cultivares.

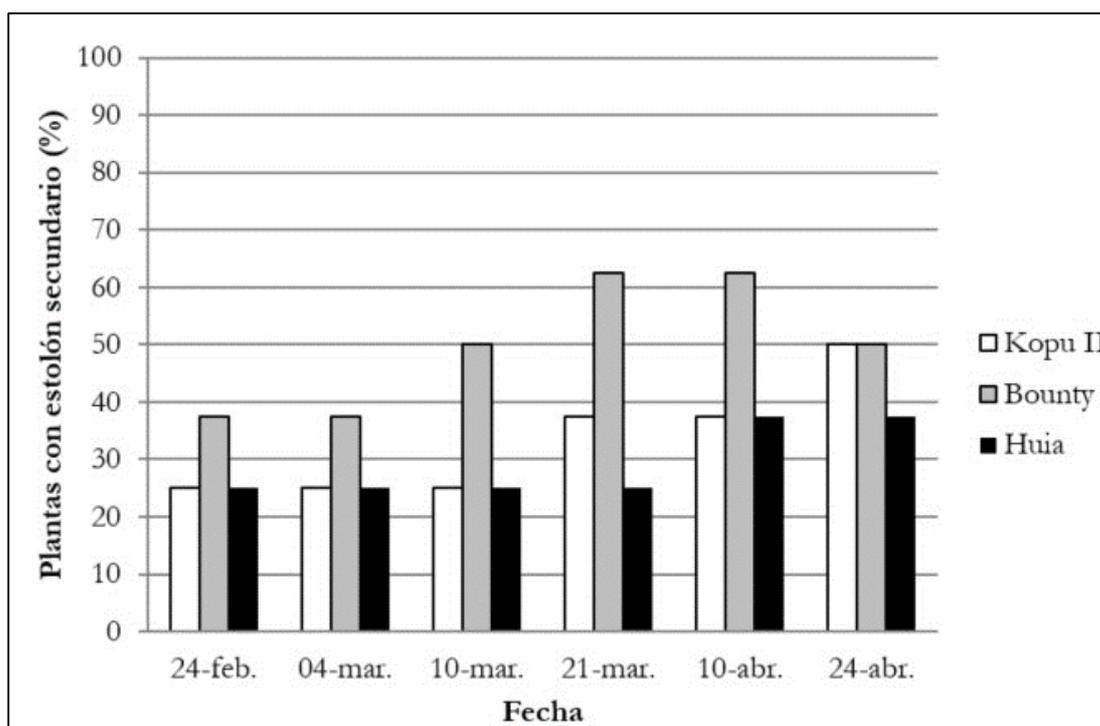


El alargamiento del estolón aumenta en la medida que la temperatura ambiental es mayor, sin embargo, la ramificación crece a medida que la temperatura disminuye (Brock et al.,

1988). En este estudio, Bounty alcanzó el 100% de ramificaciones primarias, antes que los otros cultivares, ajustándose a lo que indica ANASAC (201?), donde lo describe como un cultivar de alta densidad de estolones.

En la Figura 4.3 se registró la aparición de estolones secundarios, donde los cultivares Kopu II y Bounty fueron los que presentaron mayor presencia de estolones secundarios en la pradera para la última fecha de medición de este estudio.

Figura 4.3. Presencia de plantas con estolón secundario en los diferentes cultivares.



Woodfield *et al.* (2003), comparan porcentualmente la densidad de estolones, donde Kopu II es un 7% más estolonífero que Huia en verano, un 22% en otoño y un 50% en invierno, en otro estudio Woodfield *et al.* (2001), después de 3 años de pastoreo, obtuvieron que Kopu II tuvo un 56% más de densidad de estolones respecto a otros cultivares de hoja grande y un 19% más de densidad que Huia; ajustándose con lo obtenido en esta investigación, donde Kopu II tuvo mayor desarrollo frecuencia de estolones que Huia.

En la última fecha de medición, se redujo el número de estolones secundarios para el cultivar Bounty en relación al registro anterior, esto no tiene una explicación biológica, pero pudo ocurrir porque el estolón murió o existió algún daño a la pradera al momento del uso.

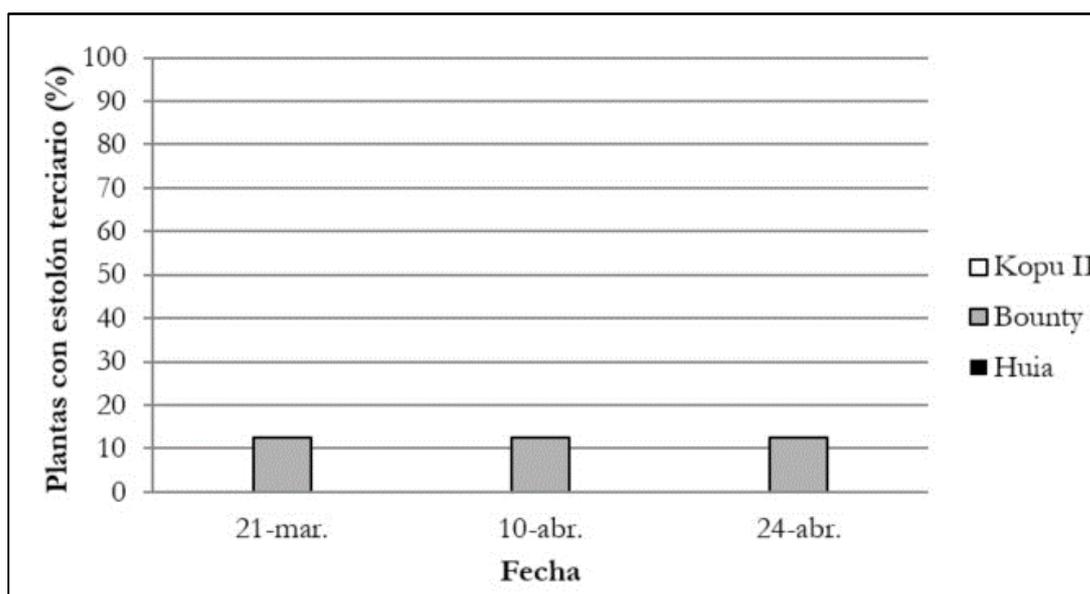
En cuanto a la influencia de la temperatura, Beinhart (1963) menciona que la activación

de meristemas secundarios fue inhibido por la alta temperatura, de esta forma afirmó una relación inversa casi lineal entre la temperatura y ramificación de estas plantas, donde a 10 °C hubo una ramificación del 71% de nudos primarios y al aumentar a 30 °C el valor disminuyó a 14%; en este estudio la temperatura promedio para febrero fue de 28,8 °C, marzo 27,4 °C y abril 20,4 °C, esto similar a lo indicado por Beinhart (1963), quién señala que a menor temperatura, mayor es la ramificación de estolones. Algunos estudios han demostrado que al aumentar la temperatura sobre 25 °C disminuye la producción de nuevos estolones, esto podría explicar la baja participación de estolones secundarios y terciarios encontrada en este estudio para todos los cultivares, asimismo en condiciones de alta densidad de plantas ocurre una competencia interespecífica, lo que limita la formación de nuevas ramas laterales o estolones.

En la Figura 4.4 se observa que Bounty fue el único cultivar que desarrolló estolón terciario el periodo de evaluación, esto es similar a lo reportado en un estudio de densidad de estolones, donde en comparación porcentual, Bounty fue un 25% más estolonífero que Huia, y a su vez Huia fue un 13% más estolonífero que Kopu II (ANASAC, 201?).

Al final del primer año de evaluación no se evidencian diferencias en el desarrollo de estolones de las variedades evaluadas, lo que podría estar indicando que se ha resuelto el problema de menor capacidad estolonífera de los tréboles blanco de hoja grande, a través del trabajo en mejoramiento genético realizado en ellos.

Figura 4.4. Presencia de plantas con estolón terciario en los diferentes cultivares.



4.6 Conclusiones

Una manera de enfrentar la problemática de baja participación de trébol blanco en la pradera mixta, es la incorporación en ella de cultivares que posean una mejor capacidad estolonífera, pero éstos presentan la desventaja de tener una menor capacidad para competir con la gramínea y una menor producción de forraje, por tener hojas de menor tamaño. Es en ese contexto que se ha trabajado en el mejoramiento genético del germoplasma disponible, tratando de romper la relación negativa que existe entre tamaño de hoja y capacidad estolonífera. En este estudio se evaluó la morfología de variedades de trébol blanco con distinto tamaño de hoja, y se pudo constatar de variedades de hoja grande, como Kopu II, presentan mayor área foliar y peso de la hoja, que los tréboles de hoja mediana, no encontrando diferencias en la capacidad estolonífera, al menos durante el primer año de crecimiento.

La evidencia encontrada sugiere que existen avances en el mejoramiento genético en tréboles blancos de hoja grande, haciéndolos más competitivos creciendo en mezcla con gramíneas al formar praderas mixtas, lo que permitiría mejorar la productividad de la pradera mixta y facilitar su manejo.

4.7 Referencias

- Aedo, N. 1996. Morfología de una gramínea y leguminosa típica. pp: 28–38. En: I. Ruíz (Ed.). *Praderas para Chile*. (2a. ed.). INIA. Santiago, Chile.
- Aguila, H. 2004. *Pastos y empastadas*. (9a. ed.). Impreso La Discusión. Chillán, Chile.
- ANASAC (Chile). 2017. Catálogo de forrajeras: las forrajeras que todos prefieren [en línea]. *Agrícola Nacional S.A.C., Chile*. <http://www.anasac.cl/agropecuario/wp-content/uploads/Cat--logo-Forrajeras_.pdf>. [Consulta: 10 marzo 2017].
- Archer, K.A. and G.G. Robinson. 1989. The role of stolons and seedlings in the persistence and production of white clover (*Trifolium repens* L. cv. Huia) in temperate pastures on the Northern Tablelands, New South Wales. *Aust. J. Agric. Res.* 40(3): 605–616.
- Australian Government. 2004. The biology and ecology of white clover (*Trifolium repens* L.) in Australia [en línea]. *Office of the Gene Technology Regulator, Australia*. <[http://www.ogtr.gov.au/internet/ogtr/publishing.nsf/content/clover-3/\\$FILE/biologywclover2.pdf](http://www.ogtr.gov.au/internet/ogtr/publishing.nsf/content/clover-3/$FILE/biologywclover2.pdf)>. [Consulta: 19 mayo 2016].

- Ayres, J.F. and K.F.M Reed. 1993. White clover improvement. pp: 113-119. In: W. Mason (Ed.). White clover: a key increasing milk yields. *Dairy Research and Development Corporation*. Melbourne, Australia.
- Balocchi, O., N. Teuber, J. Parga, R. Demanet, V. Anwandter, J. Lopetegui, C. Canseco y A. Abarzúa. 2007. Crecimiento de las plantas forrajeras y su adaptación al pastoreo. pp: 9-22. En: N. Teuber, O. Balocchi y J. Parga (Eds.). *Manejo del pastoreo*. Imprenta América. Osorno, Chile.
- Beinhart, G. 1963. Effects of environment on meristematic development, leaf area and growth of white clover. *Crop Sci.* 3(3): 209-213.
- Brock, J.L., M.J.M. Hay, V.J. Thomas and J.R. Sedcole. 1988. Morphology of white clover (*Trifolium repens* L.) plants in pastures under intensive sheep grazing. *J. Agric. Sci.* 111(2): 273-283.
- Brock, J.L. and M.J.M. Hay. 1996. A review of the role of grazing management on the growth and performance of white clover cultivars in lowland New Zealand pastures. *N. Z. Grass. Assoc.* 11(6): 65-70.
- Caradus, J.R. A.C. MacKay, D.R. Woodfield, J. Van den Bosch and S. Wewala. 1989. Classification of a world collection of white clover cultivars. *Euphytica* 42(1-2): 183-196.
- Caradus, J.R. and D.F Chapman. 1991. Variability of stolon characteristics and response to shading in two cultivars of white clover (*Trifolium repens* L.). *N. Z. J. Agric. Res.* 34(3): 239-247.
- Castro, R., A. Hernández, O. Reynoso, G. Aguilar, J.F. Enríquez y S.I. Mendoza. 2013. Crecimiento en longitud foliar y dinámica de población de tallos de cinco asociaciones de gramíneas y leguminosa bajo pastoreo. *Rev. Mex. Cienc. Pec.* 4(2): 201-215.
- Demanet, R. 2013. Pastizales en el sur de Chile. Universidad de La Frontera. Temuco, Chile.
- Ford, J.L., G.R. Cousins, Z. Jahufer, I.J. Baird, D.R. Woodfield and B.A. Barrett. 2015. Grasslands Legacy – a new, large-leaved white clover cultivar with broad adaption. *J. N. Z. Grass.* 77: 211–218.
- Jung, G.A., A.J.P. Van Wijk, W.F. Hunt and C.E. Watson. 1996. Ryegrasses. pp: 605-642. In: L.E. Moser, D.R. Buxton and M.D. Casler (Eds.). Cool-season forage grasses. Society of Agronomy. Crops Science Society of America. Soil Science Society of America. Madison, USA.
- López, H. 1996. Especies forrajeras mejoradas. pp: 45-108. En: I. Ruíz (Ed.). *Praderas para Chile*. (2a. ed.). INIA. Santiago, Chile.
- López, I. e I. Valentine. 2003. Rol de la diversidad pratense y de los grupos funcionales de especies sobre la condición de la pradera y su estabilidad. *Agro Sur* 31(1): 60–76.
- Muslera, E. de y C. Ratera. 1991. *Praderas y forrajes: Producción y aprovechamiento*. Ediciones Mundi Prensa. Madrid, España.

- Nolan, T., J. Connolly and M. Wachendorf. 2001. Mixed grazing and climatic determinants of white clover (*Trifolium repens* L.) content in a permanent pasture. *Ann. Bot.* 88 (Special Issue): 713-724.
- Ortega, F., R. Demanet, O. Paladines y M. Medel. 1994. Coleta y caracterización de poblaciones de trébol blanco (*Trifolium repens* L.) en la zona sur de Chile. *Agríc. Téc.* (Chile) 54(1): 30-38.
- Parga, J. 2003. Utilización de praderas y manejo de pastoreo con vacas lecheras. pp: 24-42. En: N.K. Teuber, H. Uribe y L. Opazo (Eds.). Seminario hagamos de la lechería un negocio mejor. *Serie Actas INIA* N°24. INIA Remehue. Osorno, Chile.
- Rhodes, J. 1981. The Physiological basis of variation in the yield of grass/clover mixtures. pp: 149-151. In: C. E. Wright (Ed.). Plant physiology and herbage production. Occasional Symposium N°13. *The British Grassland Society*. Maidenhead, UK.
- Rivas, C.A. 2005. Comportamiento productivo de pasturas polifíticas de *BromusStamineus*, *Festucaarundinacea* y *Dactylisglomerata* asociados a *Ornithopuscompressus*, *Trifoliumrepens*, *Trifoliumsubterraneum* y *Trifoliummichelianum* en el secano de la IX Región de La Araucanía. Proyecto de tesis, Ingeniero Agrónomo, *Universidad de La Frontera, Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales*. Temuco, Chile.
- Rojas, D. 2009. Medio ambiente: informe anual 2007. *Instituto Nacional de Estadísticas*. Santiago. Chile.
- Rojas, D. 2014. Medio ambiente: informe anual 2012. *Instituto Nacional de Estadísticas*. Santiago. Chile.
- Romero, O. 2005. Trébol blanco: clave en los sistemas pastoriles: pradera permanente en la zona sur. *Tierra Adentro* (64): 21-23.
- Ruíz, I. 1996. Introducción: un vistazo a la compleja relación clima-suelo-árbol, pasto, ganado. pp: 8-16. En: *Praderas para Chile*. (2a. ed.). INIA. Santiago, Chile.
- Salazar, S. 2017. Evaluación agronómica de cultivares de *Trifoliumrepens* asociado a *Lolium perenne*, bajo condiciones de corte en el valle central regado de Ñuble. Memoria de título, Ingeniero Agrónomo, *Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía*. Chillán, Chile.
- Santis, G.T. 2005. Mapa de reconocimiento de suelos de la Región de Bío-Bío (Sector norte). Memoria de título, Ingeniero Agrónomo mención Manejo de Suelos y Aguas. *Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Escuela de Agronomía*. Santiago, Chile.
- Steel, R.G.D. y J.H.Torrie. 1988. Bioestadística: principios y procedimientos. McGraw-Hill Interamericana. Naucalpan de Juárez, México.
- Thompson, L. 1995. Sites of photoperception in white clover. *Grass Forage Sci.* 50(3): 259-262.
- Woodfield, D.R., P.T.P. Clifford, I.J. Baird, G.R.Cousins, J.E. Miller, K.H. Widdup and J.R. Caradus. 2003. Grasslands Tribute: a multi-purpose white clover for Australasia. *Proc. N. Z. Grass. Assoc.* 65: 157-162.

Woodfield, D.R., P.T.P. Clifford, G.R. Cousins, J.L. Ford, I.J. Baird, J.E. Miller, S.L. Woodward and J.R. Caradus. 2001. Grasslands Kopu II and Crusader: New generation white clovers. *Proc. N. Z. Grass. Assoc.* 63: 103–108.

4.8 Anexos

Anexo 4.1. Precipitación promedio mensual (mm), Agromet INIA, Estación Santa Rosa. Chillán, Chile.

MES	PRECIPITACIÓN ACUMULADA (MM)
OCTUBRE 2013	35,7
NOVIEMBRE 2013	11,0
DICIEMBRE 2013	0,0
ENERO 2014	30,8
FEBRERO 2014	15,2
MARZO 2014	56,5
ABRIL 2014	41,7

Anexo 4.2. Germinación (%), semillas (N° x kg⁻¹), dosis de siembra ajustada (kg x ha⁻¹).

TRATAMIENTOS	GERMINACIÓN (%)	SEMILLAS (N° X KG ⁻¹)	DOSIS DE SIEMBRA AJUSTADA (KG X HA ⁻¹)
BOUNTY	95	859.599	4,0
HUIA**	97	1.579.779	2,1
KOPU II	99	789.681	4,0
NUTRAPACK JUVENIL II	95	323.764	27,0

** Huia sin peletizado.

Anexo 4.3. Temperatura del aire máxima diaria (°C), Agromet INIA, Estación Santa Rosa. Chillán, Chile.

FECHA	T°	FECHA	T°	FECHA	T°	FECHA	T°
01-10-2013	17,7	25-11-2013	27,3	20-01-2014	27,7	15-03-2014	27,4
05-10-2013	23,5	30-11-2013	30,0	25-01-2014	30,6	20-03-2014	28,6
10-10-2013	22,1	05-12-2013	28,1	30-01-2014	31,6	25-03-2014	32,8
15-10-2013	28,2	10-12-2013	30,7	05-02-2014	24,4	30-03-2014	19,6
20-10-2013	13,3	15-12-2013	33,3	10-02-2014	32,3	05-04-2014	22,3
25-10-2013	23,0	20-12-2013	32,2	15-02-2014	28,2	10-04-2014	18,7
30-10-2013	16,9	25-12-2013	30,1	20-02-2014	28,2	15-04-2014	22,3
05-11-2013	27,9	30-12-2013	27,8	25-02-2014	30,7	20-04-2014	23,1
10-11-2013	25,8	05-01-2014	33,1	01-03-2014	30,6	25-04-2014	20,8
15-11-2013	22,8	10-01-2014	29,7	05-03-2014	27,5	30-04-2014	15,5
20-11-2013	29,0	15-01-2014	36,1	10-03-2014	25,2		

T°: Temperatura (°C).

CAPÍTULO 5 GRASSLAND PHENOLOGY RESPONSE TO CLIMATE CONDITIONS IN BIOBIO, CHILE FROM 2001 TO 2020.

Marcelo-Alejandro Doussoulin-Guzmán¹, Fernando-Juan Pérez-Porras², Paula Triviño-Tarradas², Andrés-Felipe Ríos-Mesa³, Alfonso García-Ferrer Porras¹ and Francisco-Javier Mesas Carrascosa^{2,*}

¹ Department of Animal Production, Faculty of Agronomy, Universidad de Concepción, Chillán 3812120, Chile. mdoussou@udec.cl (M.-A.D.-G.)

² Department of Graphic Engineering and Geomatics, University of Cordoba, Campus de Rabanales, Crta. IV, km. 396, E-14071 Córdoba, Spain; o12pepof@uco.es (F.-J.P.-P.); ig2trtap@uco.es (P.T.-T.); agferrer@uco.es (A.G.-F.P.) fjmesas@uco.es (F.-J.M.-C.)

³ Agroindustrial Engineering Faculty, University Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia; andresf.rios@upb.edu.co (A.-F.R.-M.)

* Correspondence: fjmesas@uco.es

Remote Sensing, 2022, 14(3), 475. <https://doi.org/10.3390/rs14030475>.

Received: 13 December 2021 / Revised: 13 January 2022 / Accepted: 17 January 2022 /
Published: 20 January 2022.

Citation: Doussoulin-Guzmán, M.-A.; Pérez-Porras, F.-J.; Triviño-Tarradas, P.; Ríos-Mesa, A.-F.; García-Ferrer Porras, A.; Mesas-Carrascosa, F.-J. Grassland Phenology Response to Climate Conditions in Biobio, Chile from 2001 to 2020. Remote Sens. 2022, 14, 475. <https://doi.org/10.3390/rs14030475>.

5.1 Abstract

Plant phenology is affected by climate conditions and therefore provides a sensitive indicator to changes in climate. Studying the evolution and change in plant phenology aids in a better understanding of and predicting changes in ecosystems. Vegetation Indices (VIs) have been recognized for their utility in indicating vegetation activity. Understanding climatic variables and their relationship to VI support the knowledge base of how ecosystems are changing under a new climatic scenario. This study evaluates grassland growth phenology in the Biobio, Chile, biweekly with Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) time series. Four growth parameters for the six agro-climatic regions were analyzed from 2001 to 2020: start and end of the season, time and value of maximum NDVI. For this purpose, the NDVI time series were smoothed using Savitzky–Golay filtering. In addition, by using monthly gridded database climate data, we studied correlations between phenology markers and rainfall, maximum temperature and minimum temperature. The results show that both the start and end of the growing season did not significantly change; however, all agro-climatic regions grow faster and more vigorously. Thus, climatic conditions in Biobio have become more conducive to grassland growth over the 2001–2020 period.

Keywords: Phenology markers; vegetation index; climate; grassland

5.2 Introduction

Vegetation phenology is the study of biological patterns in plant growth over time, such as germination, flowering, fruiting, leaf emergence, etc. Moreover, it examines how these patterns relate to environmental factors, such as rainfall and air temperature, thus providing information about vegetation productivity, carbon reserve and carbon dynamics [1], which, in turn, yields data on the responses and adaptations of vegetation to climate change [2]. Therefore, monitoring vegetation with phenological metrics provides data to track changes in vegetation linked to events such as drought, fire, climate fluctuations or directional climate change [3]. The impact of climate change on vegetation causes variations in the phenological patterns of vegetation such as temporal displacement of phenological cycles, changes in plant morphology, colonization by other species, or even extinction of other species. Thus, these processes generate important indicators in ecosystem functions and species composition [4,5].

Grasslands are widely distributed around the world and play an important role in carbon

storage [6], which is a crucial factor in the mitigation of climate change [7]. Grasslands also provide essential resources for animal life and humankind as well as maintain the stability of ecological systems [8]. Grasslands are especially important to food supply as ruminants produce 37% more food, milk and meat than from pig and poultry [9].

As noted above, grassland plant growth is sensitive to regional and global climatic conditions. Previous research has described how grasslands show complex and varied responses to climate change [10,11]. Some studies concluded that warmer springs result in an earlier start of season (SOS) [12,13]. However, if rainfall decreases, increasing temperatures do not have a significant impact on phenology [14]. Due to the varied effects of climate change on grassland phenology, it is important to understand the responses to phenological events.

Changes in vegetation phenology were studied at a global level as well as regionally in areas of Africa [15], Europe [16], the Tibetan Plateau [17] and the northern high latitudes [1]. Results show that the magnitude of these changes varies depending on location, species and the temporal windows analyzed. Changes in phenology are mainly a response to human activity, rainfall, and temperature [18]. Of all the phenological stages, the SOS and the end of the growing season (EOS) are the most sensitive to climate change [19], more specifically to the effects of global warming caused by the increased atmospheric concentration of greenhouse gasses [20] and water availability [21]. At the same time, the sensitivity to rainfall and temperature differs from region to region [22]. The consequence of this is that the estimated long-term trends in phenological changes are different from one location to another and even for the same location. For example, Jeong et al. [23] showed different values of SOS and EOS in the northern hemisphere depending on the temporal window analyzed.

The two approaches, ground observations and earth observation (EO), can be, respectively, conducted to monitor vegetation phenology at a small scale [24,25] or at a large scale [26,27]. The former provides highly accurate and detailed species-specific phenological information, which is conducted through (a) visual observation of the states of the plant life cycle [24], (b) gas exchange measurement [28] or, (c) on-ground near-spectral measurements [29]. However, ground observations are inefficient, time-limited and expensive [30]. Despite these disadvantages, ground observations are very useful in precision agriculture for crop-specific phenological monitoring as they provide

information for crop management such as irrigation, fertilization, and other such practices. On the other hand, EO images from sensors onboard satellite platforms offer vegetation data derived from various spatial, spectral, radiometric and temporal resolutions [31,32] and have lower costs and better spatial-temporal continuity [20]. However, specific phenological events are not all directly detected, and therefore, vegetation patterns are calculated using Land Surface Phenology (LSP) [33], which is more generalized. Remote phenological studies can be divided into two groups, those which analyze trends in Vegetation Indices (VI) and those that derive the duration of status of phenophases to detect changes in phenological patterns. In both cases, data from remote sensing are obtained through temporal series of vegetation indices (VI), mainly the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) [34,35] and the Enhanced Vegetation Index (EVI) [36,37]. Of all the Earth observation projects, products obtained from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) are the most efficient to develop long-term time series of vegetation phenology [38]. MODIS vegetation products are used to monitor the phenology of forestall [39,40,41] and agricultural [42,43] ecosystems, drought monitoring [44,45] and classify crop species [46].

The process of deriving phenological information from remote sensing data includes three steps: (a) analyzing and improving the quality of VI time series, (b) VI time-series smoothing and, finally, (c) identifying relevant periods such as SOS or EOS [31,47]. Firstly, to reduce noise, such as the presence of clouds and/or shadows, off-nadir viewing effect or other errors, Maximum Value Composite (MVC) is applied to obtain temporally composite data [48]. The outputted VI time-series still includes noise artifacts, making smoothing necessary to minimize these residuals to be more representative [49]. The methods of VI time-series smoothing are classified into three groups: empirical methods [50,51], curve fitting methods [52,53] and data transformation [54]. Finally, phenological metrics extraction methods can be divided into two categories, threshold-based and change detection methods.

The objective of this study was to track phenological changes in Biobio grasslands. The study was carried out with the specific aims: (i) Are there significant differences in the timing of phenological markers? (ii) What climatic variables contribute to them? (iii) Are there any trends in these markers in the 2001–2020 period?

5.3 Materials and methods

5.3.1 Study Area.

The Biobio Region (Chile) (central coordinates 37°15' S, 72°30' W, WGS-84) covers an area of 37,068 km² (Figure 5.1a) and is divided in six agro-climatic regions: Secano Costero, Secano Interior, Depresión Intermedia, Cordón Isla, Precordillera and Cordillera (Figure 5.1b). This region is in a transition area ranging from a warm Mediterranean climate to a humid and temperate climate which makes it sensitive to ecological changes, such as human land use and the effects of climate change. Its bioclimatic variables per Hijmans et al. [55] and through monthly rainfall and temperature values show a total annual range of precipitation from 750 mm to 2000 mm, with the precipitation in the driest month being lower than 35 mm while in wettest month ranging from 150 mm to 350 mm. The temperature in the warmest month is around 25 °C while the coldest month ranges from 0 °C to 7 °C, with the annual mean temperature equal to 10 °C. Most of the region is covered by forest, followed by croplands and grasslands.

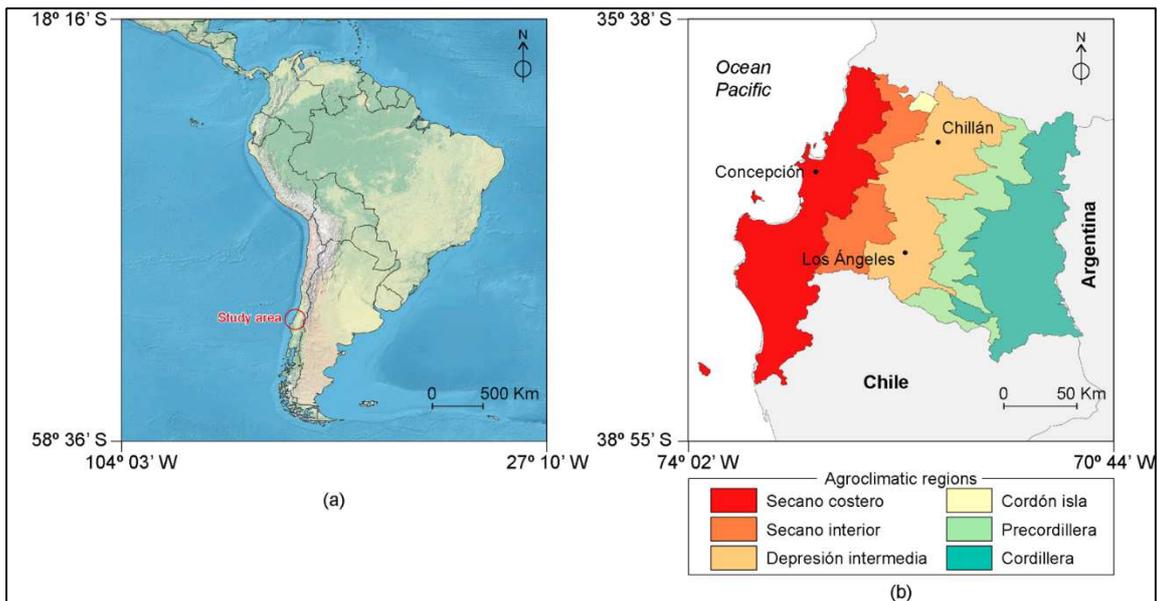


Figure 5.1. Study area: a) general context and b) agro-climatic regions in Biobio (Chile).

The Grasslands in the Biobio region are composed of temperate climate forage species and are classified as natural and sown grassland. Natural grassland yields range from 1.7 to 8.0 tonnes DM x ha⁻¹ x year⁻¹ while sown grassland yields can exceed 15 tonnes, DM x ha⁻¹ x year⁻¹. The natural grasslands are composed of species such as: *Avena barbata*, *Bromus*

mollis, *Hordeum murinum*, *Aira caryophylla*, *Paspalum dilatatum*, *Brisa minor*, *Hypochoeris glabra*, *Erodium cicutarium*, *Lolium rigidum*, *Lolium multiflorum*, *Trifolium glomeratum* and *Medicago polymorpha*; the sown grassland are composed of *Lolium perenne*, *Lolium multiflorum*, *Dactylis glomerata*, *Festuca arundinacea*, *Phalaris aquatica*, *Trifolium suterráneum*, *Trifolium michelianum*, *Trifolium pratense*, *Trifolium incarnatum*, *Trifolium repens*, *Lotus pedunculatus*, *Medicago sativa* and others [56].

5.3.2 Evolution of Climatic Variables

This section explains the evolution of the accumulated rainfall and maximum and minimum temperature variables for the six agro-climatic regions of the study area over the period of 2001–2020. The per-year graph densities are shown in Figure 5.2, which includes the agro-climatic region and climatic variable, the differences between the monthly mean values and their corresponding monthly mean value over the whole time series. In addition, in Appendix A, Figure 5.A.1, Figure 5.A.2 and Figure 5.A.3, represented in the boxplot, graphs the temporal evolution of these variables on a monthly scale for the period studied.

The variations in accumulated rainfall are represented in Figure 5.2a. When the density graph shifts to the right of 0 in any given year, it means that that year had greater rainfall within the period analyzed. On the other hand, when shifted to the left, that year was dry. In addition, the density graphs in Figure 5.2a present a binomial distribution, implying an irregular distribution of rainfall between very rainy and very dry periods and presenting similar behaviors across the agro-climatic regions in overall accumulated rainfall. In general terms, between 2001 and 2010, the annual density graphs show a distribution shifted to the right, and therefore accumulated rainfall was higher than the mean of the total period. On the other hand, from 2010 onwards, the curves shifted to the left and, therefore, it was drier. Thus, the accumulated rainfall has been decreasing over the years. There are, however, years with extreme accumulated rainfall values, both due to excess and deficiency. Thus, years such as 2001, 2002, 2005, 2006 and 2014 show higher values than the average of the values recorded between 2001 and 2020, while years such as 2007, 2010, 2012, 2013, 2016 and 2018 had values lower than the average.

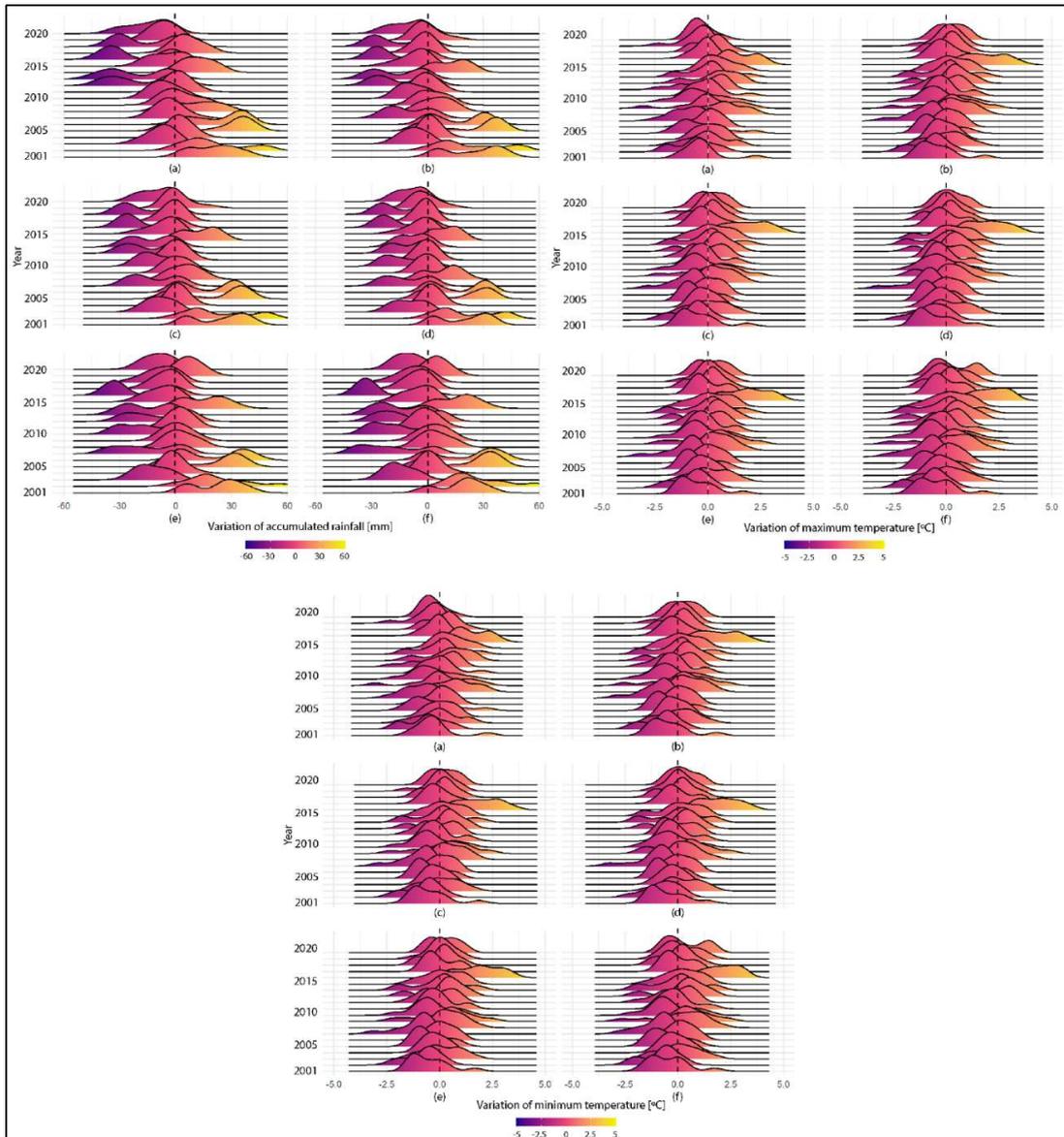


Figure 5.2. Variation density distribution graph of a) accumulated rainfall, b) maximum and c) minimum temperature in Biobío from 2001 to 2020 for the agro-climatic areas: 1) Secano Costero, 2) Secano interior, 3) Depresión Intermedia, 4) Cordón Isla, 5) Precordillera and, 6) Cordillera.

In regard to temperature, density graphs shifted to the right of 0 mean warmer years, while those shifted to the left mean colder years. The density graphs with variations of the maximum temperatures with respect to their monthly mean values (Figure 5.2b) show a tendency to shift to the right with respect to the central value of 0, which indicates an increase in maximum temperatures at the end of the temporal series. The year 2016, in particular, stands out for its increase in maximum temperatures to levels much higher than those in other years within the study period. In addition, it can be seen that the peaks of the density graphs are left at 0 at the beginning of the time series, which means that

monthly maximum temperatures were lower than the mean values for 2001–2020. As the time series progresses, the crests of the density graphs move to the right, thus showing increasing maximum temperatures. As with accumulated rainfall, this trend appears across all the agro-climatic regions. Finally, the minimum temperatures, shown in Figure 5.2c, display the same behavior as the maximum temperatures in such a way that the minimum temperatures at the beginning of the time series were lower than the mean monthly values of the time series analyzed and gradually shift to the right indicating an increase.

The time series of accumulated rainfall, maximum temperature and minimum temperature was decomposed into three components: trend, seasonal and irregular components through an additive model. Each agro-climatic region in Figure 5.3 shows the trend of the climatic variables analyzed. All of the regions show a downward trend related to accumulated rainfall (Figure 5.3a). This progressive decrease follows sinusoidal behavior, with very wet years interspersed with drier ones. Moreover, this trend is evident from the beginning of all the agro-climatic series. The Cordon Isla region (Figure 5.3(a.4)) is the driest of all the regions with a mean value of $860 \text{ mm} \times \text{year}^{-1}$. On the other hand, Secano Costero, Precordillera, and Cordillera regions are the rainiest with 1478, 1434 and $1431 \text{ mm} \times \text{year}^{-1}$ average, respectively. Finally, Secano Interior and Depresión Intermedia have a mean accumulated rainfall equal to 1071 and $1059 \text{ mm} \times \text{year}^{-1}$, respectively. In addition, the Precordillera, Cordillera and Secano Costero regions present the most variability with a standard deviation equal to ± 270.9 , 268 and $265 \text{ mm} \times \text{year}^{-1}$. The Cordon Isla, on the other hand, has the least variability with $\pm 214.0 \text{ mm} \times \text{year}^{-1}$. Lastly, the Secano Interior and Depresión Intermedia regions have a standard deviation equal to ± 244 and $231 \text{ mm} \times \text{year}^{-1}$, respectively. The wettest year was 2002 in all regions, reaching values between 2093 mm in the Cordillera region and 1293 mm in Cordon Isla. The year 2013 was the driest year in the regions of Secano Costero, Secano Interior and Depresión Intermedia, with values equal to 1022, 724 and 767 mm, respectively, while 2007 was the driest year in the regions of Cordon Isla, Precordillera and Cordillera, with annual rainfall values equal to 601, 1055 and 1037 mm.

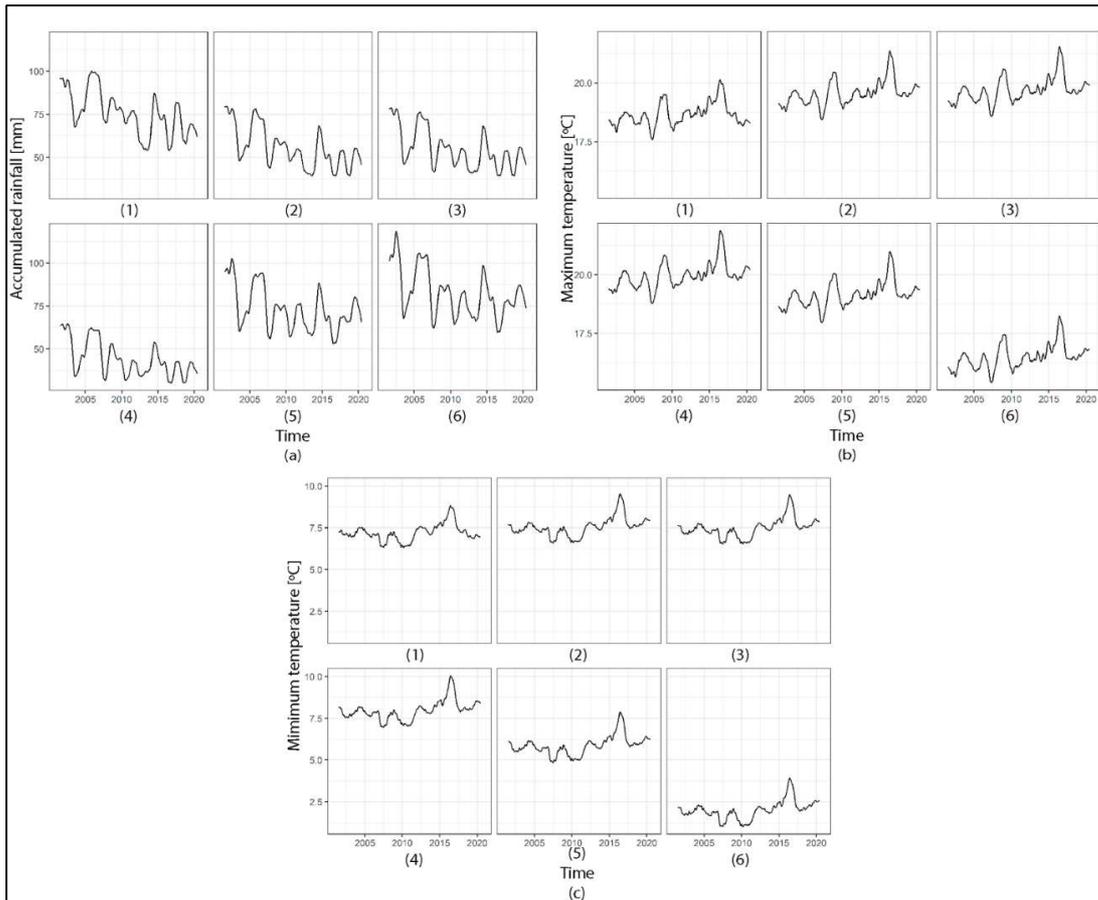


Figure 5.3. Trends of: a) accumulated rainfall, b) maximum and c) minimum temperature in Biobío from 2001 to 2020 for the agroclimatic areas: 1) Secano Costero, 2) Secano interior, 3) Depresión Intermedia, 4) Cordón Isla, 5) Precordillera and, 6) Cordillera.

In the case of temperatures, both maximum (Figure 5.3b) and minimum (Figure 5.3c) temperatures show an upward trend in all the agro-climatic regions, with maximum temperatures being more evident compared to minimum temperatures. In the case of maximum temperatures (Figure 5.3b), the trend curves obtained show that from 2001 to 2010, the upward trend is moderate. From 2010 onwards, the increase in maximum temperatures is greater. The Cordillera region has the lowest mean maximum temperatures (16.5 °C) and Cordon Isla has the highest (20.0 °C). The year 2016 had the highest maximum temperatures, with an average value for all regions equal to 20.7 °C, while 2007 had the lowest maximum temperatures, with an average value equal to 17.8 °C. The standard deviation of maximum temperatures in all regions was equal to ± 0.5 °C. On the other hand, the minimum temperatures (Figure 5.3c) between 2001 and 2010 present a negative trend, showing lower temperatures. However, from 2010 onwards, minimum temperatures change to an upward trend. The Cordillera region has the lowest

mean minimum temperature (2.01 °C) and Cordon Isla has the highest (7.98 °C). As with maximum temperature, the year 2016 presented the highest minimum temperatures, with an average value for all regions equal to 8.30 °C, while the year 2007 had the lowest minimum temperatures, with an average value equal to 5.35 °C. The standard deviation of maximum temperatures for all regions is equal to ± 0.5 °C. Based on the resulting trends obtained for accumulated rainfall, maximum temperatures and minimum temperatures in the 2001–2020 period, the six agro-climatic regions in Biobío are undergoing a reduction in water and an increase in temperature.

5.3.3 Datasets and Image Processing.

Figure 5.4 summarizes the methodology applied to this research. MODIS MOD13Q1 normalized difference vegetation index (NDVI) [57] was used as the remote sensing dataset, while TERRACLIMATE [58] was used as the climate database. The extraction of remote sensing and climate data for the study area between 2001 and 2020 was carried out with Google Earth Engine (GEE) using Earth Engine Python API as the client server to connect with Earth Engine Services. These extracted data, stored in Google Drive, were downloaded for further processing on a local machine. Information on the areas occupied by grasslands as well as the delimitation of the agro-climatic regions was obtained from the Corporación Nacional Forestal (CONAF) [59]. Grassland areas for each region were used to determine accumulated rainfall, maximum and minimum temperature, and NDVI trends. These data were then analyzed to determine the statistical relationships between climatic variables and NDVI. The phenological markers of the grassland were determined according to each agro-climatic region.

MODIS MOD13Q1 [57] data were used to study spatiotemporal changes in the grasslands. This dataset was computed from atmospherically corrected surface reflectance scenes with a temporal resolution of 16 days and a spatial resolution of 250 m. These were masked for water, clouds, cloud-shadow and heavy aerosols. Monthly climate data of maximum and minimum temperatures as well as rainfall were extracted from the TERRACLIMATE database.

A total of 480 MOD13Q1 NDVI images, as well as 240 images for each climatic variable, maximum and minimum temperature, and rainfall, from TERRACLIMATE from 2001 to 2021 were extracted. In addition, as TERRACLIMATE data have a monthly resolution, MOD13Q1 NDVI data were processed using the Maximum Value

Composites (MVC) method to acquire monthly NDVI. We used the MVC method to avoid the influence of solar altitude angle, clouds and/or atmospheric effects [60], thus permitting the study of the relationships between the two types of variables.

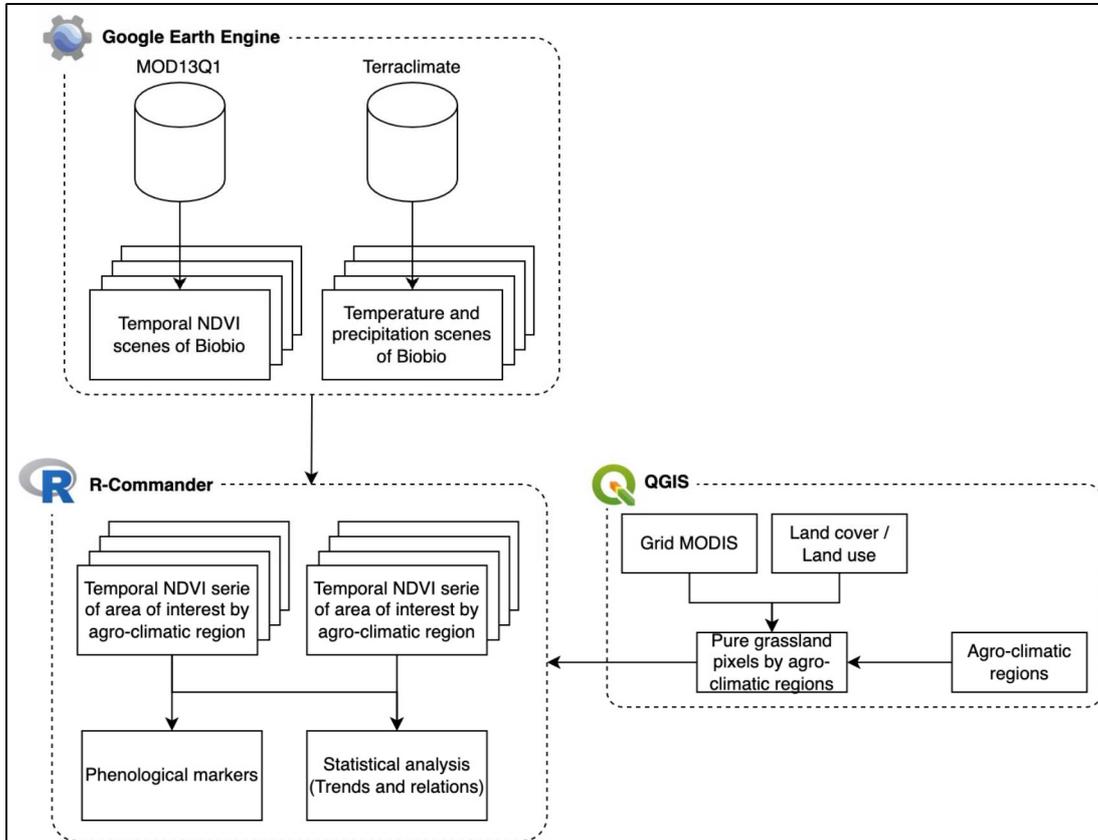


Figure 5.4. Flowchart describing the methodology of remote sensing and climatic data to describe phenology of grasslands in Biobio from 2001 to 2020.

5.3.4 NDVI Time-series.

The phenological markers SOS, EOS, the peak of maximum NDVI and the grassland values from 2001 to 2020 were extracted from the MOD13Q1 dataset. Firstly, referencing land coverage and land use (LCLU) maps from CONAF [59], pure pixels occupied by grasslands were identified. In order to perform this, the polygons categorized as grasslands were extracted and intersected with the MODIS pixel grid. On this spatial division, only those pixels completely occupied by grassland were selected for each agro-climatic region, thereby removing mixed pixels. For each MOD13Q1 scene and agro-climatic region, the median NDVI was determined, obtaining six NDVI time-series, one for each agro-climatic region, with a temporal resolution of 16 days. R-commander was used for this purpose.

The six NDVI time-series were processed with 'TIMESAT' software v3.3 [53] where annual NDVI values were smoothed using the Savitzky–Golay filter [61]. The phenological markers were determined as the 20% of the season amplitude from the left and right minimum values of NDVI fitted values, respectively [62,63]. Based on previous research [64], grassland phenology for each agro-climatic region was summarized as they are relatively homogeneous both in climate and biological diversity.

5.3.5 Statistical Analysis

First, to obtain an overview of the dynamics of the climate variables, the mean value of these variables for the period of 2001–2020 was determined for each month. Subsequently, for each month and year, their difference with the monthly mean value for the whole period was determined. These differences were represented by annual density plots to describe the behavior of the variables over the period analyzed.

Secondly, climatic variables and NDVI time series were decomposed into trend, cycle and residual. Trend corresponds to a long-term process that occurs over time, and the cycle explains the cyclical process that operates for each cycle once the trend is accounted for and residual, obtained after accounting for trend and cycle, explains local process caused by variability between cycles. Next, via cross-correlation analysis, the relationships between NDVI values and climatic variables for each agro-climatic region were examined in order to evaluate the climatic dependency of the Biobio grasslands.

Finally, as in other research [65,66], temporal trends in the data sets were evaluated with a linear regression model in which time was the independent variable while phenological markers were the dependent variables.

5.4 Results

5.4.1 NDVI Time-series

The evolution of the monthly mean NDVI for the six regions studied is shown in Figure 5.5. Each region shows a different development curve. Thus, in regions such as the Cordillera (Figure 5.5f), there is little variation in NDVI throughout the year, while in Cordón Isla (Figure 5.5d), there is a greater difference in the NDVI values recorded in the different seasons of the year. For the Secano Costero region (Figure 5.5a), the month with the lowest NDVI value was February (0.62), rising to stabilize in May, reaching the maximum value in November (0.76). In addition, the month with the highest interquartile

range was January (0.06), and the lowest was November (0.01), both close to SOS and EOS. The regions of Secano Interior (Figure 5.5b), and Depresión Intermedia (Figure 5.5c) show a similar NDVI evolution. In the case of the Secano Interior region (Figure 5.5b), the minimum and maximum NDVI values appear in February (0.49) and July (0.64), respectively, with December and April showing the lowest and highest variability, the interquartile ranges being equal to 0.03 and 0.08. The Depresión Intermedia region (Figure 5.5c) had the highest NDVI value in September (0.67) and the lowest in February (0.52), the months with the highest variability being the same as in Secano Interior.

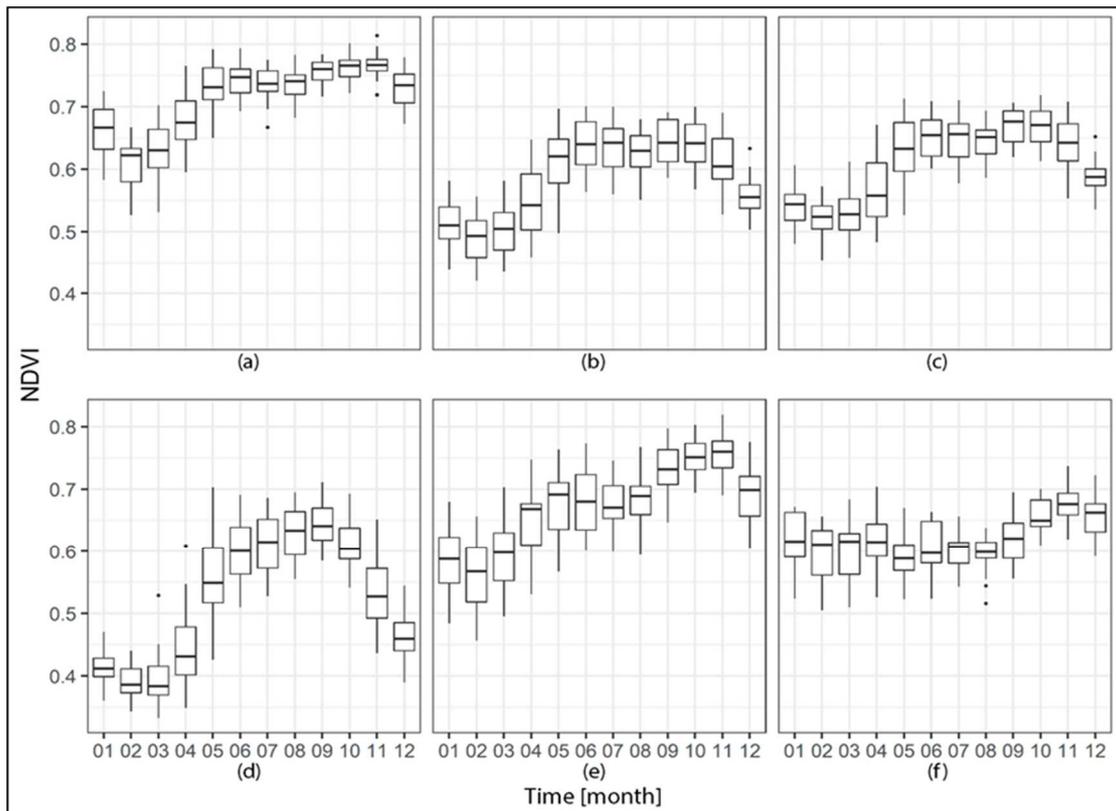


Figure 5.5. Boxplot of mean monthly NDVI values in Biobío from 2001 to 2020 for the agro-climatic areas: a) Secano Costero, b) Secano interior, c) Depresión Intermedia, d) Cordón Isla, e) Precordillera and, f) Cordillera.

Cordon Isla (Figure 5.5d) is the region with the greatest differences in NDVI between months. The lowest NDVI value is March (0.383), and the highest is September (0.641). From March to May, the NDVI increases progressively, the latter being the one with the largest interquartile range (0.08). Until September, the NDVI remains stable at high values and then starts to decrease. For the Precordillera region (Figure 5.5e), the NDVI has its lowest values in February (0.56). From February onwards, the index increases

progressively until November (0.76), where it starts to decrease. Finally, the Cordillera region (Figure 5.5f) is the one with the most stable NDVI value annually, with respective maximum and minimum values of 0.67 in November and 0.58 in May, registering the highest interquartile range in the season of growth for grasslands (December–March).

Seasonal parameters, SOS and EOS, extracted from TIMESAT for each agro-climatic region are shown in Table 5.1, where the term season refers to the annual cycle of NDVI. In addition, Figure 5.A.4 in Appendix A represents the NDVI time series and phenological markers SOS and EOS for each agro-climatic region. Based on these data, in the Biobio region, the average SOS between 2001 and 2020 is on the day of the year (DOY) 133, while EOS is on 388, resulting in a mean duration of the grassland cycle equal to 255. However, each agro-climatic region presented different phenological markers. The grasslands in the Secano Costero region are the ones that start the cycle earlier (SOS equals DOY 103). As they move away from the coast towards the interior, SOS increases until reaching the Precordillera region, where SOS decreases. Thus, mean SOS in Secano Interior, Depresión Intermedia, Cordon Isla and Precordillera appears on DOY 111, 113, 118 and 107, respectively. Finally, the grasslands in the Cordillera region present the greatest delayed mean SOS with a DOY equal to 245. On the other hand, EOS markers in grasslands according to the agro-climatic region do not show a pattern similar to SOS. The Cordillera region presents a mean EOS in DOY 506, i.e., the grassland cycle is between two years, while Cordon Isla presents in DOY 349. On the other hand, Secano Costero, Secano Interior, Depresión Intermedia and Precordillera present a mean SOS in DOYs equal to 383, 361, 364, 349 and 368, respectively. With these phenological markers, the average grassland cycle in the Biobio regions ranges from 279 days in Secano Costero to 231 days in Cordon Isla. In the Secano Interior and Depresión Intermedia regions, the average grassland cycle is 250 days, while in the Precordillera and Cordillera, it is 260 days.

5.4.2 Analysis of Relations between Climatic Variables and NDVI.

Previous research projects have shown that time lag between NDVI to climatic factors ranges from 0 to 3 months [67–69]. Each agro-climatic region was analyzed for the correlation coefficient values between concurrent average monthly NDVI and concurrent average monthly climatic variables (lag 0), monthly average of the previous month (lag 1) and monthly averages of the two previous months (lag 2) (Table 5.2).

Table 5.1. Start and End of growing Season of grassland in Biobio from 2001 to 2020 by agro-climatic regions.

YEAR	START OF GROWING SEASON						END OF GROWING SEASON					
	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
2001	118.5	96	115.5	121.5	114	217.5	372.45	360.9	356.85	338.7	360.15	500.7
2002	75	75	70.5	72	76.5	207	391.2	367.5	374.55	353.55	379.05	442.5
2003	147	144	145.5	157.5	150	270	379.95	372.9	376.35	358.2	374.1	508.05
2004	81	85.5	84	88.5	85.5	241.5	386.1	367.8	369.3	347.25	369	514.5
2005	99	123	130.5	126	109.5	255	399	384	379.5	352.5	376.5	546
2006	112.5	121.5	141	130.5	120	258	384	354	348	340.5	364.5	532.5
2007	112.5	94.5	94.5	103.5	87	228	396	363	370.5	352.5	376.5	502.5
2008	117	123	121.5	112.5	118.5	256.5	373.5	357	361.5	340.5	364.5	534
2009	102	132	127.5	130.5	115.5	276	375	355.5	360	355.5	370.5	540
2010	135	148.5	144	138	139.5	235.5	390	367.5	372	358.5	373.5	550.5
2011	99	93	96	112.5	94.5	235.5	372	346.5	346.5	337.5	355.5	514.5
2012	64.5	115.5	102	126	63	255	396	376.5	382.5	363	364.5	522
2013	106.5	121.5	126	121.5	124.5	265.5	364.5	351	352.5	345	354	519
2014	96	108	105	115.5	96	204	378	357	364.5	346.5	369	393
2015	111	114	117	135	114	274.5	394.5	360	361.5	345	370.5	381
2016	108	106.5	106.5	112.5	106.5	253.5	373.5	351	351	337.5	366	559.5
2017	81	97.5	105	109.5	94.5	252	385.5	367.5	366	351	372	529.5
2018	88.5	90	91.5	111	87	274.5	388.5	376.5	376.5	363	373.5	525
2019	117	129	132	124.5	135	217.5	382.5	357	357	349.5	363	508.5
2020	106.5	118.5	112.5	120	126	237	378	345	355.5	358.5	366	498

Agro-climatic region: A) Secano Costero, B) Secano Interior, C) Depresión Intermedia, D) Cordón Isla, E) Precordillera and F) Cordillera.

Table 5.2. Correlation between monthly NDVI with accumulated rainfall, maximum and minimum temperatures at different intervals.

AGRO-CLIMATIC AREA	ACCUMULATED RAINFALL			MAXIMUM TEMPERATURE			MINIMUM TEMPERATURE		
	LAG (0)	LAG (1)	LAG (2)	LAG (0)	LAG (1)	LAG (2)	LAG (0)	LAG (1)	LAG (2)
SECANO COSTERO	0.68	0.64	0.41	-0.56	-0.21	0.21	-0.49	-0.27	0.05
SECANO INTERIOR	0.50	0.62	0.52	-0.66	-0.38	0.03	-0.59	-0.34	0.02
DEPRESIÓN INTERMEDIA	0.58	0.68	0.54	-0.63	-0.32	0.10	-0.56	-0.29	0.10
CORDÓN ISLA	0.55	0.71	0.68	-0.74	-0.43	0.02	-0.71	-0.42	0.00
PRECORDILLERA	0.67	0.61	0.34	-0.38	-0.06	0.30	-0.36	-0.01	0.35
CORDILLERA	0.36	0.12	-0.23	0.21	0.38	0.45	0.19	0.41	0.50

Values with a significance level $\alpha = 0.05$ (p-value < 0.001)

Positive correlation results between accumulated rainfall and NDVI were obtained in lag 0 and 1 for all agro-climatic regions, while for lag 2, the Cordillera region showed a negative correlation, mainly due to the presence of snow. Accumulated rainfall and NDVI showed a significant positive correlation from lag 0 and, therefore, an immediate positive impact on grasslands. Particularly, in Secano Costero, Precordillera and Cordillera, the response of NDVI to accumulated rainfall showed the highest correlation at lag 0 while in Secano Interior, Depresión Intermedia and Cordón Isla was at lag 1, which means that the highest positive effect appears the following month. In Lag 2, high values are maintained above all in the areas where it rains less, Secano Interior, Depresión Intermedia and Cordón Isla. However, in the areas where rainfall is less necessary, a drop in the correlation in lag 2 can be observed. For maximum and minimum temperature, except in the Cordillera region, the highest correlations were obtained in Lag 0 for both maximum and minimum temperatures. The correlation was negative, indicating that higher temperatures have a negative effect on NDVI, reducing it. Moreover, its effect on grassland appears immediately, with lag equal to 0. The Cordon Isla region showed the highest values, corresponding to the driest region of all the analyzed regions. At the opposite extreme, temperatures in the Cordillera region, both maximum and minimum, have a positive effect on vegetation, increasing the NDVI. The result of an increase in temperature is reflected in the following two months (Lag 2). The results obtained show how climatic variables are related to NDVI values. Thus, an increase in rainfall results in an increase in NDVI values, while they decrease with increasing temperatures.

Having proved that climatic variables influence grassland development in Biobio, with a growing tendency towards reduced rainfall and increased maximum and minimum temperatures, the general trend and phenological markers of NDVI in each region between 2001 and 2020 are presented below. Trends of NDVI values for each region are shown in Figure 5.6. The trends of the NDVI series of the agro-climatic regions in Biobio show a similar pattern, differentiating an initial period with little change in the NDVI and a second period with an increase in the index. Thus, between 2001 and 2007, NDVI values do not show a clear change in their evolution. In 2008 there was a reduction in the NDVI value in each region, and from that year onwards, there was an increase in NDVI, with greater or lesser intensity depending on the agro-climatic region. Such NDVI trends are

aligned with the evolution of the climatic variables presented in Section 5.4.1. Of all the regions, the Secano Costero region is the one with the highest NDVI values and the smallest increase, presenting stability compared to the other regions. On the other hand, the Precordillera region presents the highest increase in NDVI, reaching similar values to the Secano Costero region in recent years. The Secano Interior and Depresión Intermedia regions behave similarly, with shared increases in NDVI, but more moderately than in the Precordillera region. The Cordillera region has NDVI values in the same range as the two previous regions, although with more accentuated fluctuations over time.

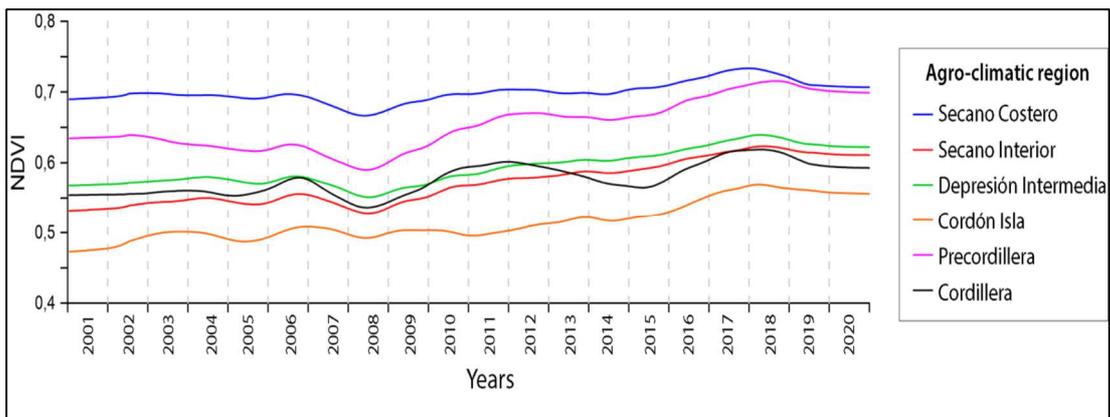


Figure 5.6. Trends of NDVI over 2001-2020 for each agro-climatic region of Biobío.

Figure 5.7 represents the trends of phenological markers: SOS (Figure 5.7a), EOS (Figure 5.7b), the peak of the season (Figure 5.7c) and NDVI (Figure 5.7d) over time during the 2001–2020 period. In general, the trend changes in grassland phenology at the peak of maximum NDVI and its value in the period 2001–2020 are more pronounced than SOS and EOS. In the Secano Costero region, the temporal relationships between SOS (Figure 5.7(a.1)) and EOS (Figure 5.7(b.1)) slope negatively, which means both growth periods occur earlier, although the duration of the cycle stays the same. This same behavior appears in the Depresión Intermedia (Figure 5.7(a.3,b.3) and Precordillera (Figure 5.7(a.5,b.5)) regions. On the other hand, the Secano Interior and Cordillera region present with positive slopes in SOS (Figure 5.7(a.2,a.6)) and a negative slope in EOS (Figure 5.7(b.2,b.6)). This means a reduction in the phenological cycle of the grasslands in these regions due to the delay of SOS and the advancement of EOS. Finally, the Cordón Isla region has a positive slope in both SOS (Figure 5.7(a.4)) and EOS (Figure 5.7(b.4)) so that there is a delay in the entire grassland cycle in this region without major changes in

the duration of the cycle. Based on the low values obtained in the slopes of the SOS and EOS trends, there appear to be no important changes in the start or end of the phenological cycle of the grasslands.

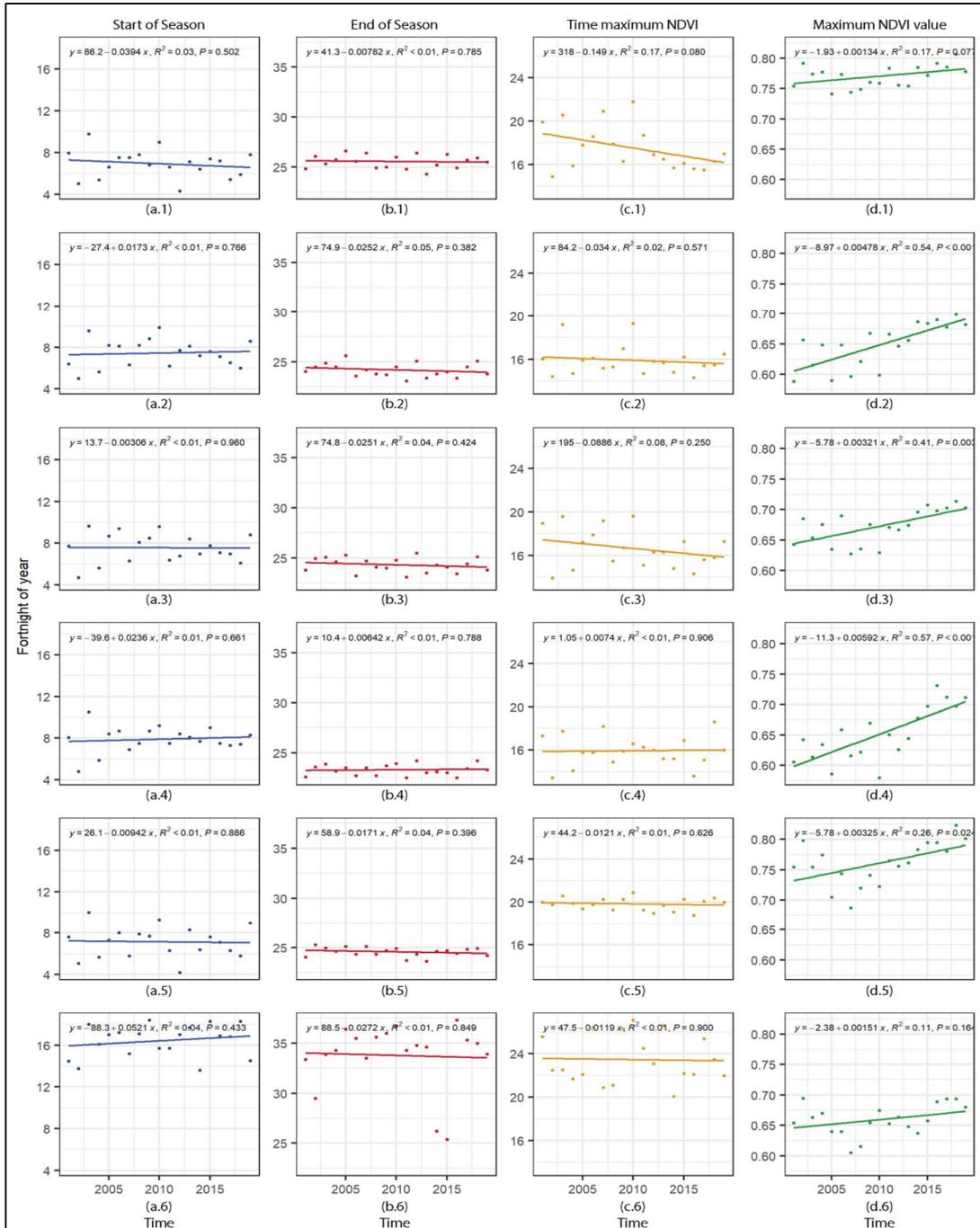


Figure 5.7. Evolution of phenological metrics: a) start of season, b) end of season, c) peak value of season and d) NDVI at the peak, as a function of year from 2001 to 2020 in the six agro-climatic regions of Biobío: 1) Secano Costero, 2) Secano interior, 3) Depresión Intermedia, 4) Cordón Isla, 5) Precordillera and, 6) Cordillera.

When analyzing the results obtained in the trend at the moment of reaching the maximum NDVI (Figure 5.7c), as well as its value (Figure 5.7d), there is a general trend to reach maximum NDVI earlier (negative slope) and with a higher value in the index (positive slope). It is in the regions of Secano Costero (Figure 5.7(c.1)) and Depresión Intermedia (Figure 5.7(c.3)) where there is a more evident advance in reaching maximum vigor, with a higher negative slope. Secano Interior (Figure 5.7(c.2)), Precordillera (Figure 5.7(c.5)) and Cordillera (Figure 5.7(c.6)) show this advance as well but in a less accentuated manner. Cordón Isla (Figure 5.7(c.4)) is the only region that shows a delay in this marker. Finally, all regions show an upward trend in NDVI, with Cordon Isla (Figure 5.7(d.4)) showing the greatest increment over time, while the Secano Costero (Figure 5.7(d.1)) and Cordillera (Figure 5.7(d.6)) regions show the smallest.

5.5 Discussion

Phenological observations provide localized information with high temporal resolutions in different biological phases. Phenology varies over geographic gradients according to climate zone and vegetation type. Phenology also varies within communities, and the phenology of individual plants plays a key role in determining how ecosystems are structured and how they function [70]. Temperate forest trends are attributed to warming temperatures [23,71]. In addition, boreal and subalpine forests show similar trends to those observed in temperate forests, which are attributed to a warming climate [72,73]; moreover, there is little evidence that rainfall has a significant influence on boreal forest phenology [74]. In Subalpine meadows and the Arctic and alpine tundras, in high latitudes and high altitude ecosystems, there are two main factors that regulate SOS, the timing of snowmelt and the temperatures that follow [75] while warm might delay EOS [76]; however, it has not been extensively studied. On the other hand, the impacts of climate change on tropical forests vary across regional-to-continental scales. Decreasing precipitation and reduced cloudiness in Amazonia may result in different phenological shifts than, for example, in central Africa, where precipitation is projected to increase [77]. Mediterranean areas include a diverse range of plant types, and phenological responses to environmental cues vary accordingly. Temperature is a key factor for most species, but rainfall, through its influence on soil moisture, is also important [78,79]. Finally, in subtropical desert ecosystems, phenological variations resulting from climate change may occur due to changes in the timing and quantity of rainfall and increases in temperature

[80]. Therefore, phenology varies over geographic gradients according to climate zone and vegetation type.

In contrast to direct phenological observations, satellite data have the advantage of high spatial coverage. It allows global, regional, and local studies. NDVI and climatic time series provide key information in the study of vegetation. The analysis of vegetation requires a spatial and temporal approach to explain changes and dynamics in vegetation. Temporal, seasonal and phenological metrics obtained by vegetation index series from remote sensing scenes provide useful information to understand vegetation conditions at regional scales. Taking into account previous research, the climatic response of grasslands varies geographically. Previous studies have shown that a warming climate has a positive impact on greening in the northern hemisphere, relying on the continuously warming air and spatially uneven trends of precipitation [81,82]. However, increased temperatures could not be the primary control of grassland. Rainfall is a factor that plays a relevant role in grassland. In the Biobio region, temperature increase from 2001 to 2020 has extended the period where conditions are favorable to plant growth; however, the grasslands have not benefitted from these conditions. Instead, grasslands in Biobio have shown little change at SOS and EOS. However, photosynthetic capacity, measured by NDVI, has increased significantly in all the agro-climatic regions of Biobio. These trends show how grasslands grow faster and more vigorously as temperatures increase. On the other hand, the incapacity of grasslands to exploit thermal resources can be potentially explained by a mismatch between current vegetation and climate conditions, which could be explained by the novel conditions caused by climate change, such as the reduction in rainfall. These results presented here align with other research, such as those in the Tibetan Plateau [83].

Grasslands are very sensitive to rainfall, so more arid conditions would lead to lower productivity. However, a decrease in winter frosts through higher minimum temperatures, higher temperatures in general and higher solar radiation would compensate for the negative effect of lower rainfall and may even result in a slight increase in productivity [84]. This contradictory situation could also be explained by the beneficial effect of high CO₂ concentrations in the atmosphere, which stimulates net plant photosynthesis [85], improving their growth and productivity [86,87], and water use efficiency [88]. CO₂ concentration can be measured through the use of onboard sensors on satellite platforms such as Sentinel 5P, GOSAT or OCO-2. These platforms have only recently been

launched, however, and there are not enough data to create robust time-series data to analyze; thus, future work should evaluate climate and atmospheric variables together.

Therefore, recent warming trends have been associated with earlier vegetation activity in spring and an overall extension in the length of the growing season [89]. On the other hand, there is less of a consensus on how climate change is affecting end-of-season phenology, although many biological events are observed to be occurring later [90].

While no comparisons have been made in this study between ground observations and the remote sensing-based results, this type of activity is needed to more fully understand and validate remote sensing-based observations of large-scale phenology in terrestrial vegetation.

On the other hand, variations in climate conditions have an important impact on water balance and material circulation in watersheds. Thus, the influence of climate change on water quality has been previously documented [91,92]. It is assumed that climate change can influence water environments by affecting water flow, pollutant transformation and migration, as well as toxicity [93,94]. Moreover, transformation and migration patterns of toxic pollutants in the water environment are complex processes, and the influencing mechanism of climate change on heavy metals is still unknown. Recently, a few studies demonstrated the impact of meteorological factors on heavy metals using model simulation methods or short-term water quality data [95,96]. High heavy metal concentrations in soils were cited as one of the factors limiting vegetation establishment and growth in areas suffering high anthropogenic impact [97,98,99]. Thus, heavy metal toxicity first affects the growth of vegetation roots because they are more sensitive to heavy metal stress. In addition, heavy metal pollution limits root growth and results in decreased root weight [100,101]. Based on previous research in the study area [102,103,104,105], future projects should analyze the influence of heavy metal and contaminant concentrations in soil, together with climatic variables and vegetation indices, to study changes in the phenology of vegetation, including grasslands.

Based on article 4.8 of the United Nations Framework Convention on Climate Change [106], Chile meets 7 of the 9 vulnerability characteristics to be identified as a region in the world affected by the alteration of the current global climate pattern. The map of grassland phenology in the Biobio region can support decision-making in monitoring

vulnerability to climate variations and therefore serves as a useful tool for assessing measures taken against climate change.

5.6 Conclusions

In a scenario where climatic conditions are changing, monitoring tools are required to understand impacts on vegetation better. Therefore, an understanding of the drivers involved in phenology is needed even when detailed field observations are lacking, and meteorological stations are scarce. This result makes remote sensing datasets for vegetation monitoring a particularly useful tool under these scenarios. In this study, we evaluated the timing of phenology markers and their response to climate conditions in six agro-climatic regions in Biobio. Our results suggest that climatic conditions in Biobio have become more conducive to grassland growth over the 2001–2020 period. During this period, rainfall has decreased; however, favorable thermal conditions have extended. In this context, the grasslands have shown more intensive photosynthetic activity but without extending the period of activity. The six areas analyzed show that between 2001 and 2010, the evolution of NDVI values was stable. However, between 2010 and 2020, there was an increase in NDVI values to a greater or lesser extent depending on the area analyzed. The Precordillera region shows the greatest increase, while Secano Costero is the most stable.

In general, the results from this study highlight the relationship between grassland phenology and their response to the climatic variables of accumulated rainfall and temperature, both maximum and minimum, which has implications for developing policy frameworks for grassland management and protection and its relationship with future climate change.

Author Contributions: Conceptualization, M.-A.D.-G., F.-J.P.-P. and F.-J.M.-C.; methodology, M.-A.D.-G., F.-J.P.-P. and F.-J.M.-C.; validation, P.T.-T.; A.-F.R.-M. and A.G.-F.P.; formal analysis, M.-A.D.-G. and F.-J.M.-C.; writing—original draft preparation, F.-J.M.-C.; writing—review and editing, M.-A.D.-G., F.-J.P.-P. and F.-J.M.-C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Not applicable.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

5.7 Appendix A

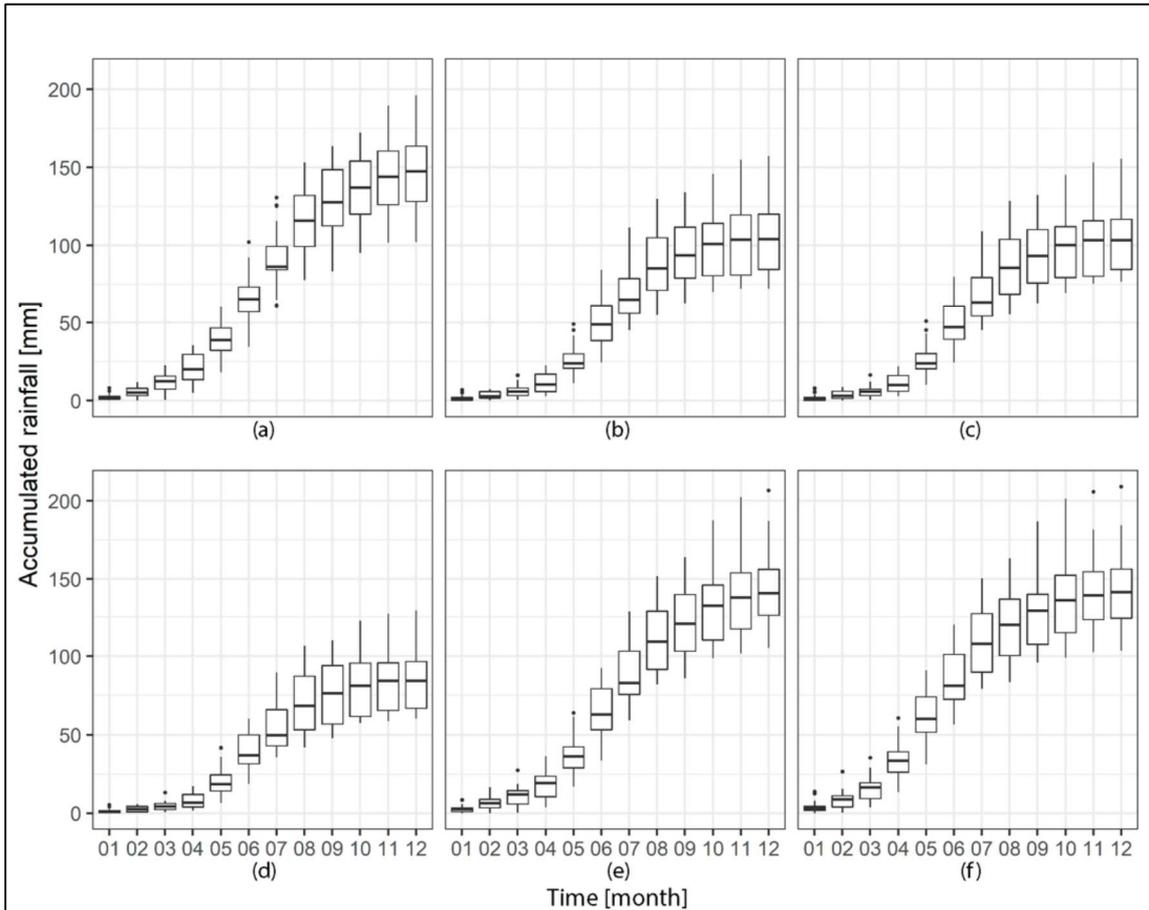


Figure 5.A.1. Box-plot of accumulated rainfall per month for the agro-climatic areas of Biobío: a) Secano Costero, b) Secano interior, c) Depresión Intermedia, d) Cordón Isla, e) Precordillera and, f) Cordillera.

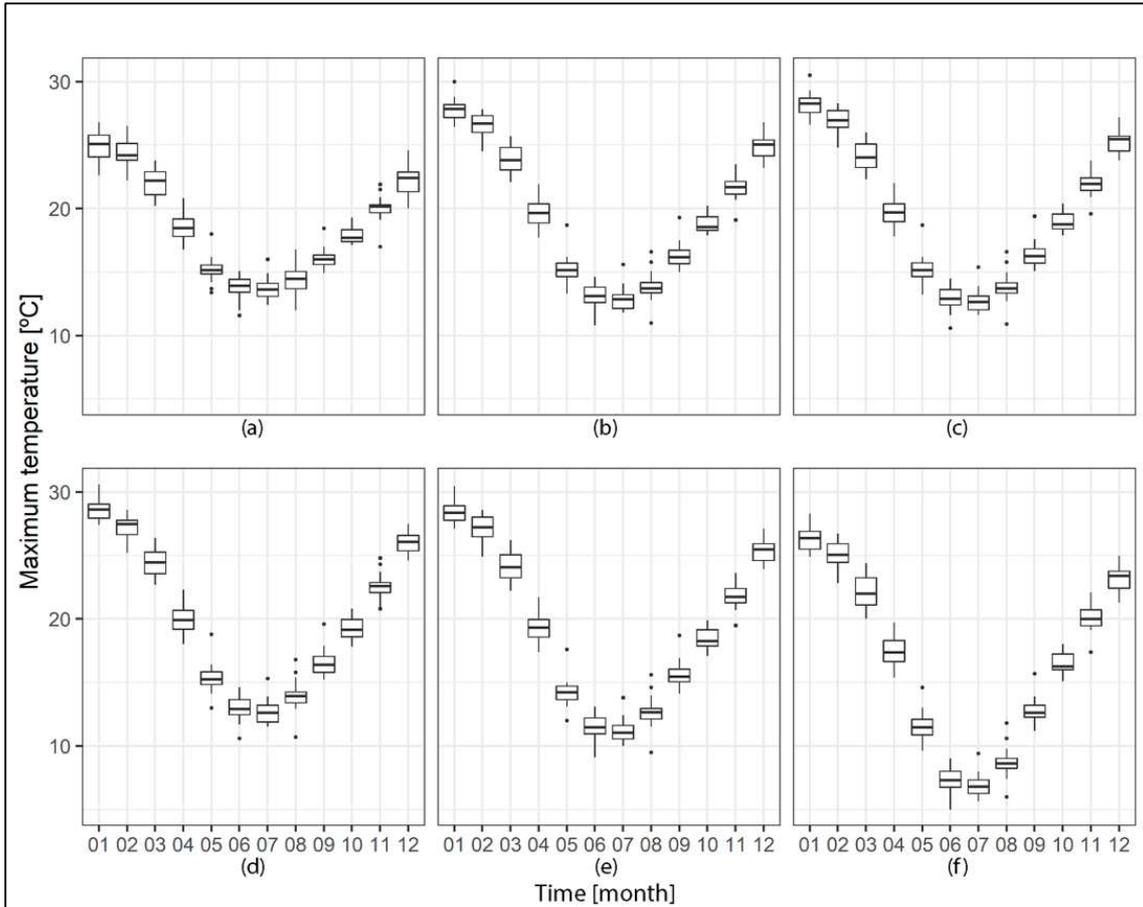


Figure 5.A.2. Box-plot of accumulated rainfall per month for the agro-climatic areas of Biobio: a) Secano Costero, b) Secano interior, c) Depresión Intermedia, d) Cordón Isla, e) Precordillera and, f) Cordillera.

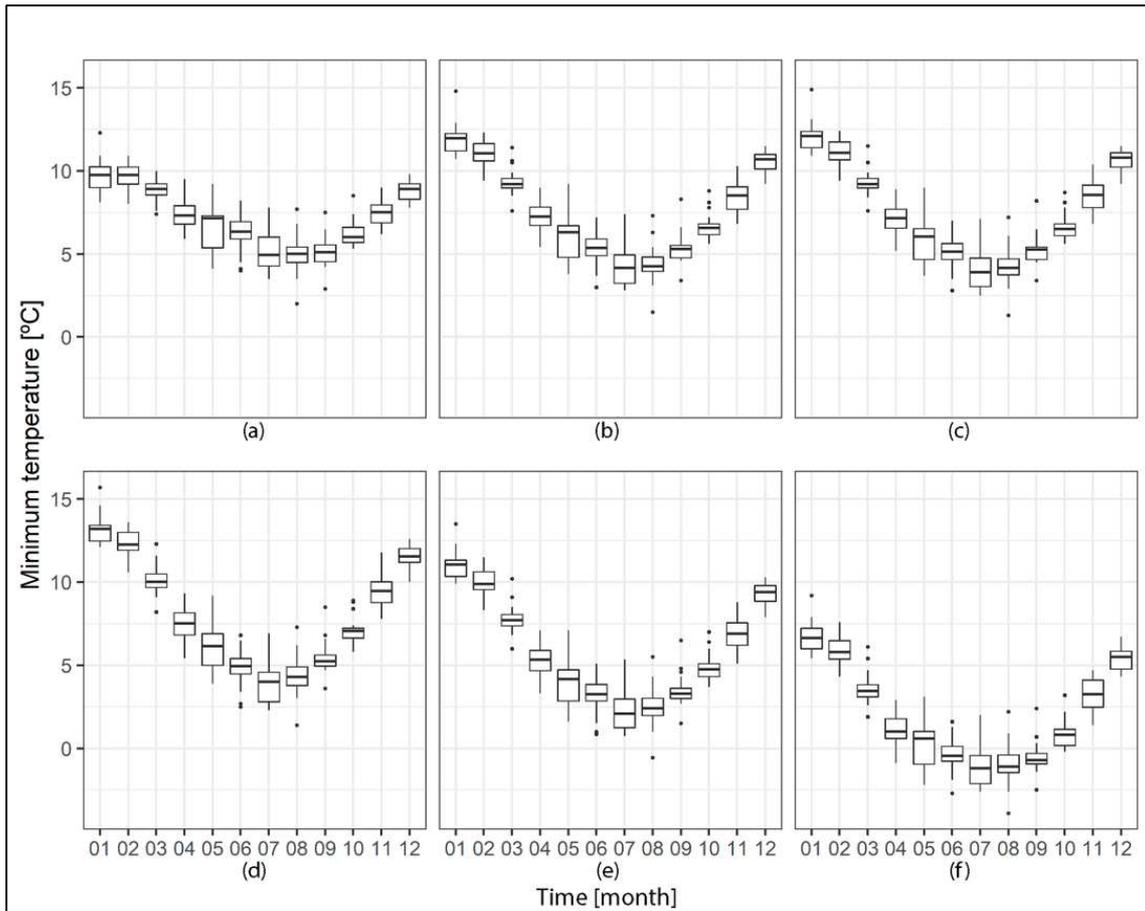


Figure 5.A.3. Box-plot of accumulated rainfall per month for the agro-climatic areas of Biobío: a) Secano Costero, b) Secano interior, c) Depresión Intermedia, d) Cordón Isla, e) Precordillera and, f) Cordillera.

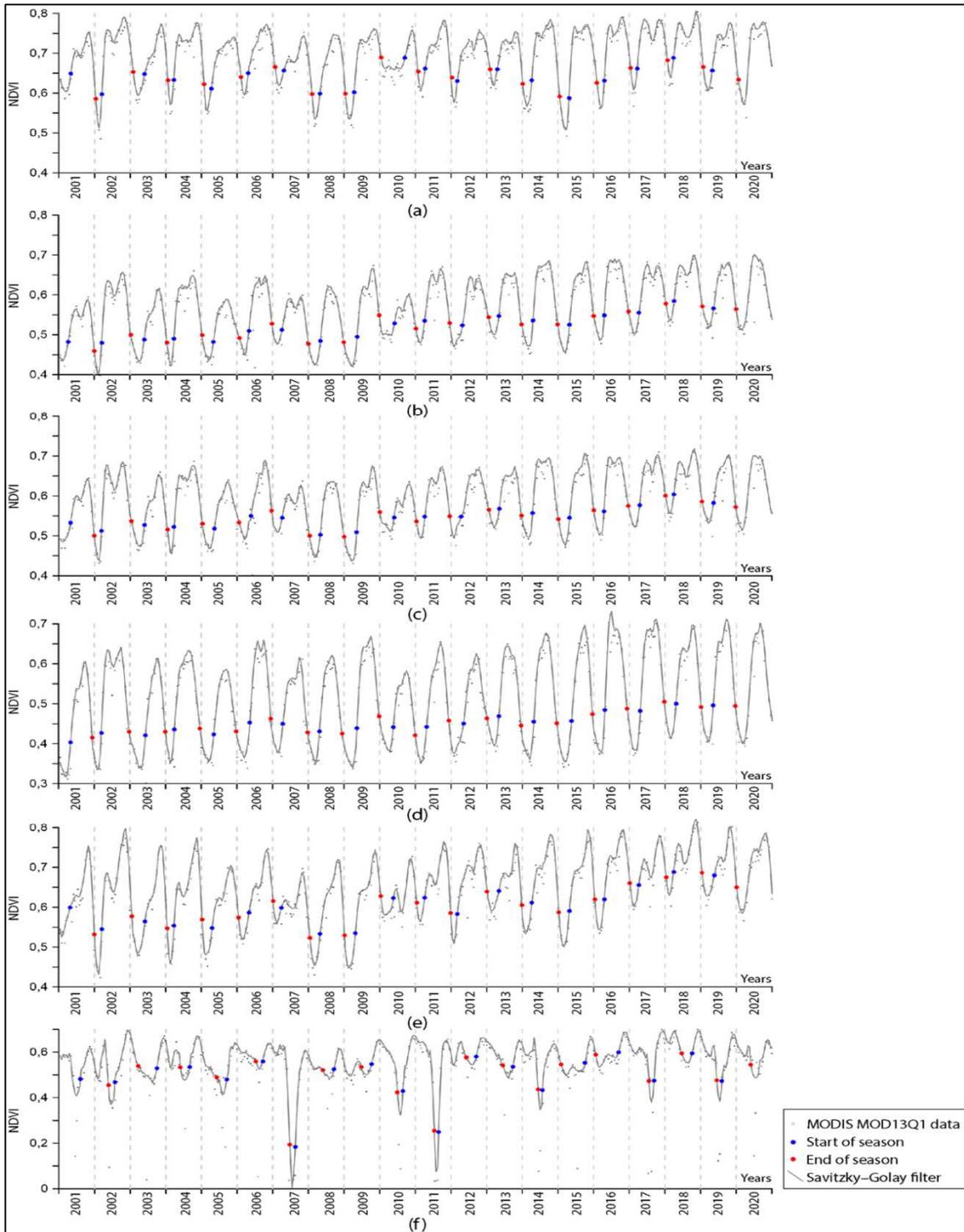


Figure 5.A.4. NDVI seasonal analysis with raw MODIS and fitted data marked as start of season and end of season from 2001 to 2020 in the six agro-climatic regions of Biobio: a) Secano Costero, b) Secano Interior, c) Depresión Intermedia, d) Cordón Isla, e) Precordillera and f) Cordillera.

5.8 References

1. Myneni, R.B.; Keeling, C.D.; Tucker, C.J.; Asrar, G.; Nemani, R.R. Increased plant

- growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature* **1997**, *386*, 698–702.
2. Piao, S.; Liu, Q.; Chen, A.; Janssens, I.A.; Fu, Y.; Dai, J.; Liu, L.; Lian, X.; Shen, M.; Zhu, X. Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges. *Glob. Chang. Biol.* **2019**, *25*, 1922–1940.
 3. Justice, C.O.; Holben, B.N.; Gwynne, M.D. Monitoring East African vegetation using AVHRR data. *Int. J. Remote Sens.* **1986**, *7*, 1453–1474.
 4. McCloy, K.R. Development and Evaluation of Phenological Change Indices Derived from Time Series of Image Data. *Remote Sens.* 2010, *2*.
 5. Peñuelas, J.; Filella, I.; Zhang, X.; Llorens, L.; Ogaya, R.; Lloret, F.; Comas, P.; Estiarte, M.; Terradas, J. Complex spatiotemporal phenological shifts as a response to rainfall changes. *New Phytol.* **2004**, *161*, 837–846.
 6. Conant, R.T. *Challenges and opportunities for carbon sequestration in grassland systems*; FAO Rome, Italy: Rome, Italy, 2010;
 7. Lal, R. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science (80-.)*. **2004**, *304*, 1623–1627.
 8. Hall, D.O.; Scurlock, J.M.O.; Ojima, D.S.; Parton, W.J.; Wigley, T.M.L.; Schimel, D. Grasslands and the global carbon cycle: modeling the effects of climate change. *Carbon cycle (eds Wigley TML, Schimel DS)* **2000**, 103–114.
 9. O'Mara, F.P. The role of grasslands in food security and climate change. *Ann. Bot.* **2012**, *110*, 1263–1270.
 10. Bloor, J.M.G.; Pichon, P.; Falcimagne, R.; Leadley, P.; Soussana, J.-F. Effects of Warming, Summer Drought, and CO₂ Enrichment on Aboveground Biomass Production, Flowering Phenology, and Community Structure in an Upland Grassland Ecosystem. *Ecosystems* **2010**, *13*, 888–900.
 11. Piao, S.; Fang, J.; Zhou, L.; Ciais, P.; Zhu, B. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation. *Glob. Chang. Biol.* **2006**, *12*, 672–685.
 12. Xia, J.; Wan, S. Independent effects of warming and nitrogen addition on plant phenology in the Inner Mongolian steppe. *Ann. Bot.* **2013**, *111*, 1207–1217.
 13. Wu, X.; Liu, H. Consistent shifts in spring vegetation green-up date across temperate biomes in China, 1982–2006. *Glob. Chang. Biol.* **2013**, *19*, 870–880.
 14. Hovenden, M.J.; Wills, K.E.; Vander Schoor, J.K.; Williams, A.L.; Newton, P.C.D. Flowering phenology in a species-rich temperate grassland is sensitive to warming but not elevated CO₂. *New Phytol.* **2008**, *178*, 815–822.
 15. Vrieling, A.; De Leeuw, J.; Said, M.Y. Length of Growing Period over Africa: Variability and Trends from 30 Years of NDVI Time Series. *Remote Sens.* 2013, *5*.
 16. Fu, Y.H.; Piao, S.; Op de Beeck, M.; Cong, N.; Zhao, H.; Zhang, Y.; Menzel, A.; Janssens, I.A. Recent spring phenology shifts in western Central Europe based on multiscale observations. *Glob. Ecol. Biogeogr.* **2014**, *23*, 1255–1263.
 17. Zhang, G.; Zhang, Y.; Dong, J.; Xiao, X. Green-up dates in the Tibetan Plateau have continuously advanced from 1982 to 2011. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **2013**, *110*, 4309 LP – 4314.

18. Zhang, X.; Friedl, M.A.; Schaaf, C.B.; Strahler, A.H.; Liu, Z. Monitoring the response of vegetation phenology to precipitation in Africa by coupling MODIS and TRMM instruments. *J. Geophys. Res. Atmos.* **2005**, *110*.
19. Fu, Y.H.; Zhao, H.; Piao, S.; Peaucelle, M.; Peng, S.; Zhou, G.; Ciais, P.; Huang, M.; Menzel, A.; Peñuelas, J.; *et al.* Declining global warming effects on the phenology of spring leaf unfolding. *Nature* **2015**, *526*, 104–107.
20. Shen, M.; Tang, Y.; Chen, J.; Yang, X.; Wang, C.; Cui, X.; Yang, Y.; Han, L.; Li, L.; Du, J.; *et al.* Earlier-Season Vegetation Has Greater Temperature Sensitivity of Spring Phenology in Northern Hemisphere. *PLoS One* **2014**, *9*, e88178.
21. Forkel, M.; Migliavacca, M.; Thonicke, K.; Reichstein, M.; Schaphoff, S.; Weber, U.; Carvalhais, N. Codominant water control on global interannual variability and trends in land surface phenology and greenness. *Glob. Chang. Biol.* **2015**, *21*, 3414–3435.
22. Workie, T.G.; Debella, H.J. Climate change and its effects on vegetation phenology across ecoregions of Ethiopia. *Glob. Ecol. Conserv.* **2018**, *13*, e00366.
23. Jeong, S.-J.; Ho, C.-H.; Gim, H.-J.; Brown, M.E. Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982–2008. *Glob. Chang. Biol.* **2011**, *17*, 2385–2399.
24. Chmielewski, F.-M.; Müller, A.; Bruns, E. Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961–2000. *Agric. For. Meteorol.* **2004**, *121*, 69–78.
25. Crimmins, T.M.; Crimmins, M.A.; David Bertelsen, C. Complex responses to climate drivers in onset of spring flowering across a semi-arid elevation gradient. *J. Ecol.* **2010**, *98*, 1042–1051.
26. Dash, J.; Jeganathan, C.; Atkinson, P.M. The use of MERIS Terrestrial Chlorophyll Index to study spatio-temporal variation in vegetation phenology over India. *Remote Sens. Environ.* **2010**, *114*, 1388–1402.
27. Zhang, X.; Friedl, M.A.; Schaaf, C.B.; Strahler, A.H.; Hodges, J.C.F.; Gao, F.; Reed, B.C.; Huete, A. Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sens. Environ.* **2003**, *84*, 471–475.
28. Jin, C.; Xiao, X.; Merbold, L.; Arneith, A.; Veenendaal, E.; Kutsch, W.L. Phenology and gross primary production of two dominant savanna woodland ecosystems in Southern Africa. *Remote Sens. Environ.* **2013**, *135*, 189–201.
29. Hufkens, K.; Friedl, M.; Sonnentag, O.; Braswell, B.H.; Milliman, T.; Richardson, A.D. Linking near-surface and satellite remote sensing measurements of deciduous broadleaf forest phenology. *Remote Sens. Environ.* **2012**, *117*, 307–321.
30. Zhu, W.; Tian, H.; Xu, X.; Pan, Y.; Chen, G.; Lin, W. Extension of the growing season due to delayed autumn over mid and high latitudes in North America during 1982–2006. *Glob. Ecol. Biogeogr.* **2012**, *21*, 260–271.
31. White, M.A.; De Beurs, K.M.; Didan, K.; Inouye, D.W.; Richardson, A.D.; Jensen, O.P.; O’Keefe, J.; Zhang, G.; Nemani, R.R.; Van Leeuwen, W.J.D.; *et al.* Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982–2006. *Glob. Chang. Biol.* **2009**, *15*,

- 2335–2359.
32. Xie, Y.; Sha, Z.; Yu, M. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. *J. Plant Ecol.* **2008**, *1*, 9–23.
 33. De Beurs, K.M.; Henebry, G.M. Land surface phenology and temperature variation in the International Geosphere–Biosphere Program high-latitude transects. *Glob. Chang. Biol.* **2005**, *11*, 779–790.
 34. Wu, C.; Peng, D.; Soudani, K.; Siebicke, L.; Gough, C.M.; Arain, M.A.; Bohrer, G.; Lafleur, P.M.; Peichl, M.; Gonsamo, A.; *et al.* Land surface phenology derived from normalized difference vegetation index (NDVI) at global FLUXNET sites. *Agric. For. Meteorol.* **2017**, *233*, 171–182.
 35. Hou, X.; Gao, S.; Niu, Z.; Xu, Z. Extracting grassland vegetation phenology in North China based on cumulative SPOT-VEGETATION NDVI data. *Int. J. Remote Sens.* **2014**, *35*, 3316–3330.
 36. Wang, C.; Li, J.; Liu, Q.; Zhong, B.; Wu, S.; Xia, C. Analysis of Differences in Phenology Extracted from the Enhanced Vegetation Index and the Leaf Area Index. *Sensors* **2017**, *17*.
 37. Cao, R.; Chen, J.; Shen, M.; Tang, Y. An improved logistic method for detecting spring vegetation phenology in grasslands from MODIS EVI time-series data. *Agric. For. Meteorol.* **2015**, *200*, 9–20.
 38. Ahl, D.E.; Gower, S.T.; Burrows, S.N.; Shabanov, N. V; Myneni, R.B.; Knyazikhin, Y. Monitoring spring canopy phenology of a deciduous broadleaf forest using MODIS. *Remote Sens. Environ.* **2006**, *104*, 88–95.
 39. Testa, S.; Soudani, K.; Boschetti, L.; Borgogno Mondino, E. MODIS-derived EVI, NDVI and WDRVI time series to estimate phenological metrics in French deciduous forests. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* **2018**, *64*, 132–144.
 40. Li, X.; Du, H.; Zhou, G.; Mao, F.; Zhang, M.; Han, N.; Fan, W.; Liu, H.; Huang, Z.; He, S.; *et al.* Phenology estimation of subtropical bamboo forests based on assimilated MODIS LAI time series data. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2021**, *173*, 262–277.
 41. Moon, M.; Seyednasrollah, B.; Richardson, A.D.; Friedl, M.A. Using time series of MODIS land surface phenology to model temperature and photoperiod controls on spring greenup in North American deciduous forests. *Remote Sens. Environ.* **2021**, *260*, 112466.
 42. Yang, Y.; Ren, W.; Tao, B.; Ji, L.; Liang, L.; Ruane, A.C.; Fisher, J.B.; Liu, J.; Sama, M.; Li, Z.; *et al.* Characterizing spatiotemporal patterns of crop phenology across North America during 2000–2016 using satellite imagery and agricultural survey data. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2020**, *170*, 156–173.
 43. Choudhary, K.; Shi, W.; Boori, M.S.; Corgne, S. Agriculture Phenology Monitoring Using NDVI Time Series Based on Remote Sensing Satellites: A Case Study of Guangdong, China. *Opt. Mem. Neural Networks* **2019**, *28*, 204–214.
 44. Liang, L.; Zhao, S.; Qin, Z.; He, K.; Chen, C.; Luo, Y.; Zhou, X. Drought Change Trend Using MODIS TVDI and Its Relationship with Climate Factors in China from 2001 to 2010. *J. Integr. Agric.* **2014**, *13*, 1501–1508.

45. Klisch, A.; Atzberger, C. Operational Drought Monitoring in Kenya Using MODIS NDVI Time Series. *Remote Sens.* **2016**, *8*.
46. Li, R.; Xu, M.; Chen, Z.; Gao, B.; Cai, J.; Shen, F.; He, X.; Zhuang, Y.; Chen, D. Phenology-based classification of crop species and rotation types using fused MODIS and Landsat data: The comparison of a random-forest-based model and a decision-rule-based model. *Soil Tillage Res.* **2021**, *206*, 104838.
47. Liu, Q.; Piao, S.; Janssens, I.A.; Fu, Y.; Peng, S.; Lian, X.; Ciais, P.; Myneni, R.B.; Peñuelas, J.; Wang, T. Extension of the growing season increases vegetation exposure to frost. *Nat. Commun.* **2018**, *9*, 426.
48. Zheng, Y.; Wu, B.; Zhang, M.; Zeng, H. Crop Phenology Detection Using High Spatio-Temporal Resolution Data Fused from SPOT5 and MODIS Products. *Sensors* **2016**, *16*.
49. Atkinson, P.M.; Jeganathan, C.; Dash, J.; Atzberger, C. Inter-comparison of four models for smoothing satellite sensor time-series data to estimate vegetation phenology. *Remote Sens. Environ.* **2012**, *123*, 400–417.
50. Julien, Y.; Sobrino, J.A. Comparison of cloud-reconstruction methods for time series of composite NDVI data. *Remote Sens. Environ.* **2010**, *114*, 618–625.
51. Jin, Z.; Xu, B. A Novel Compound Smoother—RMMEH to Reconstruct MODIS NDVI Time Series. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* **2013**, *10*, 942–946.
52. Elmore, A.J.; Guinn, S.M.; Minsley, B.J.; Richardson, A.D. Landscape controls on the timing of spring, autumn, and growing season length in mid-Atlantic forests. *Glob. Chang. Biol.* **2012**, *18*, 656–674.
53. Jönsson, P.; Cai, Z.; Melaas, E.; Friedl, M.A.; Eklundh, L. A Method for Robust Estimation of Vegetation Seasonality from Landsat and Sentinel-2 Time Series Data. *Remote Sens.* **2018**, *10*.
54. Zhang, G.P.; Qi, M. Neural network forecasting for seasonal and trend time series. *Eur. J. Oper. Res.* **2005**, *160*, 501–514.
55. Hijmans, R.J.; Cameron, S.E.; Parra, J.L.; Jones, P.G.; Jarvis, A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* **2005**, *25*, 1965–1978.
56. Dietl, W.; Fernandez, F.; Venegas, C. *Manejo sostenible de Praderas: su flora y vegetación*; Instituto de Investigaciones Agropecuarias: Santiago de Chile, Chile, 2009;
57. Didan, K. MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250 m SIN Grid V006. Technical Report, NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Available online: <http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.006> (accessed on Sep 30, 2021).
58. Abatzoglou, J.T.; Dobrowski, S.Z.; Parks, S.A.; Hegewisch, K.C. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Sci. Data* **2018**, *5*, 170191.
59. Corporación Nacional Forestal Sistema de Información Territorial CONAF Available online: <http://sit.conaf.cl/> (accessed on Dec 7, 2021).
60. Gu, Z.; Duan, X.; Shi, Y.; Li, Y.; Pan, X. Spatiotemporal variation in vegetation coverage and its response to climatic factors in the Red River Basin, China. *Ecol.*

- Indic.* **2018**, *93*, 54–64.
61. Chen, J.; Jönsson, P.; Tamura, M.; Gu, Z.; Matsushita, B.; Eklundh, L. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky–Golay filter. *Remote Sens. Environ.* **2004**, *91*, 332–344.
 62. Cong, N.; Piao, S.; Chen, A.; Wang, X.; Lin, X.; Chen, S.; Han, S.; Zhou, G.; Zhang, X. Spring vegetation green-up date in China inferred from SPOT NDVI data: A multiple model analysis. *Agric. For. Meteorol.* **2012**, *165*, 104–113.
 63. Zhou, D.; Zhao, S.; Zhang, L.; Liu, S. Remotely sensed assessment of urbanization effects on vegetation phenology in China's 32 major cities. *Remote Sens. Environ.* **2016**, *176*, 272–281.
 64. Riley, J.L.; Green, S.E.; Brodribb, K.E. *A conservation blueprint for Canada's prairies and parklands*; Nature Conservancy of Canada, 2007; ISBN 1897386133.
 65. Tian, F.; Fensholt, R.; Verbesselt, J.; Grogan, K.; Horion, S.; Wang, Y. Evaluating temporal consistency of long-term global NDVI datasets for trend analysis. *Remote Sens. Environ.* **2015**, *163*, 326–340.
 66. Fensholt, R.; Rasmussen, K.; Nielsen, T.T.; Mbow, C. Evaluation of earth observation based long term vegetation trends — Intercomparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRR GIMMS, Terra MODIS and SPOT VGT data. *Remote Sens. Environ.* **2009**, *113*, 1886–1898.
 67. Anderson, L.O.; Malhi, Y.; Aragão, L.E.O.C.; Ladle, R.; Arai, E.; Barbier, N.; Phillips, O. Remote sensing detection of droughts in Amazonian forest canopies. *New Phytol.* **2010**, *187*, 733–750.
 68. Chen, T.; de Jeu, R.A.M.; Liu, Y.Y.; van der Werf, G.R.; Dolman, A.J. Using satellite based soil moisture to quantify the water driven variability in NDVI: A case study over mainland Australia. *Remote Sens. Environ.* **2014**, *140*, 330–338.
 69. Zoungrana, B.J.-B.; Conrad, C.; Amekudzi, L.K.; Thiel, M.; Da, E.D. Land Use/Cover Response to Rainfall Variability: A Comparing Analysis between NDVI and EVI in the Southwest of Burkina Faso. *Clim.* **2015**, *3*.
 70. Cleland, E.E.; Chuine, I.; Menzel, A.; Mooney, H.A.; Schwartz, M.D. Shifting plant phenology in response to global change. *Trends Ecol. Evol.* **2007**, *22*, 357–365.
 71. Vitasse, Y.; Delzon, S.; Dufrêne, E.; Pontaillet, J.-Y.; Louvet, J.-M.; Kremer, A.; Michalet, R. Leaf phenology sensitivity to temperature in European trees: Do within-species populations exhibit similar responses? *Agric. For. Meteorol.* **2009**, *149*, 735–744.
 72. Pudas, E.; Leppälä, M.; Tolvanen, A.; Poikolainen, J.; Venäläinen, A.; Kubin, E. Trends in phenology of *Betula pubescens* across the boreal zone in Finland. *Int. J. Biometeorol.* **2008**, *52*, 251–259.
 73. Nordli, Ø.; Wielgolaski, F.E.; Bakken, A.K.; Hjeltnes, S.H.; Måge, F.; Sivle, A.; Skre, O. Regional trends for bud burst and flowering of woody plants in Norway as related to climate change. *Int. J. Biometeorol.* **2008**, *52*, 625–639.
 74. Shutova, E.; Wielgolaski, F.E.; Karlsen, S.R.; Makarova, O.; Berlina, N.; Filimonova, T.; Haraldsson, E.; Aspholm, P.E.; Flø, L.; Høgda, K.A. Growing seasons of Nordic mountain birch in northernmost Europe as indicated by long-

- term field studies and analyses of satellite images. *Int. J. Biometeorol.* **2006**, *51*, 155–166.
75. Høye, T.T.; Mølgaard Ellebjerg, S.; Philipp, M. The Impact of Climate on Flowering in the High Arctic—The Case of *Dryas* in a Hybrid Zone. *Arctic, Antarct. Alp. Res.* **2007**, *39*, 412–421.
 76. Arft, A.M.; Walker, M.D.; Gurevitch, J.; Alatalo, J.M.; Bret-Harte, M.S.; Dale, M.; Diemer, M.; Gugerli, F.; Henry, G.H.R.; Jones, M.H. Responses of tundra plants to experimental warming: meta-analysis of the international tundra experiment. *Ecol. Monogr.* **1999**, *69*, 491–511.
 77. Pérez, A.J.; López, F.; Benlloch, J. V; Christensen, S. Colour and shape analysis techniques for weed detection in cereal fields. *Comput. Electron. Agric.* **2000**, *25*, 197–212.
 78. Peñuelas, J.; Filella, I.; Comas, P. Changed plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean region. *Glob. Chang. Biol.* **2002**, *8*, 531–544.
 79. Gordo, O.; Sanz, J.J. Impact of climate change on plant phenology in Mediterranean ecosystems. *Glob. Chang. Biol.* **2010**, *16*, 1082–1106.
 80. Bowers, J.E. HAS CLIMATIC WARMING ALTERED SPRING FLOWERING DATE OF SONORAN DESERT SHRUBS? *Southwest. Nat.* **2007**, *52*, 347–355.
 81. Nemani, R.R.; Keeling, C.D.; Hashimoto, H.; Jolly, W.M.; Piper, S.C.; Tucker, C.J.; Myneni, R.B.; Running, S.W. Climate-Driven Increases in Global Terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999. *Science* **2003**, *300*, 1560–1563. [Google Scholar] [CrossRef]
 82. Tucker, C.J.; Slayback, D.A.; Pinzon, J.E.; Los, S.O.; Myneni, R.B.; Taylor, M.G. Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999. *Int. J. Biometeorol.* **2001**, *45*, 184–190.
 83. Yu, H.; Xu, J.; Okuto, E.; Luedeling, E. Seasonal Response of Grasslands to Climate Change on the Tibetan Plateau. *PLoS One* **2012**, *7*, e49230.
 84. Muck, P.; Jadrijevic, M.; Santis, G. *Plan de adaptación al cambio climático del sector silvoagropecuario*; Santiado (Chile), 2013;
 85. Paepe, R.; Fairbridge, R.W.; Jelgersma, S. *Greenhouse effect, sea level and drought*; Springer Science & Business Media, 2012; Vol. 325;
 86. Poorter, H.; Navas, M.-L. Plant growth and competition at elevated CO₂: on winners, losers and functional groups. *New Phytol.* **2003**, *157*, 175–198.
 87. Cure, J.D.; Acock, B. Crop responses to carbon dioxide doubling: a literature survey. *Agric. For. Meteorol.* **1986**, *38*, 127–145.
 88. Morgan, J.A.; Pataki, D.E.; Körner, C.; Clark, H.; Del Grosso, S.J.; Grünzweig, J.M.; Knapp, A.K.; Mosier, A.R.; Newton, P.C.D.; Niklaus, P.A. Water relations in grassland and desert ecosystems exposed to elevated atmospheric CO₂. *Oecologia* **2004**, *140*, 11–25.
 89. Linderholm, H.W. Growing season changes in the last century. *Agric. For. Meteorol.* **2006**, *137*, 1–14.
 90. Rosenzweig, C.; Karoly, D.; Vicarelli, M.; Neofotis, P.; Wu, Q.; Casassa, G.;

- Menzel, A.; Root, T.L.; Estrella, N.; Seguin, B.; *et al.* Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change. *Nature* **2008**, *453*, 353–357.
91. Ritson, J.P.; Graham, N.J.D.; Templeton, M.R.; Clark, J.M.; Gough, R.; Freeman, C. The impact of climate change on the treatability of dissolved organic matter (DOM) in upland water supplies: A UK perspective. *Sci. Total Environ.* **2014**, *473–474*, 714–730.
92. Hobæk, A.; LØVIK, J.E.; Rohrlack, T.; Moe, S.J.; Grung, M.; Bennion, H.; Clarke, G.; Piliposyan, G.T. Eutrophication, recovery and temperature in Lake Mjøsa: detecting trends with monitoring data and sediment records. *Freshw. Biol.* **2012**, *57*, 1998–2014.
93. Ockenden, M.C.; Deasy, C.E.; Benskin, C.M.H.; Beven, K.J.; Burke, S.; Collins, A.L.; Evans, R.; Falloon, P.D.; Forber, K.J.; Hiscock, K.M.; *et al.* Changing climate and nutrient transfers: Evidence from high temporal resolution concentration-flow dynamics in headwater catchments. *Sci. Total Environ.* **2016**, *548–549*, 325–339.
94. Yuan, Y.; Zhang, C.; Zeng, G.; Liang, J.; Guo, S.; Huang, L.; Wu, H.; Hua, S. Quantitative assessment of the contribution of climate variability and human activity to streamflow alteration in Dongting Lake, China. *Hydrol. Processes.* **2016**, *30*, 1929–1939.
95. Lychagin, M.; Chalov, S.; Kasimov, N.; Shinkareva, G.; Jarsjö, J.; Thorslund, J. Surface water pathways and fluxes of metals under changing environmental conditions and human interventions in the Selenga River system. *Environ. Earth Sci.* **2016**, *76*, 1.
96. Chen, M.; Qin, X.; Zeng, G.; Li, J. Impacts of human activity modes and climate on heavy metal “spread” in groundwater are biased. *Chemosphere* **2016**, *152*, 439–445.
97. Dazy, M.; Béraud, E.; Cotellet, S.; Gréville, F.; Féraud, J.-F.; Masfarau, J.-F. Changes in plant communities along soil pollution gradients: Responses of leaf antioxidant enzyme activities and phytochelatin contents. *Chemosphere* **2009**, *77*, 376–383.
98. Nechita, C.; Iordache, A.M.; Lemr, K.; Levanič, T.; Pluhacek, T. Evidence of declining trees resilience under long term heavy metal stress combined with climate change heating. *J. Clean. Prod.* **2021**, *317*, 128428.
99. Fang, A.; Bao, M.; Chen, W.; Dong, J. Assessment of Surface Ecological Quality of Grassland Mining Area and Identification of Its Impact Range. *Nat. Resour. Res.* **2021**, *30*, 3819–3837.
100. Das, P.; Samantaray, S.; Rout, G.R. Studies on cadmium toxicity in plants: A review. *Environ. Pollut.* **1997**, *98*, 29–36.
101. Singh, R.; Jwa, N.-S. Understanding the Responses of Rice to Environmental Stress Using Proteomics. *J. Proteome Res.* **2013**, *12*, 4652–4669.
102. Sanchez-Hernandez, J.C.; Fossi, M.C.; Leonzio, C.; Focardi, S.; Barra, R.; Gavilan, J.F.; Parra, O. Use of biochemical biomarkers as a screening tool to focus the chemical monitoring of organic pollutants in the Bío Bío river basin (Chile). *Chemosphere* **1998**, *37*, 699–710.

103. Rodríguez-Oroz, D.; Vidal, R.; Fernandoy, F.; Lambert, F.; Quiero, F. Metal concentrations and source identification in Chilean public children's playgrounds. *Environ. Monit. Assess.* **2018**, *190*, 703.
104. Alonso, Á.; Figueroa, R.; Castro-Díez, P. Pollution assessment of the Biobío River (Chile): Prioritization of substances of concern under an ecotoxicological approach. *Environ. Manage.* **2017**, *59*, 856–869.
105. Bravo-Linares, C.; Schuller, P.; Castillo, A.; Salinas-Curinao, A.; Ovando-Fuentealba, L.; Muñoz-Arcos, E.; Swales, A.; Gibbs, M.; Dercon, G. Combining Isotopic Techniques to Assess Historical Sediment Delivery in a Forest Catchment in Central Chile. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* **2020**, *20*, 83–94.
106. United Nations *United Nations Framework Convention on Climate Change*, New York, NY, USA, 1992;

CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES FINALES

Considerando el objetivo y el desarrollo de los estudios realizados en esta tesis, que contemplan la problemática ambiental existente, la complejidad y relevancia de la evaluación de praderas, además de los importantes cambios tecnológicos que se han generado a nivel de mejoramiento genético del material forrajero y de las herramientas de teledetección, se puede comentar lo siguiente:

1. Considerando lo complejo y difícil que puede llegar a resultar realizar la evaluación de praderas de manera tradicional, este procedimiento, es una herramienta que no puede dejar de ser considerada para validar nuevos materiales forrajeros y su adaptabilidad al ambiente. Sí se opta por usar este tipo de evaluación, se debe tener en cuenta sus limitaciones de uso, donde una de las más relevantes (sin considerar sus altos costos y requerimientos de mano de obra) es que sus resultados se limitan a un lugar específico, por lo que muchas veces no pueden ser extrapolados a otras realidades ambientales, aun cuando son altamente confiables. Esta limitación de uso adquiere mucha relevancia considerando que los cambios ambientales pueden afectar de distinta maneras las áreas de un territorio.

2. Si bien es cierto que los cambios ambientales en términos de temperatura y precipitaciones se han evidenciado desde hace un tiempo, es necesario ir validando su efecto en los materiales forrajeros, dado que la respuesta productiva de estos materiales puede diferir entre zonas de un área geográfica definida. En este contexto se demostró que, para la zona Centro Sur de Chile, las recomendaciones tradicionales del uso recursos

forrajeros (por su capacidad de adaptación al clima) ha cambiado, siendo posible ahora recomendar el uso de materiales que históricamente se sugerían para zona central. El uso de estos materiales no se sugería en la zona centro sur, dado que habitualmente no se contaba con un régimen térmico adecuado, pero los hallazgos de esta investigación (Capítulo 2) indican que esto ha cambiado. Los resultados encontrados sugieren que el germoplasma forrajero se adapta a nuevas áreas geográficas, lo que hace necesario sugerir que se desarrollen planes de validación para su uso actual en las zonas de importancia ganadera.

3. Otro aspecto a considerar y que contribuye de manera importante en el proceso de adaptación antes mencionado, es el avance generado en términos de mejoramiento genético del germoplasma forrajero, en el que se reconocen mejoras significativas en productividad, calidad como alimento para el ganado y persistencia al formar praderas (adaptación). En este estudio se pudo evaluar algunos de estos atributos. Un ejemplo de lo anterior es lo expuesto en el capítulo 3 de esta tesis, donde los resultados sugieren que en los germoplasmas forrajeros mejorados presentan un mejor comportamiento que sus precursores.

4. Por último, en el contexto de cambio climático y reconociendo las limitantes espaciales y de manejo que tiene la evaluación tradicional de praderas, se requiere disponer de herramientas que permitan comprender de mejor manera y a mayor escala territorial, los impactos de los cambios ambientales en la vegetación existente. En este contexto, se plantea que utilizando como insumo imágenes satelitales y bases de datos climáticas de uso público, se pueden generar herramientas de monitoreo de la vegetación a través de la de teledetección, lo cual surge como una técnica de mucha utilidad para evidenciar cambios vegetacionales a escala de grandes zonas homogéneas, resultando relevante para la toma de decisiones y el desarrollo de políticas para el manejo y protección de la vegetación en el marco del cambio climático.