



Universidad Austral de Chile

Escuela de Agronomía

**Efecto del cambio de manejo en la recuperación
de suelo y pradera en sitios de la precordillera
andina de la Araucanía según su estado,
condición y tendencia.**

Memoria presentada como parte de
los requisitos para optar al título de
Ingeniero Agrónomo

Michelle Chauveau Gerber

Valdivia – Chile

2010

PROFESOR PATROCINANTE:

José Dörner Fernández
Ingeniero Agrónomo, Dr. sc. agr.
Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos

PROFESOR COPATROCINANTE:

Juan Gastó Coderch
Ingeniero Agrónomo, Ph. D.
Departamento de Ciencias Animales PUC

PROFESOR INFORMANTE:

Ignacio López Campbell
Ingeniero Agrónomo, Ph. D.
Instituto de Producción Animal

Agradecimientos

Me gustaría comenzar agradeciendo de todo corazón a mis padres Ingrid y Jean Claude por su confianza y constante apoyo, sin el cual no podría jamás haber logrado este cometido, gracias.

Gracias a ti Felipe por haberme acompañado y ayudado en éste y todos mi proyectos, gracias por estar siempre ahí, acogiéndome, alentándome y consolándome todas las veces que lo necesité, gracias por compartir conmigo tu inagotable bondad y cariño, gracias por ser así conmigo y con Ignacia, gracias.

Gracias a mis amigos, Nanda, Kata, Pancha, Pato, Pao, Diego, Mauro, Dani V. ,Jose , Ignacio, Karen, Cotita, Ceci, Rodri y tantos más, por compartir todos estos años conmigo, ser mis compañeros y amigos, ayudarme cuando lo necesité, darme palabras de aliento cuando me hicieron falta y por supuesto todas esas conversaciones decisivas para el logro de esta tesis, gracias.

Gracias a mis profesores, gracias a José y Dorota por introducirme en el fascinante mundo de la física de suelos a pesar de mi falta de preparación, gracias a Don Juan por compartir conmigo algo de su tremenda sabiduría, y gracias a Ignacio por creer en mi y acompañarme en mis proyectos, gracias.

Gracias Señora Marta por su constante aliento, por su fundamental ayuda y apoyo y sobretodo por su invaluable compañía, gracias Paty R. por tu guía y amistad, gracias a todo el personal del Instituto de Ingeniería Agraria y suelos, Sra. Marianela, Claudia, Don Osvaldo, Mary, Sra. Marta, Sra. Lore, Don Raúl, por ayudarme y asistirme todas esas veces que lo necesité y sobretodo por acogerme en su instituto, gracias.

Y por último, quiero agradecerte a ti Ignacia, mi niña preciosa, por acompañarme y compartir conmigo alegrías y pesares todos estos años de universidad, que además fueron tus primeros años de vida, sin ti nada de esto habría sido posible. Gracias a ti, soy una mejor persona y soy más feliz que nunca, gracias.

A mi hija... ..

*“Detrás de los secretos de la naturaleza
permanece oculto algo sutil, intangible e
inexplicable. Venerar esta fuerza que está más
allá de lo que podemos comprender es mi
religión”*

Albert Einstein.

INDICE DE MATERIAS

Capítulo		Página
	RESUMEN	1
	SUMMARY	3
1	INTRODUCCIÓN	4
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	Clasificación y uso de los suelos	6
2.2	Estilos de agricultura	7
2.3	Praderas	8
2.3.1	Condición	9
2.3.2	Tendencia	11
2.3.3	Sucesión ecológica y composición botánica	11
2.4	Suelo	12
2.4.1	Estado y cambio de estado	13
2.4.1.1	Efecto del manejo y uso del suelo en sus propiedades físicas	14
2.4.1.2	Efecto del pastoreo en las propiedades físicas de los suelos	15
2.4.1.3	Efecto de la calidad del suelo sobre la pradera	16
2.4.2	Recuperación y resiliencia del suelo	17

2.4.3	Materia orgánica y microorganismos	19
2.5	Historia del territorio	20
2.5.1	Floreo de la <i>silva</i> . Inicio de la apertura horizontal	21
2.5.2	Destrucción de la <i>silva</i> , apertura de la frontera horizontal	22
2.5.3	Preparación del terreno. Cultivos agrícolas y pradera	22
2.5.4	Sitios de alta receptividad tecnológica. Aumento progresivo del input tecnológico para mantener los niveles de cosecha	23
2.5.5	Agotamiento de los recursos. Subsidio estatal para los recursos forestales	24
3	MATERIAL Y METODOS	25
3.1	Material	25
3.1.1	Territorio y suelos analizados	25
3.1.1.1	Antecedentes prediales	25
3.1.1.1.1	Ubicación	26
3.1.1.1.2	Clima	27
3.1.1.2	Geomorfología y suelos	27
3.1.2	Historial de manejo	28
3.1.3	Material de terreno y laboratorio	31
3.2	Método	31
3.2.1	Ensayos de campo	32

3.2.2	Recolección de muestras	32
3.2.2.1	Suelo	32
3.2.2.2	Pradera	33
3.2.3	Análisis de suelo en laboratorio	33
3.2.3.1	Análisis químicos	34
3.2.3.1.1	Determinación de N-mineral	34
3.2.3.1.2	Determinación de P-Olsen	34
3.2.3.1.3	Determinación de Al extractable	34
3.2.3.1.4	Determinación de pH	34
3.2.3.1.5	Determinación de alofán	34
3.2.3.2	Análisis físicos	35
3.2.3.2.1	Materia orgánica	35
3.2.3.2.2	Textura	35
3.2.3.2.3	Densidad real	36
3.2.3.2.4	Determinación de la curva de retención de agua	36
3.2.3.2.5	Determinación de la capacidad de soporte	36
3.2.3.2.6	Conductividad de aire (KI)	38
3.2.3.2.7	Resiliencia funcional	39
3.2.3.2.8	Densidad aparente	39
3.2.3.3	Determinación de la resistencia mecánica de los agregados	40

3.2.3.3.1	Tratamiento de los agregados	40
3.2.3.3.2	Diámetro medio	40
3.2.3.3.3	Crushing test	40
3.2.3.3.4	Densidad aparente	42
3.2.4	Análisis muestras de pradera	42
3.3	Diseño experimental y análisis estadístico	42
4	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	44
4.1	Suelos y su manejo	44
4.1.1	Efecto del manejo del suelo sobre algunas de sus variables químicas	44
4.1.2	Efecto del manejo del suelo sobre sus propiedades físicas	45
4.1.2.1	Textura del suelo	45
4.1.2.2	Resistencia a la penetración	46
4.1.2.3	Cantidad y distribución del volumen de poros	47
4.1.2.4	Capacidad de soporte	49
4.1.2.5	Densidad aparente (Da) antes y después del ensayo de consolidación	51
4.1.2.6	Conductividad de aire (KI) antes y después del ensayo de consolidación	53
4.1.2.7	Coeficientes de extensividad lineal y resiliencia mecánica	54
4.1.2.8	Resiliencia funcional	55

4.1.2.9	Densidad aparente y resistencia de los agregados	57
4.1.3	Análisis de componentes principales (ACP) para características físicas y químicas de los suelos estudiados (PD, PM y B)	60
4.2	Análisis de praderas	62
4.2.1	Composición botánica	64
4.2.2	Relación entre la composición botánica de las praderas y las propiedades físico-químicas de los suelos analizados.	67
4.3	Efecto del tiempo sobre la modificación de las propiedades físicas del suelo	69
5	CONCLUSIONES	71
6	BIBLIOGRAFÍA	72
7	ANEXOS	81

INDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Funciones del suelo que pueden ser alteradas por la compactación	14
2	Factores que afectan la resiliencia de los suelos	19
3	Encuadre predial	25
4	Tipos de cobertura vegetal en el año 2003, según superficie y porcentaje	29
5	Tipos de cobertura vegetal en 2008, según superficie y porcentaje	30
6	Cambio de tipo de cobertura de Hueñivales entre el año 2003 y 2008	30
7	Distribución muestreo análisis físicos de suelo	33
8	Propiedades químicas del suelo según manejo	44
9	Distribución textural del suelo analizado	45
10	Grupo de especies determinadas por el análisis de conglomerados	63

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Distribución mensual de materia seca de una pradera naturalizada fertilizada. Ton MS/ha precordillera andina de IX región. Cunco	8
2	Porcentaje de composición botánica de los diversos grupos de organismos de acuerdo a la condición de la pradera	9
3	Primera etapa de la expansión de la frontera horizontal	21
4	Segunda etapa de la expansión de la frontera horizontal	22
5	Tercera etapa de la expansión de la frontera horizontal	22
6	Sitios de baja receptividad tecnológica. La biocenosis se degrada progresivamente y el biotopo se destruye	23
7	Cuarta etapa (b) de la expansión de la frontera horizontal	24
8	Quinta etapa de la expansión de la frontera horizontal	24
9	Cuenca río Imperial y sus afluentes	26
10	Vías de acceso al predio Hueñivales	26
11	Malla puntos de presión a medir con penetrómetro	32
12	Esquema celda odómetro	37
13	Curva de Consolidación	38
14	Esquema del instrumento para realizar el “crushing test”	41

15	Efecto del manejo del suelo sobre la resistencia a la penetración	46
16	Distribución del volumen de poros de drenaje rápido (PDR) y poros de drenaje lento (PDL) según tratamiento	48
17	Efecto del manejo del suelo sobre su capacidad de soporte (CS)	50
18	Densidad aparente (D_a) para cada tratamiento antes y después del ensayo de consolidación	52
19	Conductividad de aire para cada tratamiento antes (K_l a/C) y después (K_l d/C) del ensayo de consolidación	53
20	Coeficientes de extensividad lineal de compresión ($COEL_c$) y de descompresión ($COEL_d$)	55
21	Comparación de la resiliencia funcional (K_a d/C / K_a a/C) de los suelos entre tratamientos	56
22	Relación entre la resiliencia funcional de los suelos y su contenido de alofán y SOC	57
23	Comparación de la densidad aparente de los agregados y del suelo para cada tratamiento	58
24	Comparación de la resistencia de los agregados (R_{Ag}) por tratamiento	59
25	Análisis de componentes principales para los aspectos físicos y químicos de los suelos analizados	60
26	Análisis de componentes principales de los suelos en estudio pradera degradada (PD), pradera mejorada (PM) y bosque (B)	61
27	Análisis de conglomerado para las especies presentes en las praderas analizadas	63

28	Análisis de componentes principales para los grupos de especies botánicas encontradas	65
29	Análisis de componentes principales para PD y PM y su relación con los grupos de especies botánicas que las componen	66
30	Análisis de componentes principales para variables de suelo y pradera	67
31	Relación entre las variables físicas y químicas del suelo con la composición botánica de las praderas	68

INDICE DE ANEXOS

Anexo		Página
1	Localización de Hueñivales en el mapa (IGM) y en la ortofoto	81
2	Delimitación Hueñivales en fotografía aérea	82
3	Coefficientes de varianza para análisis estadísticos ACP	83

RESUMEN

Con el objetivo de evaluar el efecto del cambio de manejo en la recuperación de suelo y pradera en sitios de la precordillera andina de la Araucanía, se planteó la hipótesis que señala que es posible promover el cambio de estado positivo de un suelo degradado a través de su uso apropiado y con un estilo de agricultura sustentable, permitiendo así su recuperación, expresada a través de atributos físicos y por la progresión de la pradera y sus componentes. Para corroborar o rechazar dicha afirmación, se recolectaron muestras no disturbadas de suelo en un sitio bajo bosque (B), usado como sitio de referencia, y en dos sitios bajo praderas sometidas a distinto manejo de pastoreo en los últimos 6 años (PD y PM). Todas las muestras se recolectaron a 5 cm de profundidad y a partir de ellas se determinaron algunas propiedades físicas de los suelos como: capacidad de soporte (CS), curva de retención de agua (pF), densidad aparente (Da), permeabilidad de aire (KI) y se estimó la resiliencia mecánica y funcional del suelo. En terreno se evaluó la resistencia a la penetración (RP). Adicionalmente se colectaron: muestras disturbadas para determinar textura, aluminio extractable, contenido de alofán, materia orgánica, densidad real y algunas propiedades químicas de fertilidad del suelo, y agregados, para determinar densidad de agregados (Da Ag) y resistencia de agregados (R Ag). Para evaluar la progresión de la pradera y sus componentes debido al cambio de manejo y su relación con los atributos del suelo, se colectaron muestras de ambas praderas sobre las cuales se determinó la composición botánica y producción de materia seca por superficie. Los resultados fueron analizados estadísticamente a través de ANDEVA y test de LSD para la diferenciación de medias. Las relaciones entre las variables del suelo y los grupos de especies se exploraron aplicando el análisis de componentes principales (ACP).

Los sitios bajo pradera tienden a exhibir una mayor capacidad de soporte, resistencia a la penetración y densidad aparente, y una disminución en su porosidad gruesa y su permeabilidad de aire al ser comparadas con el sitio bajo bosque, lo que refleja las diferencias estructurales de los suelos al ser sometidos a distintos usos. Si bien no se

presentaron diferencias estadísticamente significativas en la mayoría de los análisis físicos realizados a los suelos bajo pradera, en todos los casos se observa la tendencia de una mejora de PM al compararla con PD debido al cambio de manejo en el pastoreo. Sin embargo, se espera que al transcurrir un lapso de tiempo mayor, estas diferencias se acentúen. Bajo estas condiciones, aumenta la resistencia del suelo ante la penetración de las raíces a través de su perfil, acompañado de una reducción en su capacidad de conducir agua y aire disminuyendo el rendimiento del forraje y la abundancia de especies forrajeras más nobles.

SUMMARY

In order to evaluate the effect of a change in agricultural management on the recovery of soil and pastures near the Andean mountains in the Araucanía region is hypothesized that, it is possible to promote a positive change of a degraded soil across its appropriate use and with a sustainable agricultural style, allowing its recovery expressed across physical attributes and the progression of the pasture and his components. To confirm or reject this assertion, undisturbed soil samples were collected, at 5 cm deep, under forest (B) and grasslands (PD and PM) submitted to different shepherding management during 6 years. Measurements of bearing capacity (CS), water retention curve (pF), bulk density (Da), air conductivity (KI), functional resilience and mechanical resilience were made. Penetration resistance (RP) was also assessed. Additionally, disturbed samples were collected to determine: texture, extractable aluminum, allophane content, organic matter, particles density and some soil chemical properties, and aggregates, to determine their bulk density (Da Ag) and resistance (R Ag). To evaluate the pasture progression due to the management change and its relation with soil attributes, pastures samples were collected, botanical composition and dry matter production were assessed. These results were statistically analyzed with ANOVA and LSD's test. Relations between soil variables and botanical groups species were explored applying principal components analysis (PCA).

Grassland sites showed a strong degradation of their structural properties and tend to exhibit grater bearing capacity, penetration resistance and bulk density, and a decrease in coarse pore volume and air permeability as compared with the forest site. Although no statistically significant differences were found between soil physical analyses, in all cases is observed the trend of PM's improvement as compared with PD due to management change. Nevertheless, it is expected that, in time, these differences become stronger. Under these conditions, roots penetration capacity and air and water conductivity diminishes, reducing forage yield and nobles species abundance.

1 INTRODUCCIÓN

Las ciencias silvoagropecuarias persiguen como meta la optimización de la arquitectura y funcionamiento de los sistemas ecológicos, con el fin de obtener una cosecha sostenida de los recursos que la naturaleza entrega. Cada ecosistema tiene su propia capacidad productiva y de uso, la cual está dada por sus características edáficas, climáticas y topográficas.

Los ecosistemas naturales son frecuentemente el residuo que resulta luego de la cosecha, a menudo descontrolada, del ecosistema original. Si el uso que se le da al territorio no es el adecuado, luego de un periodo prolongado de explotación, la resultante puede ser la retrogradación del ecosistema natural y su transformación a estados inferiores.

El uso inadecuado del territorio deriva en el deterioro de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, y en la reducción de la productividad de los ecosistemas como consecuencia del impacto de diversas actividades antrópicas. La pérdida paulatina de la cobertura vegetal, de la materia orgánica y la fertilidad natural del suelo implica una severa reducción en su capacidad productiva y un incremento en la erodabilidad.

Cualquier cambio que se le haga al manejo o estructura del sistema, modifica holocenóticamente su funcionamiento y se traduce finalmente en un aumento o reducción de la productividad. Mediante un uso adecuado del territorio y un estilo de agricultura sustentable, se puede, no sólo prevenir que los ecosistemas se degraden, sino también, recuperar algunos de los ecosistemas ya degradados. El uso y el estilo son parte del “estar” de un ecosistema y corresponden al sistema ecológico, por lo que al modificar estas categorías se administra el sistema natural.

La factibilidad de recuperación de un ecosistema estará dada, entre otras cosas, por la capacidad que tenga el suelo que lo sostiene de recuperarse luego de sufrir alguna

perturbación o estrés. Dicha recuperación es una característica inherente del recurso y se denomina resiliencia. La resiliencia de un suelo depende de sus características intrínsecas y de la magnitud de las perturbaciones humanas, relacionándose directamente con la sostenibilidad del uso de los suelos.

Por otro lado, es posible definir el estado en que se encuentra un ecosistema dado, al determinar su condición, y saber si las medidas y acciones tomadas sobre el territorio son las adecuadas, definiendo la tendencia de la progresión ecológica de un territorio dado. Al referirse a las categorías de condición y tendencia, se evalúa como se ha actuado sobre el ecosistema, en relación a un patrón de estado óptimo y de dirección del cambio, respectivamente. Al mejorar la condición de un suelo, la tendencia del ecosistema es mejorante y tiende a la recuperación de sus componentes, así aumenta la productividad de las praderas y por ende, la producción animal.

La hipótesis que se plantea en el presente trabajo es la siguiente:

Es posible promover el cambio de estado positivo de un suelo degradado a través de su uso apropiado y con un estilo de agricultura sustentable, permitiendo así su recuperación, expresada a través de atributos físicos y por la progresión de la pradera y sus componentes.

El objetivo general de esta tesis fue:

Determinar si el suelo y la pradera en estudio, han sido capaces de recuperarse, en el corto plazo, debido a un cambio en su manejo.

Los objetivos específicos a lograr fueron:

- Evaluar la recuperación de atributos físicos de suelos degradados.
- Evaluar la resiliencia mecánica y funcional del suelo.
- Evaluar la progresión de la pradera y sus componentes.
- Evaluar la relación entre atributos edáficos y pratenses en condiciones de pradera y de manejo de suelo contrastantes.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Clasificación y uso de los suelos

Según el sistema de clasificación de ecorregiones propuesto por GASTÓ *et al.* (1993), el uso de los suelos corresponde a una categoría de estado y se determina de acuerdo al destino asignado por el usuario.

Por otro lado, se define clasificación de suelos como una categorización sistemática basada en características distintivas y criterios de uso. El “Sistema Completo de Clasificación de Suelos”, identifica 10 ordenes, 40 subórdenes, más de 100 grupos y cientos de series de suelos. Cada una de estos niveles de clasificación relaciona los suelos con su aptitud o capacidad para soportar diferentes tipos de usos (ALTIERI, 1994).

Los suelos también pueden clasificarse en base a su capacidad para sustentar actividades agropecuarias, así estos se dividen de acuerdo a sus potencialidades y limitaciones para la producción de cultivos en una zona determinada para mantener una vegetación permanente. Según estos criterios existen varias categorías de suelos arables (clases I - IV) y varias categorías de suelos no arables (clases V – VIII) (ALTIERI, 1994).

ALTIERI (1994) indica que en Chile la tierra arable representa cerca del 7% de la superficie total del país (75,5 millones de has). Según la clasificación de la capacidad de uso potencial de los suelos, éstas poseen diferentes tipos de suelos con variados grados de limitación para su manejo. Las clases I y II son aquellas que poseen un alto potencial productivo y con un riesgo relativamente bajo de degradación ambiental, estos suelos representan sólo un 0,12% y 0,94% del área total, respectivamente. Los suelos clases III y IV pueden ser utilizados para desarrollar actividades agrícolas pero con severas limitaciones, éstas alcanzan cerca del 6% de la superficie total de suelos. La superficie restante detenta un alto riesgo de degradación si no se manejan en forma adecuada.

La conversión de bosques a praderas es uno de los cambios del uso del suelo más dominante actualmente. La trayectoria que sufra el paisaje afectado va a depender tanto de la naturaleza del bosque original como del uso que se le vaya a dar al suelo.

El cambio de los bosques por ecosistemas antrópicamente manejados, implica la quema o remoción de la mayoría de la biomasa presente, lo que generalmente conlleva a grandes pérdidas de carbono, nitrógeno y otros elementos nutricionales del sistema (CHAPIN *et al.*, 2002).

El cambio en el uso de los suelos es la causa más importante del impacto ecológico del siglo XX, mayor que ningún otro cambio global. El cambio en el uso de los suelos continuará siendo la mayor causa de cambios ambientales globales de las próximas décadas (CHAPIN *et al.*, 2002).

2.2 Estilos de agricultura

El concepto de estilo de agricultura tiene como premisa básica que cualquiera que sea su ubicación en el tiempo y el espacio, la agricultura siempre contempla la movilización de recursos, con el fin de convertirlos en valores específicos. El estilo se refiere a la forma en la cual un productor estructura su predio, en cuanto a la organización del espacio y de la agricultura, simultáneo al establecimiento de relaciones con los mercados, la tecnología y los recursos naturales (VAN DER PLOEG, 1992).

Existen numerosos estilos en el contexto de la agricultura moderna, adaptados a situaciones diferentes y a las preferencias personales, como revolución verde, dehesas, ranchos, agricultura orgánica, invernaderos y muchos otros. Cada uno presenta necesidades de inputs diferentes, producen cantidades variables de outputs y de impactos ambientales. El nivel y tipo de input son algunos de los elementos que caracterizan los estilos de agricultura (GASTÓ *et al.*, 2002).

El estilo de agricultura a aplicar en cada ecosistema debe corresponder con sus limitantes y potencialidades, dadas por la arquitectura del sistema, así tenemos ecosistemas de alto o de bajo potencial. Tradicionalmente, la agricultura de bajo input ha estado relacionada con ecosistemas de bajo potencial, donde los inputs han sido bajos debido a que la receptividad tecnológica no es tan alta como la de los ecosistemas de alto potencial. Por otro lado, la agricultura moderna se desarrolla principalmente en ecosistemas de alto potencial, es intensiva en capital y altamente tecnificada. Se caracteriza por poseer un alto nivel de mecanización, grandes inputs de energía y por una fuerza laboral reducida y en declinación. El output, expresado en rendimiento por unidad de área, o en eficiencia de trabajo, sobrepasa los logros alcanzados a través de la historia (GASTÓ, *et al.* 2002).

El input, desde el exterior, de grandes cantidades de masa, energía o información (tecnología) puede producir rendimientos elevados, pero al mismo tiempo puede provocar una degradación de la arquitectura del ecosistema, no permitiendo una cosecha sostenida (NAVA *et al.*, 1996).

2.3 Praderas

El tipo de praderas presentes en la precordillera andina de la Región de la Araucanía se definen como praderas naturalizadas, ya que se encuentran constituidas por especies foráneas al ecosistema natural (DEMANENT y ROMERO, 1988).

En cuanto a la curva de producción de forraje en la precordillera andina de la Región de la Araucanía la mayor producción se logra a mediados de noviembre, desciende a fines del verano y repunta a principios de abril por efecto de las lluvias (Figura 1). Finalmente desciende bruscamente en los meses de mayo y junio periodo crítico y de bajas temperaturas (DEMANENT y ROMERO, 1988).

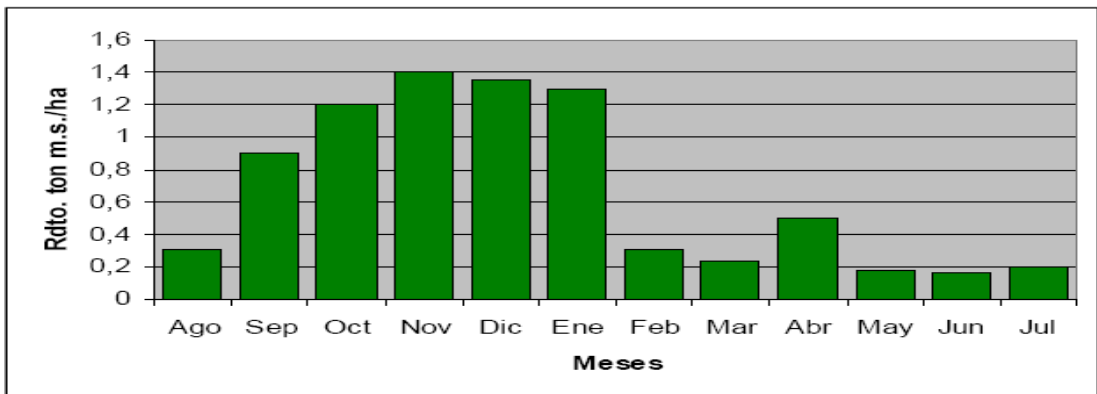


FIGURA 1 Distribución mensual de materia seca de una pradera naturalizada fertilizada. Ton MS/ha precordillera andina de IX región. Cunco.

FUENTE: DEMANENT y ROMERO (1988).

El ecosistema pratense de la precordillera andina de la Región de la Araucanía se ve enfrentado en la actualidad a diversos estados de degradación, tales como erosión, desertificación, pestización y enmalezamiento. Estos procesos de degradación se expresan en una pérdida de su productividad (DEMANENT y ROMERO, 1988).

Una pradera degradada llega a esa condición principalmente por problemas de fertilidad de suelo y en segundo término por otros factores de manejo que no se llevan a cabo adecuadamente. Existe la posibilidad de recuperarla con medidas de manejo de praderas como la sectorización del predio (praderas permanentes y sector de rotación), la regulación de la carga animal, el apotreramiento y manejo del pastoreo (TORRES, 1996).

El factor de uso apropiado busca el aprovechamiento ecológico de la pradera, de modo que el pastoreo sea una herramienta para mantener en el mejor estado posible al pastizal, así como tratar de mejorarlo. Esto se busca a través del incremento de las especies deseables, respecto del total de las especies, de modo de darles una adecuada oportunidad para crecer y propagarse (LÓPEZ, 1989).

En un pastizal, la capacidad sustentadora depende del estado del mismo, de la tecnología que el hombre aplique y de los recursos utilizados. Si la acción del hombre sobre el pastizal se modifica, cambia el estado del ecosistema y por tanto su capacidad sustentadora (CRUZ, 2008).

2.3.1 Condición. La categoría de condición se establece para valorar el estado en que se encuentra el ecosistema-sitio de acuerdo al uso asignado y al estilo de transformación. Según GASTÓ *et al.* (1993) las categorías de condición son cinco: excelente, buena, regular, pobre y muy pobre.

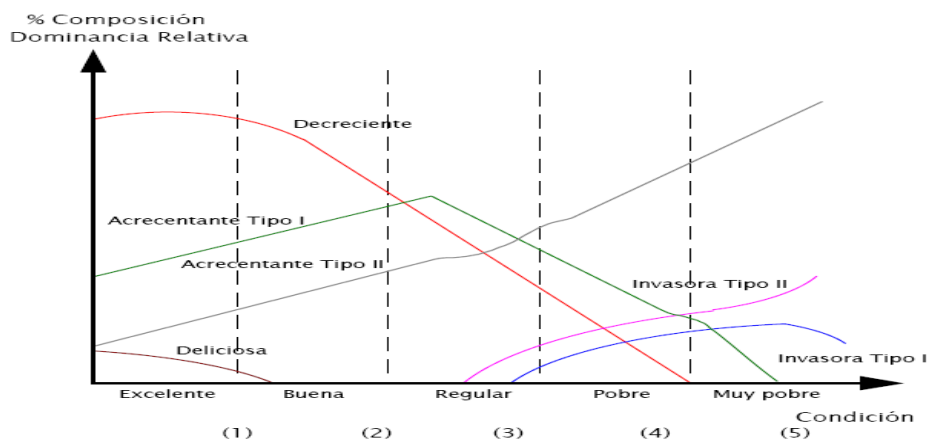


FIGURA 2 Porcentaje de composición botánica de los diversos grupos de organismos de acuerdo a la condición de la pradera.

FUENTE: GASTÓ *et al.* (1993).

La condición es una medida que permite valorar el estado de un ecosistema en un instante dado, en relación al estado ideal. En otras palabras, condición es una proporción entre dos cantidades: una que representa el estado en un instante dado (producción actual) y la otra, el máximo absoluto del sitio (producción potencial) (GASTÓ *et al.*, 1993).

En el caso de los pastizales, condición se define como la productividad de tejido vegetal útil en un momento dado, con respecto a la productividad potencial del sitio. Dyksterhuis (1949) citado por GASTÓ *et al.* (1993), estableció una técnica para determinar condición basada en la cantidad de plantas clímax presentes en la pradera, en un instante determinado. En praderas nativas la valoración de la condición se hace contrastando el estado en un instante dado con su estado climácico, para ello se clasifican las plantas en cuatro grupos principales: decrecientes, acrecentantes, invasoras e indiferentes (GASTÓ *et al.*, 1993).

Según este modelo, las especies decrecientes son aquellas propias de etapas climácicas, pero que al ser utilizadas por herbívoros ajenos al clímax, disminuyen su proporción en la composición botánica. Las especies acrecentantes también son propias del clímax, pero bajo condiciones de pastoreo y a medida que la condición se va deteriorando, su número comienza descender. Las plantas invasoras no son típicas del clímax, pero se encuentran presentes en áreas que han sido alteradas y degradadas. Por último, las indiferentes son aquellas que no son afectadas por la condición de la pradera (GASTÓ *et al.*, 1993).

La condición de cualquier sitio pratense se basa principalmente en dos grupos de factores: vegetales y edáficos. Variables como fertilidad de suelo, disponibilidad de agua, características físicas del suelo y animales en pastoreo pueden afectar la condición de la pradera alterando la dinámica de las especies pratenses. El efecto de dichas variables sobre la pradera se aprecia en cambios de la composición botánica (GASTÓ *et al.*, 1993; LÓPEZ y VALENTINE, 2003). Con respecto a las características del suelo, un suelo de buena estructura es blando y poroso, absorbe agua y está asociado con una condición satisfactoria, mientras que un suelo duro y compactado se relaciona generalmente con praderas en condición pobre o muy pobre (GASTÓ *et al.*, 1993).

2.3.2 Tendencia. Es el cambio instantáneo que se produce en un ecosistema hacia una nueva condición, en relación a la condición más deseable (GASTÓ *et al.*, 1993).

La tendencia de la condición evalúa la dirección del cambio instantáneo de la condición, que puede ser deteriorante, estable o mejorante. Cuando las fuerzas de degradación del ecosistema están en equilibrio con las fuerzas de mejoramiento, la condición del ecosistema está en equilibrio o estable, cuando se pierde este equilibrio, su tendencia puede ser a mejorar o a degradar (GASTÓ *et al.*, 1993).

Los ecosistemas naturales a menudo son el residuo que queda luego de la cosecha del ecosistema original. Luego de un periodo prolongado de explotación, la resultante puede ser la retrogradación del ecosistema natural y su transformación en estados inferiores que, a menudo, se caracterizan por la dominancia de especies invasoras indeseables y por la destrucción del ecotopo (GASTÓ, 1980).

2.3.3 Sucesión ecológica y composición botánica. Los cambios sucesionales que han venido ocurriendo desde décadas o centenas de años son capaces de explicar muchas de las variaciones locales que ocurren en los ecosistemas (CHAPIN *et al.*, 2002).

El proceso de interrupción es una de las causas más importantes en las fluctuaciones de largo plazo de la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. Interrupción se define como un efecto discreto en el tiempo y espacio que altera la estructura de las poblaciones, comunidades y ecosistemas, y causa cambios en la disponibilidad de recursos y en el medioambiente. Este concepto no debe ser entendido como un evento externo que afecta un ecosistema, sino como una parte integral del funcionamiento de todo ecosistema que responde y afecta a la mayoría de los procesos ecosistémicos (CHAPIN *et al.*, 2002).

Después de una interrupción ocurre un cambio direccional en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas, debido a cambios en el suministro de recursos, este proceso se conoce como sucesión. Cuando ya no ocurren más interrupciones la sucesión lleva al clímax, que corresponde al punto final de una sucesión. En este punto, la estructura y las tasas de los procesos ecosistémicos se aproximan a un estado de equilibrio, en el cual la demanda de recursos de la vegetación iguala la tasa de suministro de recursos (CHAPIN *et al.*, 2002). Cambios sucesionales que ocurren en la dirección opuesta a la retrogradación y que representan la recuperación de la

estructura del ecosistema después de una alteración se llama progresión y se caracteriza por un incremento en la diversidad de especies, producción y densidad de la pradera a través del tiempo (GASTÓ *et al.*, 1993; LÓPEZ y VALENTINE, 2003).

La composición botánica de una pradera es un reflejo del resultado entre la competencia de las especies por recursos, la tolerancia al estrés ambiental y la respuesta a la alteración ecosistémica (GRIME *et al.*, 1989; LÓPEZ y VALENTINE, 2003). La composición botánica *per se* no es el determinante de mayor importancia en la productividad de la pradera, pero sí refleja la fertilidad y condición de un sitio (HOPKINS, 2000).

Cambios en la composición botánica de la pradera después de un periodo de pastoreo probablemente se deben al pastoreo selectivo y a la adaptación de las especies a la defoliación, pero diferencias en las propiedades físicas del suelo también pueden contribuir a ese factor (GREENWOOD y MCKENZIE, 2001).

2.4 Suelo

La capacidad del suelo como sistema de sustentación vegetal depende de las interrelaciones de las propiedades físicas, químicas y biológicas que presente (VARNERO, 2002).

Prácticas agrícolas intensivas y de largo plazo pueden compactar el suelo, alterar su estructura y su capacidad de drenaje, mermar su contenido de materia orgánica, reducir su capacidad de retención de agua, reducir la disponibilidad de nutrientes y agotar el banco de semillas de especies nativas (CHAPIN *et al.*, 2002).

El laboreo del suelo aumenta la tasa de descomposición, reduciendo la protección física de la materia orgánica del suelo y alterando su microclima (CHAPIN *et al.*, 2002).

Los suelos escasamente intervenidos tienen baja resistencia a los esfuerzos cortantes y una baja capacidad de soporte, lo que se traduce en un arraigamiento más favorable, además de una óptima relación aire/agua, pero con una baja traficabilidad. Al aumentar las intervenciones antrópicas sobre los suelos, se genera en éstos un cambio estructural, lo que se traduce en un aumento de la capacidad de soporte; sin embargo, esto acarrea también un excesivo aumento de la densidad aparente y un aumento de la porosidad fina a expensas de la gruesa, lo que incrementa la resistencia a la penetración radical, con lo cual disminuye la conductividad hidráulica y se dificulta el intercambio gaseoso del suelo (SEGUÉL *et al.* 2002).

Horn y Lebert (1994) citados por SEGUEL *et al.* (2002), suelos con un alto contenido de materia orgánica o altos contenidos de arcilla, al ser sometidos a un uso intensivo son más susceptibles a la compactación, debido a una disminución en el contenido de materia orgánica, lo que se traduce en una mayor compresibilidad de las partículas finas. Sin embargo, ELLIES (2000) asevera que la compactación de estos suelos (refiriéndose a los Andisoles), por lo general, no genera problemas, porque el espacio poroso remanente después de una compactación, permite aún un adecuado crecimiento vegetal.

2.4.1 Estado y cambio de estado. Agricultura se define como el proceso de artificialización del ecosistema y el grado de artificialización es la magnitud generada de la diferencia entre el estado original del ecosistema (predio, e.g. bosque nativo) y su estado transformado (GASTÓ *et al.*, 2002).

El concepto de estado y cambio de estado de un ecosistema es importante porque, en un momento dado, es útil para conocer las condiciones específicas en las que se encuentra un sistema observable y las transformaciones del mismo por unidad de tiempo. El estado de un ecosistema se define por sus componentes o arquitectura y sus procesos o funcionamiento. El estado del sistema puede fluctuar dentro de márgenes muy amplios pero su organización y manejo deben ser el resultado de un estudio acabado de su estado original y de su transformación llevada a cabo con criterio de optimización antrópica (GASTÓ, 1980).

El aporte de estímulos desde fuera del ecosistema puede ser de máxima importancia en el manejo y mejoramiento de sistemas silvoagropecuarios. El recurso aportado puede ser el elemento limitante que impida su normal funcionamiento y limite su productividad. Es de suma importancia que se mantenga un equilibrio entre los aportes al sistema y las pérdidas o extracciones al sistema. Si el valor de la diferencia entre aporte y extracción no es igual a cero es indicativo de la existencia de un proceso de sucesión progresiva o retrogresiva. Cualquier cambio que se haga al manejo o estructura del sistema, modifica holocenósicamente su funcionamiento y se traduce finalmente en un aumento o reducción de la productividad (GASTÓ, 1980). El mismo autor señala que, es necesario conocer los atributos que definen un ecosistema, éstos, en un instante dado, corresponden al estado en que éste se encuentra. La naturaleza dinámica de los ecosistemas implica cambios en sus atributos que se expresan como

variaciones con respecto al tiempo, lo cual corresponde al cambio de estado. Los atributos físicos, químicos y biológicos del suelo pueden favorecer, limitar o inhibir completamente su uso. La suficiencia de estos atributos determina las mejores alternativas de uso a las que éstos se deben destinar (CASANOVA, 2000).

2.4.1.1 Efecto del manejo y uso del suelo en sus propiedades físicas. La degradación física de un suelo se asocia con un cambio en la estructura del mismo, es decir, se producen modificaciones en su sistema poroso. La estructura (porosidad) es necesaria en el balance del agua, aire y temperatura de los suelos. La capacidad de arraigamiento, el laboreo del suelo y la susceptibilidad a erosionarse se relacionan directamente con la estructura (ELLIES, 2000).

Como se mencionó anteriormente, un cambio en el manejo del suelo modifica sus propiedades estructurales. Excesivas presiones producen compactación, lo que equivale a una reducción en el volumen arraigable. La magnitud del asentamiento o deformación va a depender del contenido de humedad, distribución del sistema poroso, conductividad hidráulica y magnitud de la carga aplicada. En un suelo consolidado se incrementa la resistencia a nuevas deformaciones, pero estas van aparejadas con aumentos en la densidad aparente, cambios en la distribución por tamaño de poros, modificaciones en la conducción de agua en el suelo y disminución en la estabilidad al agua de los agregados (ELLIES, 1995; GREENWOOD y MCKENZIE, 2001).

CUADRO 1 Funciones del suelo que pueden ser alteradas por la compactación.

Relacionadas con los poros	<ul style="list-style-type: none"> - Descomposición y reciclaje de carbono y nutrientes. - Almacenaje y conducción de agua - Flujo de agua, nutrientes y gases.
Relacionadas a las superficies minerales	<ul style="list-style-type: none"> - Almacenaje y conducción de nutrientes - Buffer contra concentraciones químicas excesivas - Suministro de nutrientes mineralizados
Relacionada con ambos	<ul style="list-style-type: none"> - Estabilidad y diversidad de ambientes bióticos

FUENTE: Adaptado de WARKENTIN (2000)

La degradación de la estructura puede ser cualitativa o cuantitativa. Una pérdida cuantitativa de la porosidad disminuye la capacidad de almacenamiento de agua y aire, produciendo escurrimiento superficial y anegamiento debido a un exceso de agua en la superficie debido a una menor capacidad de infiltración. Los cambios cualitativos en la porosidad se caracterizan por cambios en la morfología, tamaño, continuidad y orientación de los poros. Con un deterioro en la estructura aumenta la resistencia a la penetración de las raíces, se dificultan las labores de labranza y se reduce la capacidad del suelo de sostener vegetación (ELLIES, 2000).

2.4.1.2 Efecto del pastoreo en las propiedades físicas de los suelos. Los efectos producidos sobre el suelo debido al pastoreo se deben fundamentalmente a daños causados por el tránsito y pisoteo de los animales, los cuales se manifiestan fundamentalmente por el estado de compactación, el cual se verá influenciado tanto por las características de la vegetación (volumen, arquitectura, estructura), de los animales (tipo, edad, carga animal, tipo de pastoreo) y del suelo (TABOADA, 2007). Las presiones ejercidas sobre el suelo por los animales en pastoreo son función del tamaño de su pezuña y la energía cinética, siendo mayores cuando los animales se encuentran en movimiento. La mayoría de esta fuerza aplicada al suelo por el animal en pastoreo es vertical (GREENWOOD y MCKENZIE, 2001).

Según ELLIES (2000), los suelos se compactan cuando la presión ejercida por un animal supera la capacidad de soporte del suelo. Es así que, suelos compactados sufren una reducción de la profundidad, una disminución en el volumen arraigable y en su capacidad y velocidad de infiltración. La capacidad de soporte es una medida que permite determinar la magnitud de las presiones que soporta un suelo sin que se compacte. Cuando la presión aplicada es menor a la capacidad de soporte el suelo no se deforma o compacta. Ésta, es específica del tipo de suelo y se relaciona inversamente con el contenido de humedad (menor humedad mayor capacidad de soporte). Cuando el suelo está más seco, el tránsito y pisoteo causan compactación que se ve reflejada en una pérdida de macroporosidad, en cambio cuando la humedad edáfica es alta ocurre daño por "poaching", causado por el flujo de suelo alrededor de la pesuña del animal (TABOADA, 2000). Al compactar un suelo su capacidad de soporte aumenta a expensas de una disminución en su porosidad media y gruesa. En

suelos más estructurados la capacidad de soporte, al igual que la densidad aparente, es mayor (ELLIES, 2000).

Según ELLIES (1995), al someter a los suelos volcánicos a una alta presión dinámica o estática las aristas de las partículas primarias y de las unidades estructurales se quiebran y toman formas más lisas, lo cual permite un mayor encaje o consolidación. La capacidad de soporte o preconsolidación incrementa con el tiempo e intensidad de uso. La secuencia en el aumento de la preconsolidación de las estratas superficiales está muy relacionada con el tiempo e historial de manejo del suelo. El incremento de la preconsolidación necesariamente produce un reordenamiento de las partículas, reduciendo el espacio poroso secundario, lo que se asocia a una pérdida en la calidad de sitio (ELLIES, 1995).

2.4.1.3 Efecto de la calidad del suelo sobre la pradera. La capacidad del suelo de sostener vegetación depende de la interacción de sus propiedades físicas, químicas y biológicas (ELLIES, 2000).

Cuando ha ocurrido daño físico por compactación en un suelo, los cambios en la densidad aparente y la porosidad total pueden no ser tan importantes para el crecimiento de las plantas como el incremento en la resistencia del suelo, que impide el crecimiento de las raíces, y la disminución de la continuidad de los poros que restringe el movimiento de agua y aire en el suelo (GREENWOOD y MCKENZIE, 2001). CLARK *et al.* (2003) asevera que un suelo compactado puede ser un serio problema en agricultura ya que limita el acceso del sistema radicular al agua y los nutrientes del suelo, lo que reduce el rendimiento de los cultivos. Las raíces disminuyen sus tasas de crecimiento debido a la fuerza que requieren para desplazar las partículas de suelo cuando estas se elongan. Por otro lado, la compactación del suelo afecta tanto el crecimiento radicular de las especies como el de sus brotes. Masle y Passioura (1987) citado por CLARK *et al.* (2003) encontraron que la compactación del suelo afecta la expansión de las hojas de trigo antes de que ésta llegue al 20% de su largo final. A la cosecha, 22 días luego de emergencia, el tratamiento de suelo compactado afectó más el peso seco de los brotes que el peso seco de las raíces. Los efectos de un impedimento mecánico del suelo van a depender de cuan limitantes sean el agua y los nutrientes, y de cómo este impedimento afecte la capacidad del cultivo para acceder al agua y los nutrientes (CLARK *et al.*, 2003).

La resistencia o impedancia mecánica del suelo (RP), medida con un penetrómetro, ha sido correlacionada con penetración de raíces. Taylor y Gardner (1963) y Taylor *et al.*, (1966), citados por CUEVAS *et al.* (2004) demostraron que esta relación fue la misma para un amplio rango de tipos de suelo, contenidos de humedad y densidad aparente. Sin embargo, CLARK *et al.* (2003) mencionan que, en general, las raíces oponen una resistencia mucho menor a la penetración del suelo que los penetrómetros, ya que éstas a medida que avanzan, generan mucílago que lubrica el camino, son capaces de tomar caminos alternativos a través del suelo, eligiendo aquellos que oponen la menor resistencia, y se desplazan a una velocidad mucho menor que los penetrómetros. FERRERO *et al.* (2005) señalan que, factores como densidad aparente, textura y humedad del suelo afectan los valores de RP, sin embargo este último factor sólo es importante cuando el suelo se encuentra con contenidos de humedad de capacidad de campo o mayores. Sin embargo, esto indicaría que la RP varía a medida que varía el contenido de humedad del suelo, osea que tendría un carácter estacional.

2.4.2 Recuperación y resiliencia del suelo. Resiliencia ecológica se define como la tasa a la cual un sistema vuelve a su estado de referencia luego de haber sufrido alguna perturbación. Sistemas con baja resiliencia no son capaces de volver a su estado original derivando en un nuevo estado. Así, sistemas que mantienen sus propiedades a pesar de las perturbaciones y vuelven rápidamente a su estado original son resilientes, y poseen propiedades ecosistémicas más estables y predecibles (CHAPIN *et al.*, 2002).

El suelo es una entidad orgánica y dinámica que tiene la capacidad de restaurarse siempre que la alteraciones provocadas por el ser humano no sean muy drásticas y se le de el tiempo suficiente para que los procesos de mantención y restauración ocurran (LAL, 1994). Dicho tiempo va a depender del tipo de suelo, del grado de compactación sufrido y de los agentes biológicos y climáticos que estén interactuando. Factores como los ciclos de mojado y secado (en suelos arcillosos), el crecimiento y descomposición de las raíces de las praderas y la acción de la fauna del suelo contribuyen a la restauración de las propiedades físicas de los suelos (GREENWOOD y MCKENZIE, 2001).

Algunos de estos procesos, que permiten contrarrestar el estrés y las alteraciones, son: la capacidad buffer ante daños químicos, físicos y biológicos, y su capacidad de

renovación, es decir que puede regenerarse, hasta cierto punto, luego del estrés. La capacidad de resiliencia de los suelos no puede ser medida de manera simple pero si estimada y se relaciona directamente con la sostenibilidad del uso de los suelos (SZABOLCS, 1994). El grado de resiliencia de los suelos depende de la magnitud de las perturbaciones humanas y puede ser estimada mediante la ecuación 2.1 (LAL, 1994).

$$RS = S_a + \int (S_n - S_d + I_m) dt \quad (2.1)$$

Dónde:

RS = resiliencia del suelo; S_a = antecedentes de la condición del suelo; S_n = tasa de formación de nuevo suelo; S_d = tasa de degradación de suelo; I_m = input de manejo desde fuera del ecosistema.

La magnitud y el signo de $(S_n - S_d + I_m)$ es crítica en la determinación de la resiliencia del suelo, ya que si el valor de $(S_n - S_d)$ es positivo el recurso suelo se considera renovable (LAL, 1994).

Los factores que afectan la resiliencia del suelo pueden ser agrupados en dos categorías: endógenos y exógenos. Los endógenos son aquellos factores que se relacionan directamente con las propiedades del suelo, así algunos de los factores que caracterizan suelos con un alto grado de resiliencia son: profundidad radicular, textura, alta proporción de microagregados estables, buen drenaje etc. Un alto contenido de materia orgánica depende de estas características. Ejemplos de estos suelos altamente productivos son: Mollisol, Inceptisol y Andisol. Algunos factores exógenos son: uso del suelo y el manejo de los cultivos y el ganado. Elegir un adecuado uso del suelo y adoptar tecnologías basadas en la ciencia juegan un importante rol en la restauración de la productividad del suelo (LAL, 1994).

CUADRO 2 Factores que afectan la resiliencia de los suelos.

Factores endógenos	Factores exógenos
Profundidad radicular	Uso del suelo y estilo de agricultura
Textura del suelo y mineralogía de las arcillas	Innovaciones tecnológicas
Material parental	Inputs y manejo agrícola
Posición en el paisaje y terreno	
Régimen de humedad	
Micro y mesoclima	
Biodiversidad del suelo, flora y fauna	

FUENTE: LAL (1994)

2.4.3 Materia orgánica y microorganismos. Según SCHARPENSEEL y BECKER-HEIDMANN (1994) el nivel de materia orgánica en un suelo es sostenido por un armonioso suministro de biomasa de la superficie, que es dependiente del pH del suelo, su temperatura y contenido de humedad, así como de la naturaleza de las matrices inorgánicas y arcillas, que son los principales factores edáficos que controlan la descomposición de la materia orgánica o estabilización del humus.

Un bajo contenido de materia orgánica en los suelos contribuye a una baja capacidad de retención de agua y a su baja capacidad de intercambio catiónico (CHAPIN *et al.*, 2002). Por otro lado, el laboreo tradicional de los suelos reduce el tamaño de los agregados del suelo, disminuyendo su capacidad de infiltración. La estructura de los suelos puede ser mejorada con la adición de materia orgánica, sin embargo, está demostrado que la sola adición de materia orgánica no lleva a una mejora de sus propiedades estructurales y que, son necesarias transformaciones microbiales como la producción de polisacáridos junto con la unión física de las partículas del suelo (ANDERSON, 1994). Entre las actividades claves que realizan los microorganismos del suelo se pueden mencionar: degradación de residuos orgánicos, transformación de la materia orgánica, mineralización e inmovilización de nutrientes y la formación y estabilización de los agregados del suelo (CHAPIN *et al.*, 2002).

NSABIMANA y HAYNES (2004) concluyeron que el uso del suelo tiene substanciales efectos en el tamaño, actividad y diversidad de las comunidades microbianas y que estos cambios pueden estar ampliamente relacionados con variaciones en el contenido de materia orgánica del suelo.

2.5 Historia del Territorio

Los procesos ecosistémicos de hoy dependen tanto del estado actual del ecosistema como de lo ocurrido en el pasado (CHAPIN *et al.*, 2002).

El territorio en el cual se lleva a cabo el estudio corresponde a la precordillera andina de la Región de la Araucanía, en las cercanías de la ciudad de Curacautín. En este territorio, el proceso de apertura de la frontera horizontal, entendida como la colonización antrópica y apertura del bosque para la agricultura, se produjo extensivamente sólo a partir de la pacificación de la Araucanía. MONTALDO (2004) cuenta que la incorporación de la Frontera trajo como consecuencia el desplazamiento del cultivo y la producción de trigo desde el centro del país a este territorio, así como, el cultivo de avena y la crianza y engorda de bovinos.

Dicho paisaje descrito como selva impenetrable hasta mediados del siglo XIX (VERNIORY, 2001), se ha transformado hoy en un paisaje cultural con evidentes signos de deterioro ambiental, presentándose en amplias zonas un acelerado proceso de desertificación y agonía. Esto se manifiesta en la degradación de los suelos; la pérdida del potencial productivo de los recursos naturales; la deforestación, sobrepastoreo y abandono de predios; la fuerte migración campo-ciudad por falta de empleo y oportunidades; desequilibrios territoriales; etc (VERA, 2008).

La intervención antrópica en la zona comienza con la eliminación de la cobertura vegetal existente, el establecimiento de praderas y la explotación ganadera, este proceso podría dividirse en dos etapas; aquella en que se extraen ganancias de la explotación del territorio y aquella en que la producción decae con el subsecuente abandono por parte de los colonos (RAMIREZ, 2002).

Con la llegada de los primeros colonos chilenos a principios del siglo XX, los bosques fueron abiertos, mediante tala y quema de los residuos, a fin de obtener tierras para el laboreo. OPAZO (1910) señala que entre 1880 y 1910 los colonos explotaron más de 500.000 ha de bosque nativo y degradaron gran parte de sus suelos por la actividad cerealera orientada a la exportación.

Este proceso desencadena una serie de reacciones, las que son claves para caracterizar el proceso evolutivo de los suelos en estudio, el fuego consume parte de la materia orgánica pero también adhiere más carbono al suelo proveniente de las raíces muertas y partes vegetales no quemadas. Cuando se quema la biomasa, ésta transfiere sus nutrientes directamente desde el suministro terrestre a la atmósfera. Los

gases predominantes liberados son compuestos carbonados en distintos grados de oxidación como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y monóxido de carbono (CO). El nitrógeno también es liberado durante la combustión (CHAPIN *et al.*, 2002). VERA (2008) en su tesis doctoral “Expansión de la frontera homínida en el paisaje cultural de la cordillera de los Andes de la Araucanía”, define una serie de etapas y rutas de transformación de los ecosistemas forestales en la Cordillera de los Andes de la Araucanía. Dichas etapas son:

2.5.1 Floreo de la *Silva*. Inicio de la apertura horizontal. La *Silva* se define como un ecosistema clímax que, por acción de la sistemogénesis natural, tiene la carga máxima de biocenosis antes de su antropización. En esta etapa, gracias al capital de los fundos de la época, se constituyó una población transitoria de cazadores y cultivadores forestales que floreó el bosque. Se produce así una descarga de los mejores componentes del ecosistema, sin producirse un asentamiento permanente de población en él. En la Figura 3 se representan los flujos de materia, energía e información, el grosor de las flechas indica su magnitud.

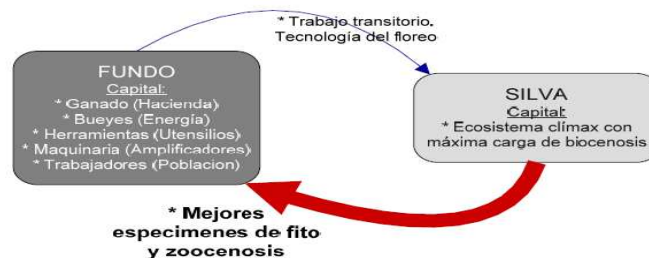


FIGURA 3 Primera etapa de la expansión de la frontera horizontal.

FUENTE: VERA (2008).

2.5.2 Destrucción de la *Silva*, apertura de la frontera horizontal. En esta etapa los colonos llegan a limpiar el bosque y a establecerse. Así, por medio de un aserreo itinerante, efectúan una cosecha forestal generalizada y terminan por destruir la fitocenosis. Los suelos de los terrenos limpios cuentan con el horizonte O (horizonte orgánico y superficial del perfil del suelo) y con una fertilidad de bosque clímax. La Figura 4 representa la segunda etapa de la expansión de la frontera, los grosores de las flechas indican la magnitud de los flujos de energía e información.



FIGURA 4 Segunda etapa de la expansión de la frontera horizontal.

FUENTE: VERA (2008).

2.5.3 Preparación del terreno. Cultivos agrícolas y praderas. En esta etapa los colonos se hacen agricultores y ganaderos. Tanto los terrenos cultivados como las praderas son sobreexplotados y cosechados insustentablemente y van perdiendo su fertilidad natural, con lo que baja el rendimiento y aumenta la necesidad de incorporar tecnología o limpiar más tierras.

Una vez abierto el bosque se comienzan a realizar cultivos, principalmente trigo, con rotaciones trigo-pradera-trigo, en las cuales el trigo volvía cada 3 a 4 años al mismo potrero.



FIGURA 5 Tercera etapa de la expansión de la frontera horizontal.

FUENTE: VERA (2008)

La apertura de este territorio se vio fomentada por el gran auge triguero experimentado en el país debido a la creciente demanda de los mercados externos como Estados Unidos, Australia e Inglaterra principalmente y de mercados internos como el norte salitrero y las florecientes ciudades de Valparaíso y Santiago.

MONTALDO (2004) señala que en la zona se estableció el llamado “roce de montaña”, que consistía en talar la vegetación leñosa, sacar los troncos de valor comercial y dejar el resto de la vegetación para que se secase durante el verano y se quemara en otoño. Sobre el terreno quemado, se procedía a desparramar semillas de trigo, avena o centeno. Luego el campo se dejaba dos años para el rebrote de la vegetación y se volvía a cortar para sembrar trigo nuevamente. Tras dos a cinco años de descanso del suelo, se repetía el roce de la vegetación, para empastar.

2.5.4 Sitios de alta receptividad tecnológica. Aumento progresivo del input tecnológico para mantener los niveles de cosecha. La producción se vio sustentada por la fertilidad presente en el suelo, la cual fue disminuyendo paulatinamente, cuando esta ya no fue suficiente para sostener la producción se fertilizó artificialmente los cultivos, derivando en una pérdida de fertilidad crítica para el sistema, con lo cual dejó de ser sostenible la producción triguera (VERA, 2009).

La fertilización mineral difícilmente puede sustituir el efecto deprimente de la productividad, originada en la práctica de monocultivos. Incluso la aplicación de altas dosis de fertilizante no compensan la disminución ecológica de la productividad (GASTÓ, 1980). El uso exclusivo de fertilizantes minerales provoca un fuerte aumento de la capacidad productiva de los suelos, pero en el largo plazo, puede derivar en un agotamiento de nutrientes, lo que es una situación insostenible desde el punto de vista económico. Sin razón aparente los rendimientos no mejoran, a pesar de la aplicación de fertilizantes (SOMBROEK, 1994).



FIGURA 6 Sitios de baja receptividad tecnológica. La biocenosis se degrada progresivamente y el biotopo se destruye.

FUENTE: VERA (2008).

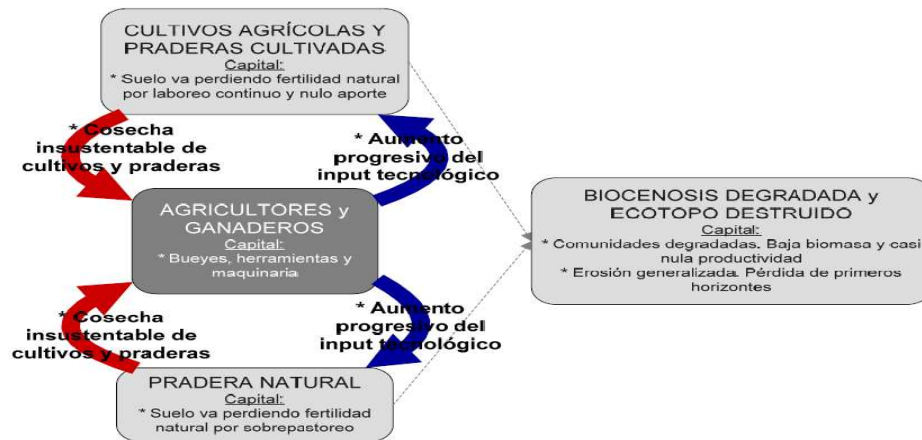


FIGURA 7 Cuarta etapa (b) de la expansión de la frontera horizontal.

FUENTE: VERA (2008).

2.5.5 Agotamiento de los recursos. Subsidio estatal para los recursos forestales. En esta etapa ya no se puede mantener la productividad de los cultivos ni de las praderas. Para apoyar a los agricultores el estado instaura una política de subsidio a la forestación. El cultivo forestal produce una estabilización aparente del ecosistema, continuando con el proceso degradativo por la excesiva simplificación del sistema.

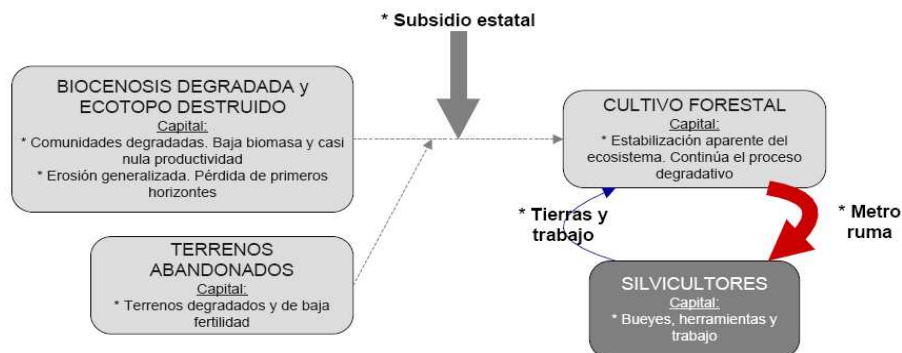


FIGURA 8 Quinta etapa de la expansión de la frontera horizontal.

FUENTE: VERA (2008).

3 MATERIAL Y MÉTODOS

3.1 Materiales

A continuación se enumeran los materiales que fueron utilizados en el desarrollo de la tesis.

3.1.1 Territorio y suelos analizados. El sitio bajo estudio se ubica en la comuna de Curacautín, precordillera andina de la IX Región de la Araucanía, en el predio llamado Hueñivales. El ensayo se realizó en otoño de 2009 (mayo- junio).

3.1.1.1 Antecedentes prediales. Hueñivales fue adquirido por su actual propietario en el año 2001, año desde el cual ha sido sometido a diversos procesos y operadores orientados a su restauración. Se puede definir restauración predial como el proceso de diseño e implementación de los operadores de transformación que permitan restablecer la estabilidad de las funciones ecosistémicas del predio y las condiciones de sustentabilidad predial acorde a las metas del propietario (CRUZ, 2008). A continuación se resumen los antecedentes prediales, junto con la evolución que ha tenido el predio desde su adquisición en 2003 hasta 2008.

CUADRO 3 Encuadre predial.

Antecedentes del predio			
NOMBRE	HUEÑIVALES		
PROPIETARIO	JUAN GASTÓ CODERCH.		
UBICACIÓN GEOGRÁFICA	(UTM SAD 69. 19H): 263.050 - 263.720 / 5.736.280 – 5.737.730		
SUPERFICIE	53, 01 ha (52,77 ha (Área predio) + 0,24 ha (servidumbre de paso))		
Localización administrativa		Localización ecorregional	
PAÍS	CHILE (5 04)	REINO	TEMPLADO (3)
REGIÓN	ARAUCANÍA (9)	DOMINIO	HÚMEDO (4)
PROVINCIA	MALLECO (01)	PROVINCIA	HÚMEDA DE VERANO FRESCO Y MESICO “LOS LAGOS” (01)
COMUNA	CURAUTIN (11)		
CODIGO AMINISTRATIVO	5 04 09-01 11	CODIGO ECOLÓGICO	3401-000

FUENTE: CRUZ (2008)

3.1.1.1 Ubicación. El predio se ubica en la precordillera andina de la región de la Araucanía, en la comuna de Curacautín, en la parte superior de la cuenca del río Cautín.

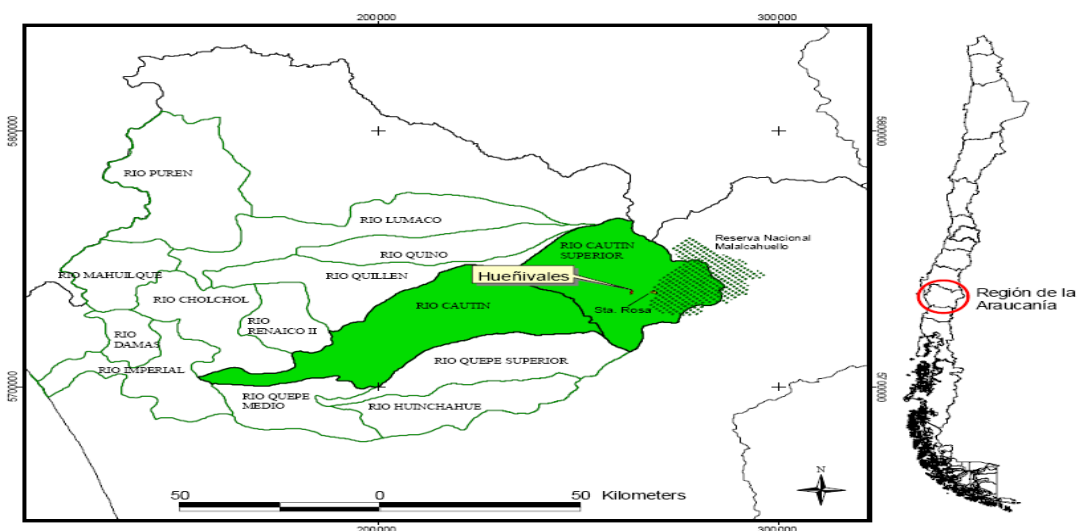


FIGURA 9 Cuenca río Imperial y sus afluentes.

FUENTE: CRUZ (2008)

Los accesos al predio Hueñivales son por la ruta internacional R-89 que va desde Curacautín a Lonquimay y que llega finalmente hasta la República Argentina. Se deben recorrer 10 Km al este, hasta llegar al cruce que la une con el Parque Nacional Conguillío. Por esta vía, no pavimentada, se debe continuar por aproximadamente 5,8 Km hasta la entrada al predio.



FIGURA 10 Vías de acceso al predio Hueñivales.

FUENTE: www.turistel.cl (2009)

3.1.1.1.2 Clima. El clima es templado húmedo, pertenece a la provincia del tipo húmeda de verano fresco y méxico “los lagos”. Característico de esta provincia ecológica es que en los meses de verano las precipitaciones tienden a disminuir hasta montos insuficientes para mantener la vegetación. La vegetación natural no se ve afectada puesto que los montos anuales sobrepasan los requerimientos (GASTÓ *et al.*, 1993).

De acuerdo a SANTIBAÑEZ y URIBE (1993), el predio pertenece al distrito agroclimático 89.11. Es de tipo infratermal estenotérmico mediterráneo perhúmedo. Este régimen térmico se caracteriza por temperaturas que varían entre una máxima en enero de 21,6°C y una mínima en julio de 2,0°C. El periodo libre de heladas es de 12 días, con un promedio de 80 heladas por año. Registra anualmente 573 días-grado y 4290 horas de frío. El régimen hídrico observa una precipitación media anual de 2860 mm, un déficit hídrico de 154 mm y un periodo seco de un mes.

3.1.1.2 Geomorfología y suelos. La precordillera posee un carácter de acumulación de sedimentos fluvio-glacio-volcánico, constituido por conos de gran envergadura y potencia, los que tienden a desaparecer como unidad orográfica en las cercanías del río Allipén. El borde más occidental de la precordillera es de carácter fuertemente morrénico, esto junto a las condiciones climáticas húmedas de la zona, minimizan las formas de relieve a simples lomas de gran curvatura externa, con la periferia sometida a la intensa acción erosiva lineal por quebradas y arroyos (DEMANET y ROMERO, 1988).

Los suelos ubicados en la precordillera andina corresponden preponderantemente a trumaos (Andisol), este tipo de suelo se forma a partir de cenizas volcánicas (basáltico-andesíticas) (DEMANET y ROMERO, 1988). El suelo se caracteriza por ser muy poroso, con densidades aparentes bajas (0,6-0,9 g/cm³), tener un pH ácido y una capacidad de intercambio catiónico que fluctúa entre 47 y 77 meq/100 g. La saturación de bases disminuye de norte a sur, fluctuando entre 21 y 6%, debido a la presencia de una mayor precipitación (sobre 1900 mm anuales), lo que favorece la acumulación de materia orgánica y la acidez del suelo. Los índices de adsorción de fósforo fluctúan entre 39 y 98%, son mayores en horizontes superficiales debido a la presencia de aluminio extractable (DEMANET y ROMERO, 1988). Pese a que estos suelos poseen excelentes propiedades físicas (porcentaje de agregación, densidad aparente,

capacidad de retención de agua, etc), su uso agrícola se ve limitado por la carencia de fósforo disponible, producida por la alta capacidad de fijación de sus coloides inorgánicos (DEMANET y ROMERO, 1988).

El suelo bajo estudio corresponde a la serie Los Prados (Acrudoxic Melanudand, USDA, LUZIO y CASANOVA (2006)), la cual pertenece a la familia Los Prados, ésta se ubica en la precordillera de Los Andes a una altura de 350 a 500 m.s.n.m. Se ha desarrollado a partir de cenizas volcánicas modernas bajo un régimen de humedad údico y de temperatura mésico. La vegetación natural corresponde a la formación de *Nothofagus oblicua* y *Laurelia sempervirens*, que incluye también *Nothofagus dombeyi* y *Eucryphia cordifolia* (TOSSO, 1985).

La serie Los Prados corresponde a suelos muy profundos, con pendientes complejas de 4 a 15% y descansa sobre gravas fluvio-glaciales, estratificadas y con un suelo enterrado entre los 50 y 60 cm de profundidad.

La textura es franco limosa, de colores pardo muy oscuro en los primeros tres horizontes, en profundidad, la textura es moderadamente fina y de colores pardo oscuro a pardo grisáceo oscuro.

La temperatura media anual del suelo es de 12-13°C y varía de 22-24°C en enero a 8-9°C en julio, presenta una precipitación anual media de 1500-3000 mm y buen drenaje (TOSSO, 1985).

3.1.2 Historial de manejo. A continuación se presentan los antecedentes del sitio a analizar, mediante una caracterización territorial al año 2008 y una descripción de las actividades realizadas a lo largo de 5 años. Cabe destacar el hecho de que las descripciones que aquí se realizan corresponden al predio Hueñivales y que el historial de manejo del predio vecino se ha mantenido en las mismas condiciones en que se encontraba Hueñivales en 2001, antes de comenzar el proceso de restauración.

Al momento de adquirir la propiedad los tipos de cobertura vegetal presentes en el predio eran los que se detallan en el Cuadro 4.

CUADRO 4 Tipos de cobertura en el año 2003, según superficie y porcentaje.

Tipo de Cobertura	Superficie (ha)	Superficie (%)
Bosque	6,7	12,7
Cultivo forestal	0,1	0,2
Cultivo frutal	0,69	1,3
Herbácea cespitosa	0,53	1,0
Matorral	7,0	13,2
Pradera	14,84	28,0
Sabana arbustiva	23,22	43,8
TOTAL	53,01	100

FUENTE: CRUZ (2008)

Se observa que al año 2003 la superficie del predio cubierta por praderas era de 14,78 ha, lo que correspondía a un 28% de la superficie total. Por otro lado, destaca la alta proporción de matorral (13%) presente en el predio.

La superficie cubierta por praderas se define como áreas dominadas principalmente por especies forrajeras como *Dactylis glomerata*, *Bromus sp.*, *Agrostis sp.* y *Trifolium sp.*, además de otras especies de menor valor forrajero como *Anthoxantum odoratum*, *Achillea millenfolium* y *Rumex acetocela*. También se encuentran especies de malezas arbustivas como *Rubus ulmifolius* y *Rosa eglantheria*.

El estado inicial de las praderas, al momento de la adquisición del predio, eran superficies ampliamente invadidas por malezas de zarza (*Rubus ulmifolius*), mosqueta (*Rosa eglantheria*) y michay (*Berberis sp.*), lo que dificultaba el pastoreo y el surgimiento de especies más nobles.

En el año 2002 comienza el control de malezas de los potreros, para el control de *Rubus ulmifolius* y *Rosa eglantheria*, se aplicó herbicida entre noviembre y mayo, para luego rozar, tumbar y quemar a fines de otoño cuando ya estaban secas. Los procesos de roza, quema y control químico de malezas se hacen de manera continua y complementaria según sea necesario, generalmente una vez por año.

Luego de 5 años de procesos de restauración y cambios en el manejo del pastoreo y apotreramiento, la cobertura vegetal del predio corresponde a la que se indica en el Cuadro 5.

CUADRO 5 Tipos de cobertura vegetal en 2008, según superficie y porcentaje.

Tipo de Cobertura	Superficie (ha)	Superficie (%)
Bosque	14,63	27,6
Cultivo forestal	0,1	0,2
Cultivo frutal	0,58	1,1
Herbácea cespitosa	0,85	1,6
Matorral	1,0	1,9
Pradera	22,0	41,5
Sabana arbustiva	13,84	26,1
TOTAL	53,01	100

FUENTE: CRUZ (2008).

Si bien los tipos de cobertura no han variado mucho desde la compra del predio, si lo han hecho su condición y representatividad dentro de la superficie total del predio. Destacan los casos de matorral, el cual en 2003 representaba el 13% de la superficie, llegando en 2008 a solo un 2%, gracias a los trabajos de limpieza y recuperación de praderas.

El Cuadro 6 muestra el cambio entre los tipos de cobertura entre los años 2003 y 2008, en él se muestra la clara intención del propietario por aumentar la superficie de bosques y de disminuir la superficie de áreas poco productivas como matorral.

CUADRO 6 Cambio de tipo de cobertura de Hueñivales entre el año 2003 y 2008.

Tipo de cobertura	Superficie 2003 (%)	Superficie 2008 (%)
Bosque	12,7	27,6
Cultivo forestal	0,2	0,2
Cultivo frutal	1,3	1,1
Herbácea cespitosa	1,0	1,6
Matorral	13,2	1,9
Pradera	28,0	41,5
Sabana arbustiva	43,8	26,1

FUENTE: CRUZ (2008)

Desde la adquisición de la propiedad, se adoptó un sistema de pastoreo rotativo de ganado bovino, el cual se desarrolla como se describe a continuación, cabe mencionar el hecho que durante los primeros cuatro años desde la adquisición del predio (2001-2005), el predio sustentaba tanto ganado bovino para crianza como ganado ovino.

Las razas utilizadas en el predio son de doble propósito, enfocadas a la producción de carne, Overo colorado y Normanda, produciéndose mezclas entre ambas. El ganado se encuentra en el predio durante el periodo de agosto hasta mayo del siguiente año, permaneciendo excluido durante el invierno. Las hembras entran al predio durante el mes de agosto, al final de su preñez, produciéndose las pariciones en los meses de agosto y septiembre. Los terneros listos se encuentran en condiciones de ser destetados a fines de febrero, saliendo a la venta a fines de marzo y abril. Sus pesos fluctúan entre 210 kg. las hembras y 230 kg. los machos. Las madres salen a más tardar a fines de abril o comienzos de mayo.

Finalmente, tanto en el sitio de Hueñivales como en el sitio adyacente, no se han realizado labores de labranza y que las diferencias entre ambos están dadas fundamentalmente por el roce y eliminación de malezas arbustivas y el manejo del pastoreo.

3.1.3 Material de terreno y laboratorio. Para la recolección de muestras de suelo y el análisis de las mismas se utilizaron los siguientes materiales: penetrómetro, cilindros metálicos de 110 y 220 cm³ (para las muestras de suelo no disturbadas), extractores de cilindros, bolsas plásticas (para muestras de suelo disturbadas), palas, plástico en rollo, cuchillo, espátula, tijeras, marcadores y materiales de laboratorio.

Para la recolección de las muestras de pradera se utilizó un anillo metálico de 0,25 m², tijeras, marcador permanente y bolsas plásticas.

3.2 Método

A continuación se describe la metodología que se utilizó en el desarrollo de la tesis, ésta se compone de dos partes, ensayos de campo y análisis de muestras de suelo y praderas en laboratorio.

3.2.1 Ensayos de campo. A nivel de campo los análisis consistieron en medir la resistencia a la penetración en los sitios ya mencionados, para lo cual se procedió a cuadricular el terreno cada dos metros, a fin de completar una malla homogénea de puntos de presión. Para cuadricular el terreno y proceder a la medición, se utilizó un taquímetro, huinchas de 50 m y varillas de madera. La resistencia a la penetración se midió con un penetrómetro (en cada intersección en la malla de puntos), el cual mide la resistencia del suelo a la penetración en kPa.

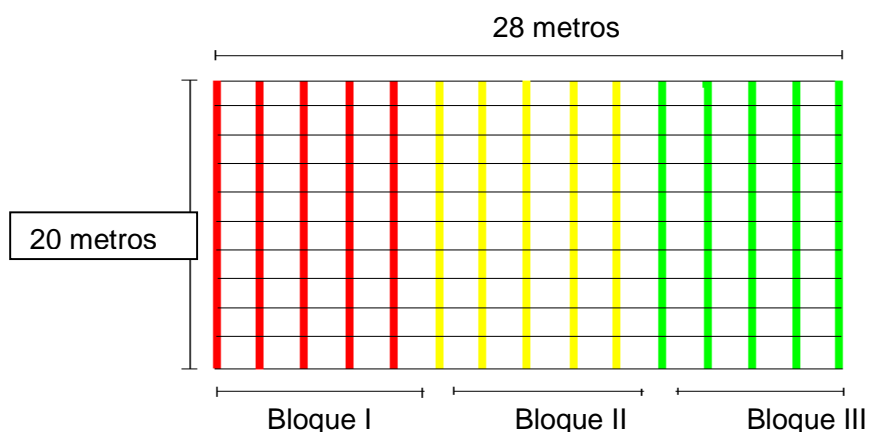


FIGURA 11 Malla puntos de presión a medir con penetrómetro.

3.2.2 Recolección de muestras. Se analizaron 3 sectores, dos de ellos correspondieron a praderas contrastantes en su manejo, pero que poseen las mismas características de sitio, pedológicas y de formación. Estas se clasificaron como: pradera degradada (PD) y pradera mejorada (PM). Ambos sectores fueron comparados entre sí y con un sector cubierto por bosque de especies nativas de la zona, el cual se denominó bosque (B).

3.2.2.1 Suelo. Se recolectaron muestras disturbadas y no disturbadas de suelo. Las muestras disturbadas fueron recolectadas para la determinación de materia orgánica, textura, densidad real, alofán y análisis químicos de fertilidad. Se colectaron 3 repeticiones por sitio en estudio de 1 kg de suelo cada una.

Además, se tomaron muestras no disturbadas de suelo en cilindros metálicos de 110 cm³ (CS) y de 220 cm³ (pF) en los primeros 10 cm del perfil considerando 10 repeticiones por sitio en estudio para la determinación de: capacidad de soporte (CS),

resiliencia mecánica (RM) y funcional (RF), densidad aparente (Da) y conductividad de aire (KI) y 4 repeticiones por sitio para la determinación de: curva de retención de agua y distribución de poros (pF). Las repeticiones se distribuyeron de la siguiente manera:

CUADRO 7 Distribución muestreo análisis físicos de suelo.

SITIO	BLOQUE	CILINDRO	N° DE REPETICIONES
Pradera mejorada (PM)	B I	CS	4
		pF	4
	B II	CS	3
	B III	CS	3
Pradera degradada (PD)	B I	CS	3
		CS	3
		CS	4
	B II	pF	4
Bosque (B)	B I	CS	3
		CS	3
	B II	CS	4
		pF	4

Las muestras de suelo fueron convenientemente selladas y almacenadas para evitar evaporación de agua y daño mecánico.

También se recolectaron agregados de cada uno de los sectores, para determinar su resistencia mecánica y densidad aparente. Los agregados fueron colocados en cajas plásticas, selladas para evitar la evaporación de agua y la contracción de los agregados.

3.2.2.2 Pradera. Se recolectaron muestras de pradera de los sitios ya mencionados para la determinación de composición botánica y disponibilidad de materia seca en pastoreo. Se utilizó el método de corte, según el procedimiento descrito por CANSECO *et al.* (2007).

3.2.3 Análisis de suelo en laboratorio. Los análisis fueron llevados a cabo en el laboratorio de Física de Suelos, Achim Eillies Sch. del Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias.

3.2.3.1 Análisis químicos. Se realizaron análisis químicos de las muestras de suelo a fin de determinar su pH, contenido de nitrógeno, fósforo y aluminio. Las muestras fueron secadas a temperatura constante y preparadas según el procedimiento descrito por SADZAWKA *et al.* (2006).

3.2.3.1.1 Determinación del N-mineral. La determinación del nitrógeno mineral contenido en las muestras fue determinado por medio de extracción con cloruro de potasio 2 mol/L, destilación de NH₃ y determinación por titulación de acuerdo a lo señalado por SADZAWKA *et al.* (2006).

3.2.3.1.2 Determinación del P-Olsen. Esta medición fue realizada por medio de extracción con solución de bicarbonato de sodio 0,5 mol/L a pH 8,5 y determinación colorimétrica del azul de molibdeno, según lo señalado por SADZAWKA *et al.* (2006).

3.2.3.1.3 Determinación de Al-extractable. La determinación de aluminio extractable se realizó mediante la extracción con solución de acetato de amonio 1 mol/L a pH 4,8 y determinación de espectrofotometría de absorción atómica (SADZAWKA *et al.* 2006).

3.2.3.1.4 Determinación de pH. Se midió el pH al agua por medio de pH metro y agua destilada como se describe en SADZAWKA *et al.* (2006). Primero se pesaron 10 g de suelo tamizado a 2 mm y se le agregaron 25 ml de H₂O, luego se agitó la solución con una varilla de vidrio tres veces, una cada 10 minutos y luego se dejó reposar por 10 minutos más; una vez reposado se leyó en un pH-metro (medidor de pH).

3.2.3.1.5 Determinación de alofán. Se determinó indirectamente el contenido de alofán a partir del método descrito por Schwertmann (1964), adaptado posteriormente por MIZOTA y van REEUWIJK, (1989). Se aplicó una solución de oxalato ácido (oxalato de amonio 0,2 M y ácido oxálico)¹ a 1 g de suelo. Luego se agitó la mezcla durante 4 hrs. en ausencia de luz y se extrajeron 35 ml de la solución a un tubo de centrifuga, al cual se aplicaron 4 gotas de solución superfloc (0,2 %). Posteriormente,

¹ El pH de la mezcla debe ser igual a 3.

se centrifugó la mezcla y se procedió a determinar las concentraciones de aluminio y silicio en oxalato ácido (Al_o y Si_o) a través de espectrofotometría de absorción atómica. Paralelamente, se realizó el mismo procedimiento pero con una solución de pirofosfato (difosfato) de sodio ($0,1 M$)² y a través de espectrofotometría de absorción atómica se determinó la concentración de aluminio en pirofosfato (Al_p).

Luego de obtenidas las concentraciones de Al y Si en los diferentes extractos se determinó el contenido de alofán a partir de la fórmula propuesta por Parfitt y Wilson (1985) adaptada posteriormente por MIZOTA y van REEUWIJK, (1989).

$$Alofán = \frac{100 * Si_o}{\left[23,4 - 5,1 \left(\frac{Al_o - Al_p}{Si_o} \right) \right]} [\%] \quad (3.1)$$

Donde: Si_o = contenido de silicio en extracto de oxalato ácido [%]; Al_o = contenido de aluminio en extracto de oxalato ácido [%]; Al_p = contenido de aluminio en extracto de pirofosfato de sodio [%].

3.2.3.2. Análisis físicos. A fin de caracterizar físicamente los suelos en estudio se realizaron los siguientes análisis.

3.2.3.2.1 Materia orgánica. La materia orgánica presente en los suelos se determinó mediante el método de oxidación de Walkley y Black (WALKLEY y BLACK, 1934), el cual mide el contenido de C total del suelo por medio del método de titulación (SADZAWKA *et al.*, 2006).

3.2.3.2.2 Textura. Éste se realizó con el propósito de determinar la distribución de partículas que constituyen el suelo. Para la determinación de la textura se utilizó el método de Day (DAY, 1965).

² Para determinar la concentración de Al_p , la mezcla se agitó por 16 hrs. en ausencia de luz.

3.2.3.2.3 Densidad real. Para determinar la densidad real se utilizó el método del pesaje sumergido. El volumen se obtiene por la diferencia entre el peso en seco y el peso sumergido (desplazamiento o volumen). Para este análisis se utilizó suelo disturbado tamizado < 2 mm y secado a 105° Celsius (C) por 24 horas (FORSYTHE, 1974).

3.2.3.2.4 Determinación de la curva de retención de agua. Se extrajeron 12 cilindros con muestras de suelos no disturbado para la determinación de la curva de retención de agua, 4 por cada sitio de muestreo. Estos, fueron saturados mediante humectación gradual por medio de ascenso capilar de agua con el objetivo de evitar inclusiones de aire en los poros del suelo. La saturación tomó aproximadamente dos días. Posteriormente, las muestras fueron equilibradas a los potenciales mátricos de -10, -20, -30 hPa y -60 hPa en bandejas de arena (1 hPa = 1 cm columna de agua), -150, -300, -500 hPa por medio de platos cerámicos en una olla de presión. Una vez que las muestras alcanzaron un equilibrio con el potencial mátrico aplicado, se determinó el contenido gravimétrico de agua por medio de pesaje (HARTGE y HORN, 1991).

3.2.3.2.5 Determinación de la capacidad de soporte. Para determinar la capacidad de soporte de los suelos y su resiliencia mecánica se utilizó un odómetro. Las muestras de suelo sin disturbar fueron, previamente saturadas por ascenso capilar de agua y equilibradas hasta 60 hPa de tensión, luego las muestras fueron pesadas para determinar su contenido de agua y capacidad de aire (Porosidad total – agua retenida a 60 hPa de tensión) para, finalmente, medir la conductividad de aire (KI) antes del ensayo de consolidación.

Las muestras de suelo sin disturbar fueron instaladas en el odómetro y ajustadas a un anillo odométrico. Se aplicaron cargas de 1; 6,25; 12,5; 25; 50; 100; 200 y 400 kPa, dejando actuar cada carga por un espacio de seis minutos, llevándose un registro de la deformación vertical ocurrida con un comparador micrométrico. Luego, se procedió a realizar las descargas, las cuales correspondieron a: de 400 a 200; de 200 a 100; de 100 a 50; de 50 a 6,25; de 6,25 a 1 y de 1 a 0 kPa, efectuándose lecturas de la recuperación vertical del suelo, durante seis minutos para cada proceso de descarga.

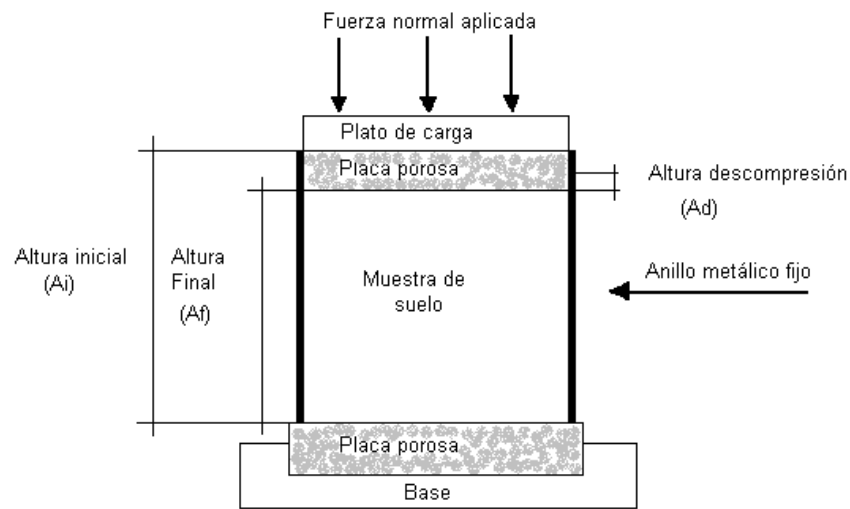


FIGURA 12 Esquema celda odómetro.

FUENTE: Adaptado de BERLI et al. (2000)

En base a la información recolectada se determinó el Coeficiente de Extensividad Lineal (COEL) de la manera que se indica a continuación (Figura 12).

$$\text{COEL}_c = (A_i - A_f) / A_f \quad (3.2)$$

$$\text{COEL}_d = (A_f - A_d) / A_f \quad (3.3)$$

El coeficiente de extensividad lineal de compresión (COEL_c) indica la deformación que sufre el suelo durante la compactación, mientras que el de descompresión (COEL_d) corresponde a la recuperación del suelo, por lo tanto es un índice de resiliencia mecánica de las muestras de suelo analizadas (DÖRNER *et al.*, 2009).

Para evaluar la capacidad de soporte se utilizó el método gráfico de Casagrande (RICO y DEL CASTILLO, 1978). El cual se describe a continuación (Figura 13).

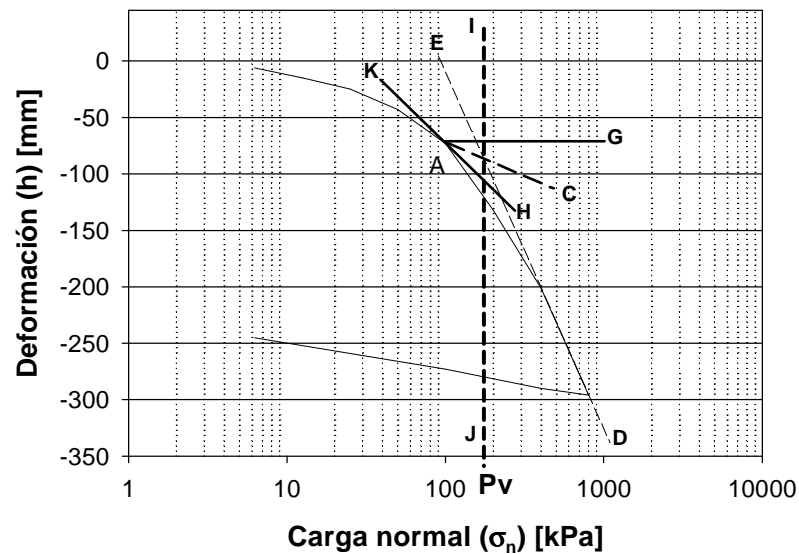


FIGURA 13 Curva de consolidación.

FUENTE: RICO y DEL CASTILLO (1978).

Donde:

A= punto de mayor curvatura; KH= tangente en A; G= horizontal en A; C= bisectriz en el ángulo GH; ED= tramo recto de la etapa de compresión; IJ= prolongación vertical de B.

Una vez culminado el análisis, se pesaron las muestras nuevamente y se volvió a determinar la conductividad de aire (KI).

3.2.3.2.6 Conductividad de aire (KI). Para determinar la conductividad de aire las muestras no disturbadas de suelo fueron equilibradas a una tensión de -60 hPa. Luego éstas fueron pesadas y se midió KI mediante el método de flujo constante de aire, en el cual se aplicó una diferencia de presión de 1 hPa para preservar el flujo laminar ascendente constante a través de la muestra de suelo, según lo descrito en DÖRNER y HORN (2006). Cada medición se repitió tres veces y se registró cada vez la temperatura ambiente y la presión atmosférica. Se midió KI a cada una de las muestras antes y después de ser sometidas al ensayo de consolidación. Para la determinación de la conductividad de aire (KI) se utilizó la siguiente fórmula:

$$Kl = \rho l * g * \left(\frac{\Delta V * L}{\Delta t * \Delta p * A} \right) \quad [\text{m/s}] \quad (3.4)$$

Donde:

Kl = conductividad de aire; ρl = densidad del aire durante la medición [kg/m^3]; g = aceleración de gravedad = 9,81 [m/s^2]; V = volumen de aire que fluye en la muestra durante el tiempo t [m^3]; L = longitud del cilindro [m]; p = presión [hPa]; A = área del cilindro [m^2]; t = tiempo.

3.2.3.2.7 Resiliencia funcional. La resiliencia funcional se determinó, según lo descrito en DÖRNER *et al.* (2009), de acuerdo a la habilidad del suelo para recuperar su capacidad de conducir aire de acuerdo a:

$$RF = Ka(dC) / Ka(aC) \quad (3.5)$$

Donde:

Ka = permeabilidad de aire; dC = después consolidación; aC = antes consolidación.

Para ello se determinó previamente el valor de permeabilidad de aire (Ka) de las muestras de suelo en base a los valores ya calculados de conductividad de aire (Kl), mediante la siguiente ecuación:

$$Ka = Kl * \frac{\eta}{\rho l * g} \quad [\text{cm/s}] \quad (3.6)$$

Donde:

Ka = permeabilidad de aire (cm/s); η = viscosidad de aire (g/(s*cm)); ρl = densidad del aire durante la medición [kg/m^3].

3.2.3.2.8 Densidad aparente. Luego de los ensayos anteriormente descritos, las muestras de volumen conocido fueron secadas a 105°C por 24 horas para determinar la densidad aparente del suelo (BLAKE y HARTGE, 1986). Posteriormente, se utilizó la siguiente fórmula para la determinación la densidad aparente:

$$Da = \frac{P_{sc} - P_c}{V_c} \quad [\text{g/cm}^3] \quad (3.7)$$

Donde:

Da = densidad aparente (g/cm^3); P_{sc} = peso del suelo seco + cilindro (g); P_c = peso cilindro; V_c = volumen del cilindro (cm^3).

3.2.3.3 Determinación de la resistencia mecánica de los agregados. En suelos donde las partículas están agregadas, el diseño y la perdurabilidad del espacio poroso dependen en gran medida, de la forma, tamaño, distribución y estabilidad de los agregados (CABRIA *et al.* 2002), es así que determinar la densidad y la resistencia mecánica de los agregados son factores útiles para evaluar si el manejo al cual es sometido el suelo mejora o no las propiedades de éste.

3.2.3.3.1 Tratamiento de los agregados. Los agregados fueron saturados por ascenso capilar de agua, para luego ser equilibrados a distintos potenciales mátricos correspondientes a capacidad de aire (60 hPa sobre una bandeja de arena con control del nivel freático; $n=20$) y secos al aire a 20°C (pF 6; $n=20$) y 30°C (pF 6,2; $n=20$).

Una vez alcanzado el equilibrio hidrostático, se procedió a determinar el diámetro medio de cada uno, luego se determinó la resistencia mecánica del agregado.

3.2.3.3.2 Diámetro medio. Para el cálculo del diámetro medio de los agregados se procedió a determinar su longitud en tres direcciones perpendiculares la una de la otra, fijando éstas en la forma más representativa del agregado. Luego se promediaron para obtener un diámetro medio.

3.2.3.3.3 Crushing test. El análisis se realizó con los agregados equilibrados a distintas tensiones de agua (60, 330 y 30.000 hPa).

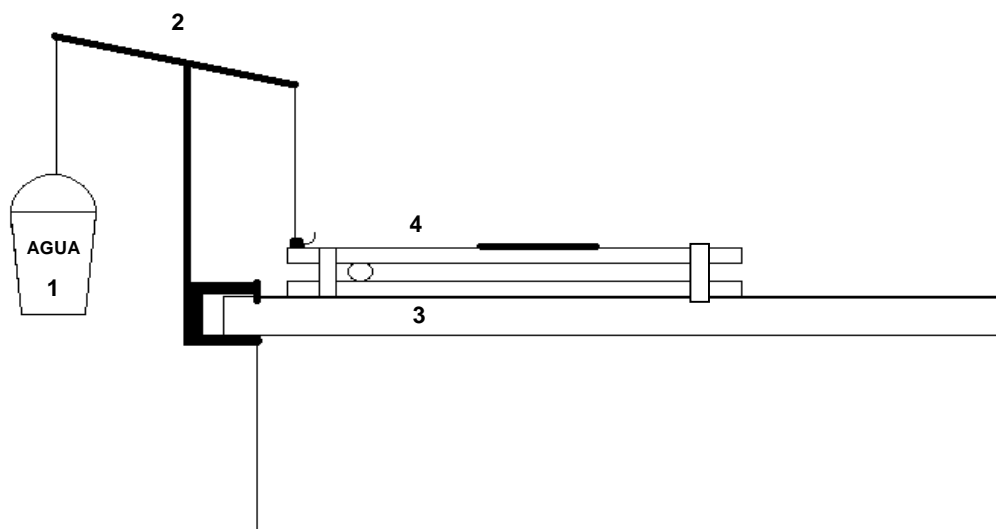


FIGURA 14 Esquema del instrumento para realizar el “crushing test”.

La Figura 14 muestra un esquema del instrumento para determinar el “crushing test”. Mediante la incorporación de agua en el recipiente (1), se ejerce una fuerza que es transmitida mediante la palanca (2) hacia la barra de aluminio (3), la que sube y aplasta el agregado (4).

La cantidad de agua utilizada (kg) permite calcular la fuerza que se requirió para romper el agregado, por medio de la siguiente fórmula:

$$F = Agua * \left(\frac{Bm}{Ba} \right) * 9.81 \quad [N] \quad (3.8)$$

Donde:

Bm y Ba: relación de masas entre el brazo masa (49,4) y brazo agregado (42,8)= 1,154

El área de los agregados se determinó a partir de su diámetro promedio según la siguiente fórmula:

$$A = \frac{(\pi * d^2)}{4} \quad [m^2] \quad (3.9)$$

La resistencia mecánica de los agregados (T_s) es una función de la fuerza aplicada (F) y el área de acción de la fuerza (A). De acuerdo a DEXTER *et al.* (1985), tenemos:

$$T_s = \frac{F}{A} \quad [\text{kPa}] \quad (3.10)$$

3.2.3.3.4 Densidad aparente. La determinación de la densidad aparente de los agregados, se realizó por medio de pesaje sumergido siguiendo el principio de Arquímedes. Para ello los agregados fueron sumergidos en SARAN F310, un líquido de densidad conocida, utilizado para caracterizar la contracción de los agregados, ya que permite la evaporación del agua, se deforma junto con la contracción del suelo, evitando el ingreso de agua al agregado cuando se realiza el pesaje sumergido. Los agregados bañados en SARAN F310 se secaron al aire a temperatura ambiente y se midió periódicamente su peso y volumen, luego de cuatro semanas de medición estos fueron colocados en una estufa a 105°C por 24 horas, después se pesaron y fueron sumergidos en agua para determinar su volumen por última vez. Una vez obtenido esto, se calculó su densidad dividiendo el peso del agregado por el volumen determinado según el método descrito por BLAKE y HARTGE (1986).

3.2.4 Análisis muestras de pradera. Los análisis fueron llevados a cabo en el laboratorio de forrajeras del Instituto de Producción Animal. Las muestras de praderas fueron analizadas para determinar su composición botánica, materia seca producida por ha y por especie, siguiendo la metodología que se indica a continuación. El material recogido fue separado en forma manual por especie, luego las muestras fueron secadas en un horno de aire forzado a 60°C por 48 horas o hasta alcanzar peso constante. Luego se obtuvo el peso de la materia seca por especie y total de la muestra, con lo que se realizó la estimación de la composición botánica en porcentaje.

3.2 Diseño experimental y análisis estadístico

Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con tres bloques. Los resultados fueron analizados para el cumplimiento de la distribución normal y homogeneidad de varianza. Luego se realizó un ANDEVA, y cuando existieron

diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0,05$), se separaron las medias usando el test de LSD.

Para agrupar las especies botánicas que componían las praderas, se aplicó un análisis de conglomerados a través del criterio de los promedios estandarizados, usando el pseudo t^2 para determinar la línea de corte en el árbol generado. Las relaciones entre las variables del suelo y los grupos de especies se exploraron aplicando el análisis de componentes principales (ACP) (HAIR *et al.*, 2006).

4 PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Suelos y su manejo

La primera parte de los resultados se referirá a las variables del suelo evaluadas.

4.1.1 Efecto del manejo del suelo sobre algunas de sus variables químicas. El Cuadro 8 presenta los resultados de los análisis químicos de los distintos tratamientos: pradera degradada (PD), pradera mejorada (PM) y bosque (B).

CUADRO 8 Propiedades químicas del suelo según manejo.

Variable	PD	PM	B
pH en agua (1:2,5)	5,74 ± 0,04 c	5,88 ± 0,01 b	6,18 ± 0,06 a
P-Olsen (ppm)	2,19 ± 0,09 a	2,65 ± 0,22 a	1,93 ± 0,40 a
Al-extractable (ppm)	1087,93 ± 16,88 a	1023,77 ± 24,85 a	729,32 ± 152,34 a
N-mineral (ppm)	19,13 ± 5,05 a	25,90 ± 2,46 a	23,10 ± 1,07 a
Alofán (%)	5,13 ± 0,28 c	5,65 ± 0,11 b	6,60 ± 0,10 a
Materia Orgánica (%)	16,10 ± 1,09 a	14,81 ± 0,54 a	18,62 ± 1,43 a
COS (%)	9,34 ± 0,63 a	8,59 ± 0,31 a	10,80 ± 0,83 a

*Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p \leq 0,05$). Valores promedios \pm 1 error estándar ($n=3$).

* Simbología: COS= Carbono orgánico del suelo

En general, las propiedades químicas medidas muestran niveles de fertilidad aceptables para suelos trumaos, salvo los niveles de fósforo disponible, los que están muy por debajo de los niveles mínimos (12 ppm P-Olsen) necesarios para el óptimo desarrollo de una pradera de calidad, lo que nos indica que tanto el suelo como las praderas en estudio se encuentran degradados. Con respecto a los niveles de fósforo disponible, si bien no hay diferencias estadísticamente significativas entre ellos, todos presentan niveles ≤ 5 , considerados muy bajos (ROJAS 2009).

De las variables evaluadas tanto pH como Alofán presentan diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p \leq 0,05$). El valor de pH que

presentan los suelos es un indicador del estado del suelo y refleja el grado de acidificación producido por los manejos realizados sobre ellos. Según INIA (2006), se utiliza el pH en agua (pHw, o sólo pH, medido en una relación suelo agua de 1:2,5) como criterio de diagnóstico de la acidez de los suelos y la potencial toxicidad por Al en solución para los cultivos. Por lo tanto, las diferencias observadas en el pH de los distintos tratamientos estarían reflejando los distintos manejos que se han realizado sobre estos suelos, siendo PD el manejo más acidificante y B el menos acidificante.

En estudios realizados en Chile se ha establecido que, para realizar una adecuada caracterización de los suelos derivados de materiales volcánicos, debe utilizarse como indicador la reactividad del suelo, en este caso el contenido de Al-extractable (en acetato de amonio pH 4,8), ya que sus características, más que obedecer al contenido de arcilla, obedecen a la reactividad del tipo de arcilla. Es así que, MARABOLI (2008), determinó que suelos que presentan niveles de Al-extractable entre 500 y 1000 ppm, pueden ser clasificados dentro de un mismo grupo de suelos, pardo arcillosos o transicionales (trumaos valores >1000 ppm). Es así, que los suelos analizados corresponderían a un mismo grupo, en base a su contenido de Al-extractable. A partir de ello, se puede afirmar que las diferencias observadas entre los tratamientos se deben al manejo del suelo y no a que éstos pertenezcan a distintos tipos.

4.1.2 Efecto del manejo del suelo sobre sus propiedades físicas Los resultados de los análisis físicos realizados en terreno y en laboratorio son los siguientes.

4.1.2.1 Textura del suelo. Del Cuadro 9 se desprende que el suelo corresponde a un franco arcillo arenoso lo que coincide con lo descrito por TOSSO (1985).

CUADRO 9 Distribución textural del suelo analizado.

Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)
60,64 ± 0,51	18,75 ± 1,76	20,61 ± 1,85

* Valores promedios ± 1 error estándar (n=3).

4.1.2.2 Resistencia a la penetración. La Figura 15 presenta los valores promedio de la resistencia a la penetración (RP) determinados en los tres tratamientos estudiados. A pesar que la resistencia a la penetración en PD es ligeramente superior a PM, estas diferencias no son estadísticamente significativas. El suelo bajo bosque (B) al estar sometido a una menor intervención y tráfico presenta valores de resistencia a la penetración estadísticamente inferiores al compararlo con ambas praderas ($p \leq 0,001$). Suelos escasamente intervenidos exhiben una baja RP y baja capacidad de soporte (ELLIES, 1995). Estos resultados concuerdan con los obtenidos por ELLIES (1995) en un ensayo en el cual se evaluaron los efectos del manejo sobre las propiedades volumétricas y mecánicas en un suelo Hapludand (serie Malihue) sometido a manejo forestal y otro Palehumult (serie Cudico) sometido a un manejo agrícola con un suelo bajo bosque nativo como referencia. En este estudio se concluyó que RP aumentó con la intensidad de uso en ambos suelos. El incremento en la firmeza del suelo Trumao se asociaría a un incremento en la cohesión del suelo y de la densidad aparente por efecto del uso.

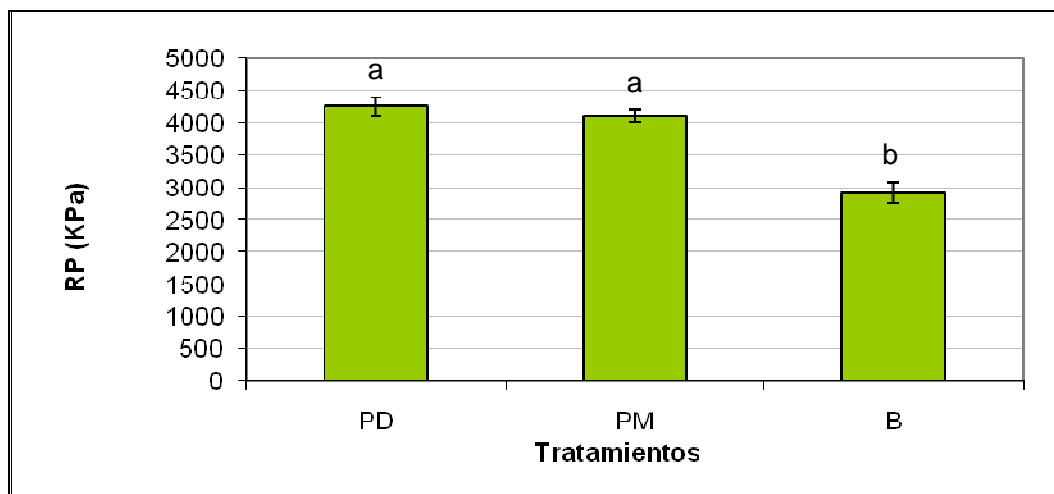


FIGURA 15 Efecto del manejo del suelo sobre la resistencia a la penetración (RP). Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p \leq 0,001$). Barras indican ± 1 error estándar (PD y PM $n = 164$; B $n = 30$).

Los manejos o usos del suelo que deterioran la sustentabilidad de la estructura, se reflejan en un aumento de la consolidación y de la resistencia a la penetración, lo cual

afecta el desarrollo radical (ELLIES y CONTRERAS 1997; BORGHEI *et al.*, 2008). Un aumento en la dureza del suelo, causada por la compactación del mismo, afecta la habilidad de las raíces para penetrar el suelo, lo cual puede reducir sustancialmente los rendimientos de los cultivos (GREGORY *et al.*, 2007). Los mismos autores señalan que, a pesar de que las raíces presentan una resistencia a la penetración menor a la registrada por un penetrómetro, valores persistentes superiores a 3 MPa en suelos altamente compactados durante la época de crecimiento, inhiben la elongación de las raíces y el crecimiento de los tallos. Esta reducción en los rendimientos se debería tanto al impedimento mecánico de las raíces, como a la restricción del acceso del sistema radical al agua y nutrientes presentes en los suelos (CLARK *et al.*, 2003).

La resistencia a la penetración de los suelos es afectada por el contenido de humedad, presentando una relación inversamente proporcional, es así, que a medida que el contenido de humedad aumenta, la resistencia a la penetración disminuye (FERRERO *et al.*, 2005). ELLIES *et al.* (1993) aclaran que las diferencias en la resistencia a la penetración causadas por la humedad se acentúan principalmente cuando se compara un mismo suelo en época invernal y en época estival. McKeyes (1985) citado por ELLIES *et al.* (1993), explican que este fenómeno se acentúa principalmente en suelos de textura fina, donde la resistencia a la penetración aumenta a medida que el suelo se seca, debido a un incremento de la cohesión, por efecto del uso, causando probablemente un aumento de la densidad aparente, aunque en condiciones de extrema sequía el suelo tiende a desagregarse, con lo cual la resistencia a la penetración disminuye.

4.1.2.3 Cantidad y distribución del volumen de poros. En la Figura 16 se observa la diferencia en la distribución de las porosidades de drenaje rápido y lento de los tratamientos. Sólo se observaron diferencias estadísticamente significativas entre las praderas y el bosque en los poros de drenaje rápido (PDR), siendo B el que presentó la mayor proporción de PDR. Con respecto a los poros de drenaje lento (PDL), no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. Lo anterior indicaría que, debido al menor uso y tráfico del suelo de B, éste presentaría una mayor proporción de macroporos. Un cambio de uso de suelo provoca un incremento en la densidad aparente y por ende un cambio en su estructura, debido a

esto, aumenta la estabilidad mecánica del suelo en desmedro de su capacidad de almacenar aire (CA) favoreciendo la capacidad de retención de agua aprovechable para las plantas. El comportamiento de los suelos derivados de cenizas volcánicas parece ser particular, ya que, generalmente, un incremento en la densidad aparente en suelos con altos contenidos de arcilla, conduce a una reducción de su capacidad de almacenar agua con una pérdida importante de los poros de aireación. Este comportamiento de los suelos derivados de cenizas volcánicas podría deberse a sus altos contenidos de alofán, mineral no cristalino constituido por esferas porosas (DÖRNER *et al.*, 2009).

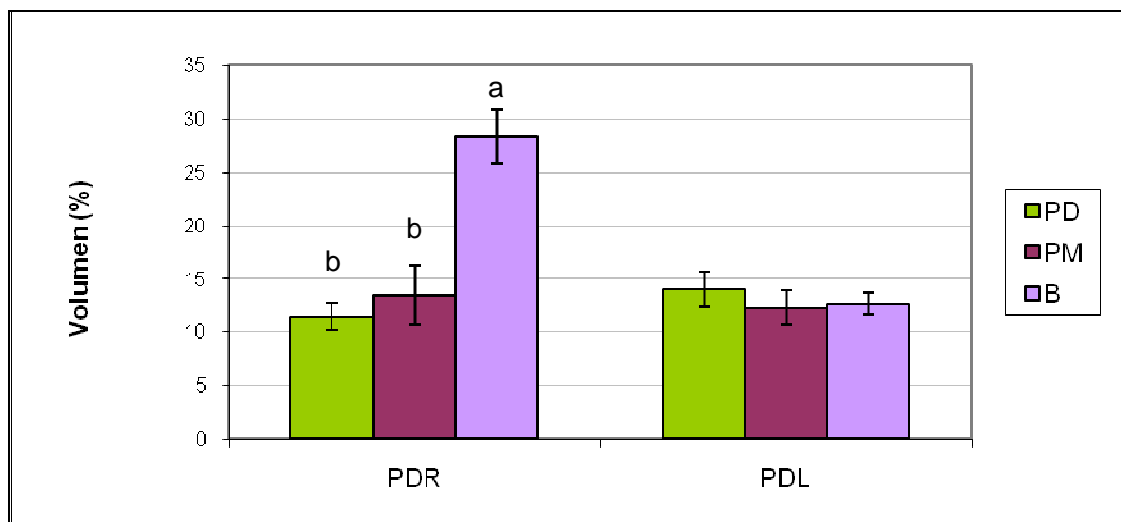


FIGURA 16 Distribución del volumen de poros de drenaje rápido (PDR) y poros de drenaje lento (PDL) según tratamiento. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p \leq 0,001$). Barras indican ± 1 error estándar ($n = 4$).

La porosidad del suelo se divide en poros texturales y poros estructurales, la porosidad textural es afectada someramente con el manejo del suelo, sin embargo los poros estructurales son muy sensibles (DEXTER, 2004). Con el uso disminuye la macroporosidad (estructural), se produce un incremento de la porosidad media variando en menor medida la porosidad fina (textural) (ELLIES, 1995; RICHARD *et al.*, 2001). RICHARD *et al.* (2001) en un estudio realizado para determinar el efecto de la compactación en la porosidad de un suelo arcilloso y su influencia en la conductividad

hidráulica no saturada, encontraron que, en esos suelos, los poros texturales no fueron afectados por la compactación. De igual modo DÖRNER *et al.* (2009), ELLIES (1995) y ELLIES *et al.* (2000), encontraron resultados similares en Andisoles del sur de Chile.

El efecto del manejo se manifiesta en cambios cualitativos y cuantitativos que experimentan la distribución y la morfología del espacio poroso. Cuando ocurre la consolidación de un suelo, debido al tráfico de maquinaria, pisoteo animal o laboreo, su magnitud dependerá de la cantidad, oportunidad y frecuencia de cargas a las cuales éste haya sido sometido y se refleja en un cambio en la morfología del sistema poroso (ELLIES, 1995).

DEXTER (2004) indica que la degradación de las propiedades físicas de los suelos siempre conlleva un cambio en la forma de las curvas de retención de agua, en general disminuye la pendiente de la curva, es así que, curvas con una menor pendiente corresponderían a suelos sin estructura y, curvas con pendientes mayores corresponden a suelos estructurados y con una gran cantidad de poros.

4.1.2.4 Capacidad de Soporte. Los resultados de las pruebas de capacidad de soporte (CS) presentados en la Figura 17, arrojaron diferencias estadísticamente significativas entre todos los tratamientos ($p \leq 0,001$). Esto confirma que, debido al uso y manejo histórico que se le ha dado a cada uno de los suelos, estos presentan un comportamiento diferente frente a la acción de una carga, o sea, que presentan diferencias en su estabilidad estructural, las que siguen la siguiente tendencia $PD > PM > B$.

La capacidad de soporte (CS) indica la máxima carga a la cual ha sido sometido un suelo a lo largo de su historia, es así que al aplicar cargas menores a CS de un suelo, éste se deforma pero se recupera elásticamente, mientras que cuando las cargas aplicadas son mayores a CS, el suelo se deforma irreversiblemente (GREGORY *et al.*, 2006). ELLIES *et al.* (2000) indican que el uso que se le da a los suelos influye directamente en el grado de compactación que estos pueden sufrir. Es así que, cambios en el uso que no implican la aplicación de altas cargas producen sólo un pequeño aumento en la firmeza del suelo mientras que, cambios como pisoteo animal crean valores más altos de cohesión entre las partículas y de capacidad de soporte, como consecuencia de un reordenamiento de las partículas y a cambios en la forma del material volcánico que lo constituye. Los mismos autores concluyen que la mayor

compactación de los suelos ocurre inmediatamente luego de que el bosque nativo es eliminado, seguido por una menor compactación, la cual dependerá del tipo de manejo de suelo que se aplique y del desarrollo pedológico de los mismos. Ésto concuerda con la información entregada en la Figura 17, en la que se observa claramente que B posee la menor capacidad de soporte seguida por PM, suelo sometido a un cambio de manejo, lo que estaría reflejando el efecto de este cambio en las propiedades físicas de esta pradera.

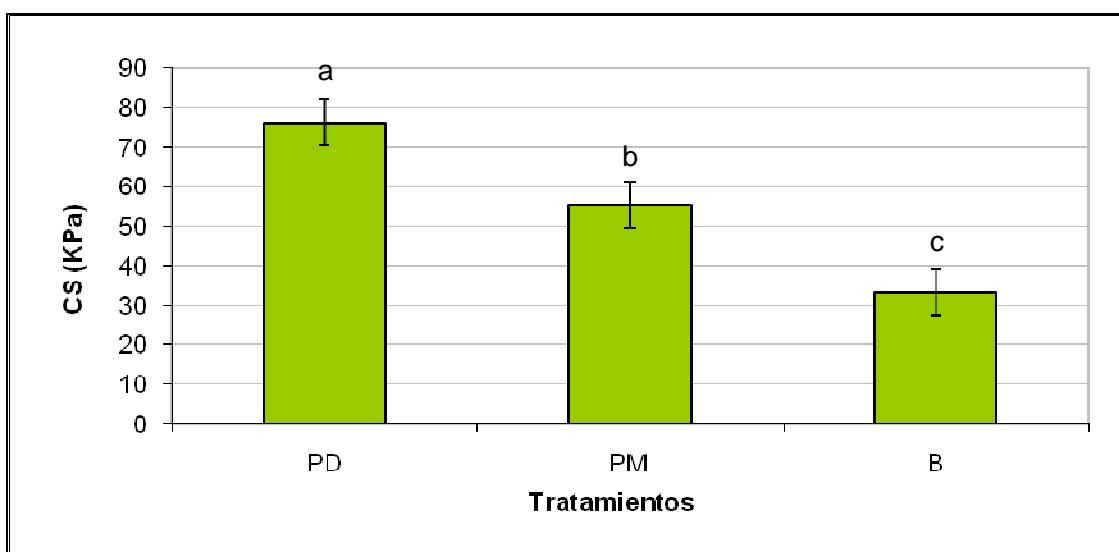


FIGURA 17 Efecto del manejo del suelo sobre su capacidad de soporte (CS)
Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas
entre los tratamientos ($p \leq 0,001$). Barras indican ± 1 error estándar
($n = 10$).

Diversos autores señalan que la presión ejercida por ovinos varía entre 66 y 83 kPa, mientras que la presión ejercida por el ganado bovino estaría entre 138 y 192 kPa, y que estos valores se duplicarían cuando el animal está en movimiento (Bluden *et al.*, (1994), citados por GREENWOOD y MCKENZIE (2001); Willatt and Pullar (1983), citados por DREWRY (2006)). La capacidad de soporte medida a un potencial mátrico de -60 hPa fue menor a la presión ejercida por el ganado, lo que explicaría los cambios estructurales debidos a los distintos manejos aplicados a este suelo durante su historia de manejo.

La capacidad de soporte está muy ligada a la densidad aparente y con ello al manejo del suelo (ELLIES y CONTRERAS, 1997). En este caso, los valores de capacidad de soporte concuerdan con las densidades aparentes (Figura 18) y resistencia a la penetración (Figura 15) observadas, ya que, según HORN (1995), el aumento de la resistencia ocurre tanto por el mayor número de puntos de contacto, en función del arreglo de los agregados como por la mayor resistencia de estos. Es así que suelos con altas densidades aparentes y resistencia a la penetración presentan mayores puntos de contacto entre las partículas que los conforman, aumentando así su capacidad de soporte. El uso del suelo aumenta su consolidación y, con ello, las tensiones internas que pueden modificar su estructura. Un estado más tenso promueve una mayor firmeza, la que permite más resistencia a la penetración (ELLIES *et al.*, 1993). DÖRNER *et al.* (2009) en un estudio realizado en un Typic Hapludand (serie Pelchuquín) del sur de Chile para evaluar los efectos del cambio de uso de suelo en algunas de sus propiedades físicas, encontraron que, un cambio en el uso de los suelos lleva a un aumento en su capacidad de soporte y en la cohesión entre los agregados a una profundidad de 5 y 20 cm.

SEGUEL *et al.* (2002) encontraron valores de preconsolidación en Andisoles (series Osorno, Pemehue, Fresia y Meirengo) similares a los de este ensayo, y establecieron que, independiente del potencial mátrico y de la profundidad, los sitios bajo pradera tienen una mayor capacidad de soporte que aquellos bajo bosque y, que sus resultados se correlacionaron bien con el estado estructural y de manejo de los suelos.

4.1.2.5 Densidad aparente (D_a) antes y después del ensayo de consolidación. En la Figura 18 se presentan las diferentes densidades aparentes de las muestras de suelos de cada uno de los tratamientos determinadas antes (D_a a/C) y después del ensayo de consolidación (D_a d/C).

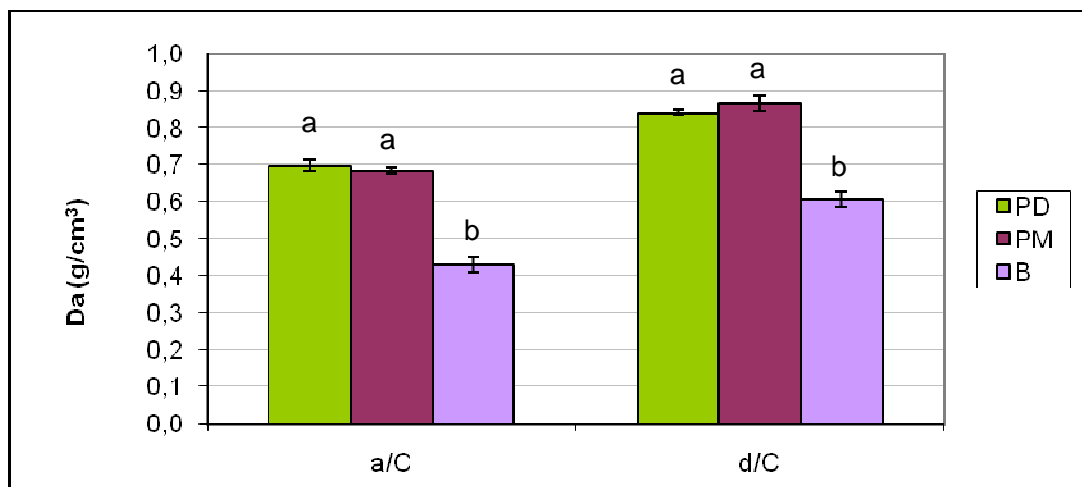


FIGURA 18 Densidad aparente (D_a) para cada tratamiento antes y después del ensayo de consolidación. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p \leq 0,001$). Barras indican ± 1 error estándar ($n = 10$).

Con respecto a la D_a determinada antes del ensayo de consolidación, como se observa en la Figura 18 no existen diferencias estadísticamente significativas entre PD y PM, aunque se sigue observando la tendencia $PD > PM$. Las diferencias estadísticamente significativas se observan entre ambas praderas (PD y PM) y B. Los valores máximos alcanzados luego de la consolidación, tanto PD como PM alcanzan valores muy cercanos a $0,9 \text{ g/cm}^3$, sin embargo B sólo alcanza una densidad aparente máxima de $0,69 \text{ g/cm}^3$. Cabe destacar el hecho de que, la relación entre las densidades aparentes del suelo de cada tratamiento, se mantiene hasta después del ensayo de consolidación. Según la literatura, esto se debe a un mayor contenido de materia orgánica (MO) en los suelos de B que estaría actuando como un colchón, impidiendo una mayor compactación (ZHANG *et al.*, 2005; TABOADA 2007). ELLIES *et al.*, (2000), HUYGENS *et al.*, (2005), DÖRNER *et al.* (2009), encontraron la misma tendencia, siendo la pradera la que presenta mayores valores de densidad aparente y el bosque los valores menores, debido al tráfico animal. Los bajos valores de densidad aparente encontrados corresponden a una característica ándica (SOIL SURVEY STAFF, 1990).

4.1.2.6 Conductividad de aire (KI) antes y después del ensayo de consolidación.

La conductividad de aire de las muestras de suelo, es decir la capacidad que éstas tienen para conducir aire a través de sus poros por convección se presenta en la Figura 19.

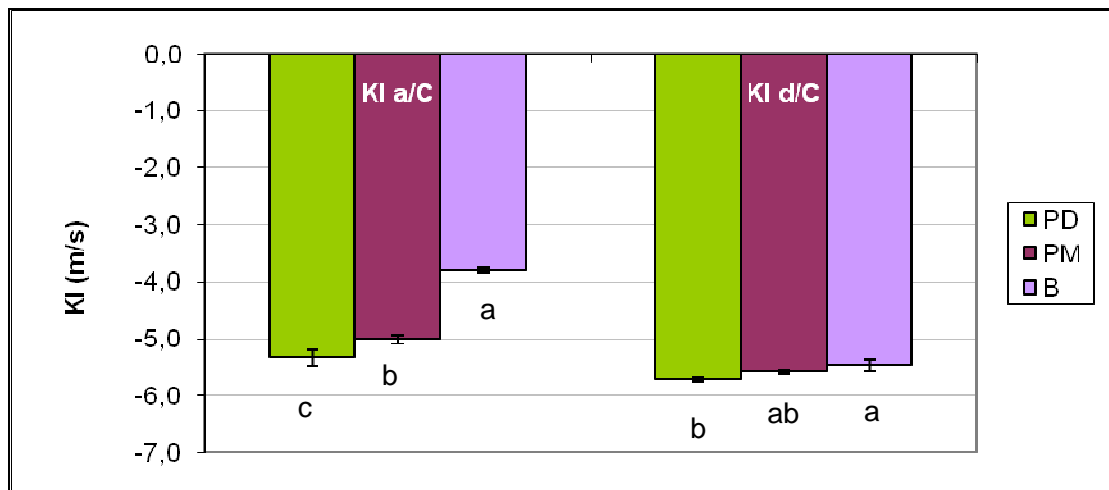


FIGURA 19 Conductividad de aire para cada tratamiento antes (KI a/C) y después (KI d/C) del ensayo de consolidación. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (KI a/C $p \leq 0,001$; KI d/C $p \leq 0,05$). Barras indican ± 1 error estándar ($n = 10$).

Al comparar KI a/C entre tratamientos se presentan diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0,001$) entre cada uno de ellos siguiendo la siguiente tendencia $B > PM > PD$. Luego de aplicar una presión, KI disminuye significativamente en todos los tratamientos. Al comparar KI d/C entre los tratamientos las grandes diferencias observadas antes del ensayo de consolidación desaparecen. Es así que se observan similitudes entre B y PM y entre PM y PD, sin embargo existen diferencias estadísticamente significativas entre B y PD ($p \leq 0,05$). La reducción de KI después del ensayo de consolidación se debe a una disminución en la cantidad y continuidad de los poros estructurales de las muestras de suelo tal como plantean DÖRNER *et al.* (2009). Según se observa en el Figura 19, KI a/C de ambas praderas es similar (-5,34 y -5,01 m/s respectivamente) lo que refleja que ambas poseen valores de densidad aparente

(Figura 18), porosidad total de macroporos (Figura 16) y una continuidad entre sus poros semejante, lo cual deriva de su historial de manejo común. Sin embargo, se observa una tendencia al aumento de KI en PM, lo que coincide con las tendencias observadas para densidad aparente y macroporos, debido al cambio de manejo que este suelo ha experimentado en los últimos años. En el caso de B, KI a/C es significativamente mayor que KI a/C de las praderas (-3,8 m/s) lo que reflejaría que posee un mayor volumen de poros gruesos (Figura 16) y un menor grado de compactación (Figura 17). Con respecto a los valores de KI d/C en todos los casos se observa una reducción en la conductividad de aire presentando, luego de la compactación, todas las muestras valores similares, lo que se debería a una disminución en la cantidad de poros estructurales y en su continuidad. DÖRNER *et al.* (2007) establecieron que el sobrelaboreo del suelo provoca no sólo la compactación del mismo, sino que también la generación de vías preferenciales de flujo de agua o aire, alterando así, la conductividad de aire. Si se comparan los resultados de Da con aquellos obtenidos en KI, destaca que la relación entre los tratamientos se mantiene en el caso de la densidad aparente antes y después del ensayo de consolidación, lo que no ocurre en el caso de la conductividad hidráulica. Esto podría reflejar el hecho de que, si bien estos suelos son capaces de recuperar en parte el volumen perdido al compactarse, no recuperan así, la conductividad y funcionalidad de los poros que contienen (DÖRNER *et al.*, 2007).

4.1.2.7 Coeficientes de extensividad lineal y resiliencia mecánica. La resiliencia mecánica de un suelo, se refiere a la capacidad de éstos de recuperar su volumen luego de sufrir una compactación. La Figura 20 presenta las diferencias existentes entre los tratamientos con respecto a los coeficientes de extensividad lineal de compresión (COEL_c) y de descompresión (COEL_d). Estos coeficientes son un índice que muestra la capacidad de estos suelos de comprimirse y luego, de descomprimirse, después del asentamiento (DÖRNER *et al.*, 2009). Como se observa en la Figura 20 a), no existieron diferencias estadísticamente significativas entre las praderas, sin embargo, la deformación registrada bajo bosque fue significativamente mayor. La mayor deformación observada en B se debió a su menor densidad aparente y capacidad de soporte. Los diferentes usos de los suelos afectan la capacidad de deformación, ya que cada uno posee una estabilidad estructural diferente debido a su

grado de compactación originado por su historial de manejo, lo que concuerda con lo registrado para RP, Da y CS.

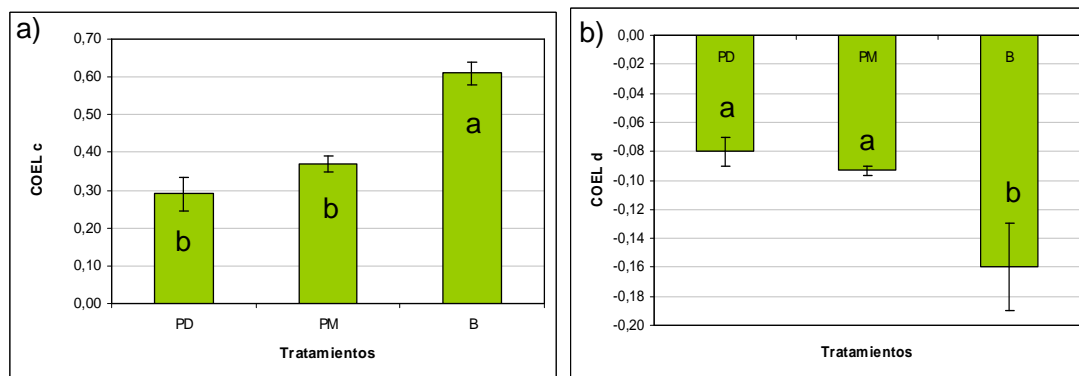


FIGURA 20 Coeficientes de extensividad lineal de compresión (COEL_c) y de descompresión (COEL_d). Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p \leq 0,05$). Barras indican ± 1 error estándar ($n = 10$).

En la Figura 20 b), se aprecia que sólo se encontraron diferencias estadísticamente significativas al comparar las praderas (PD y PM) con los datos obtenidos de B ($p \leq 0,001$). Esto indica que el suelo bajo bosque poseía la mayor capacidad de recuperación luego de sufrir algún tipo de compactación, o sea tenía la mayor resiliencia mecánica de los suelos analizados, lo cual podría deberse también a un mayor contenido de MO en estos suelos (igual que en el caso de la Figura 18), ya que, según la literatura, suelos con un mayor contenido de carbono orgánico (CO) poseen una baja resistencia a la compactación pero también una buena recuperación (KUAN *et al.*, 2007; ZHANG *et al.*, 2005).

Al comparar ambos gráficos, se debe destacar que la recuperación del suelo es 1 orden de magnitud menor que la deformación por compactación.

4.1.2.8 Resiliencia funcional. La resiliencia funcional del suelo se refiere a la capacidad que éstos tienen de recuperar la integridad funcional de sus poros (e.g. la capacidad del sistema poroso para transmitir aire), luego de haber sufrido algún tipo de estrés (DÖRNER *et al.*, 2009). Esta variable se relaciona significativamente con el contenido de alofán que tengan los Andisoles, presentando una relación inversamente

proporcional, es decir, a mayor contenido de alofán menor resiliencia funcional. También se ha establecido una relación entre esta variable y el carbono orgánico del suelo (COS), es así como suelos con un mayor contenido de COS tienen una mayor capacidad para recuperar su integridad funcional (HUYGENS *et al.*, 2005; DÖRNER *et al.*, 2009). En la Figura 21, se aprecia que existen diferencias estadísticamente significativas entre las praderas (PD y PM) y el bosque (B) con respecto a la resiliencia funcional de los poros. Mientras PD y PM poseen valores de resiliencia funcional similares (0,95 y 0,92 respectivamente), la resiliencia funcional de B es menor (0,77), ya que a pesar que el suelo bajo bosque presentó los mayores valores de COS (por lo tanto mayor recuperación de su volumen, Figura 20), hay que tomar en cuenta que los valores de conductividad de aire (KI) son mayores en B, tanto antes como después del ensayo de consolidación. Esto podría reflejar que, a pesar de que el suelo del bosque poseía una alta capacidad de recuperación luego de compactación o resiliencia mecánica, esto no se relaciona con su capacidad de recuperar la funcionalidad de su sistema poroso, es decir la continuidad que existe entre ellos.

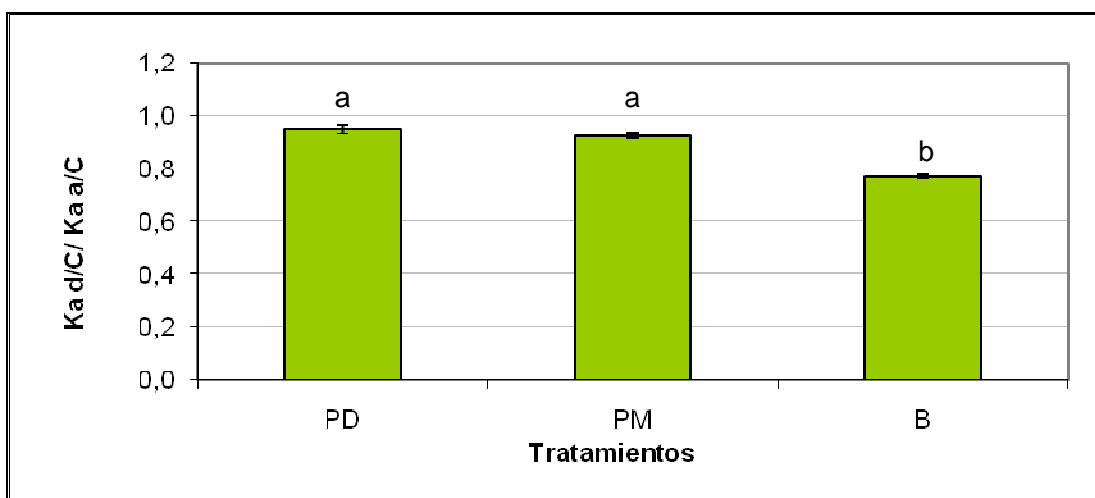


FIGURA 21 Comparación de la resiliencia funcional ($Ka\ d/C / Ka\ a/C$) de los suelos entre tratamientos. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p \leq 0,001$). Barras indican ± 1 error estándar (Resiliencia funcional $n = 10$).

En la Figura 22 se presenta la relación existente entre COS y el contenido de alofán de los suelos y su resiliencia funcional, la tendencia indica que a medida que aumenta el contenido de alofán en los suelos la resiliencia disminuye, el efecto de COS no queda claro en la Figura 22, lo que ratifica el hecho de que, en este caso, el COS no tendría una relación directa con la resiliencia funcional de estos suelos.

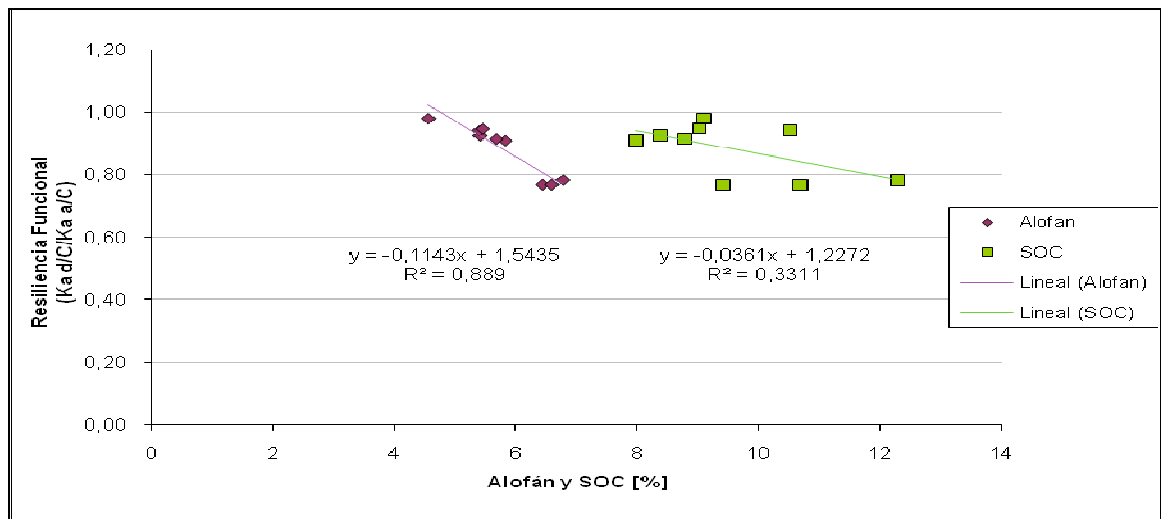


FIGURA 22 Relación entre la resiliencia funcional de los suelos y su contenido de alofán y SOC (% Alofán n= 3; Resiliencia funcional n = 10).

4.1.2.9 Densidad aparente y resistencia de los agregados. A fin de determinar si el cambio en el manejo (PD a PM) ha llevado a mejorar las propiedades del suelo y si, esto se ve reflejado en los agregados que lo constituyen, la Figura 23 presenta la comparación entre los tratamientos de la densidad aparente de los agregados (Da agregados) y del suelo (Da suelo) de los distintos tratamientos. La densidad aparente del suelo es baja ($< 0,9 \text{ g cm}^{-3}$), lo que corresponde a una característica ándica (SOIL SURVEY STAFF, 1990). Sólo a nivel de agregados del suelo se observaron densidades aparentes mayores, presentando valores superiores a los del volumen total de suelo (medido en cilindros), lo que refleja un ordenamiento jerárquico en función de la escala de muestreo tal como lo presentaron DEC *et al.* (2009) en un *Typic Hapludand* (Serie Pelchuquín). Bajo B, se presentan altos niveles de MO, la que se encuentra poco estabilizada (raíces gruesas, hojarasca poco descompuesta) (PEREZ *et al.*, 1991), en comparación a la encontrada bajo PM y PD. Las características cualitativas y cuantitativas de la MO bajo B, confieren al suelo y a los agregados

densidades aparentes menores a su similar bajo P, es decir presentan un mayor volumen poroso (NAVARRO, 2007).

Las diferencias que se observan entre las densidades aparentes (D_a suelo < D_a agregados) se deberían a la porosidad existente entre los agregados. En el caso de B, la diferencia entre ambas densidades aparentes estaría indicando que, en este suelo, existe una mayor porosidad interagregados (número y tamaño de poros). Un cambio estructural del suelo implica un aumento en la densidad aparente y se traduce en una pérdida de la porosidad total y en un incremento de la porosidad fina a expensas de la gruesa (ELLIES, 1995). Estos resultados se condicen con lo observado en la Figura 16 con respecto a la distribución de las porosidades presentes en los tratamientos, donde destaca el mayor volumen de PDR en los suelos del bosque al compararlo con las praderas.

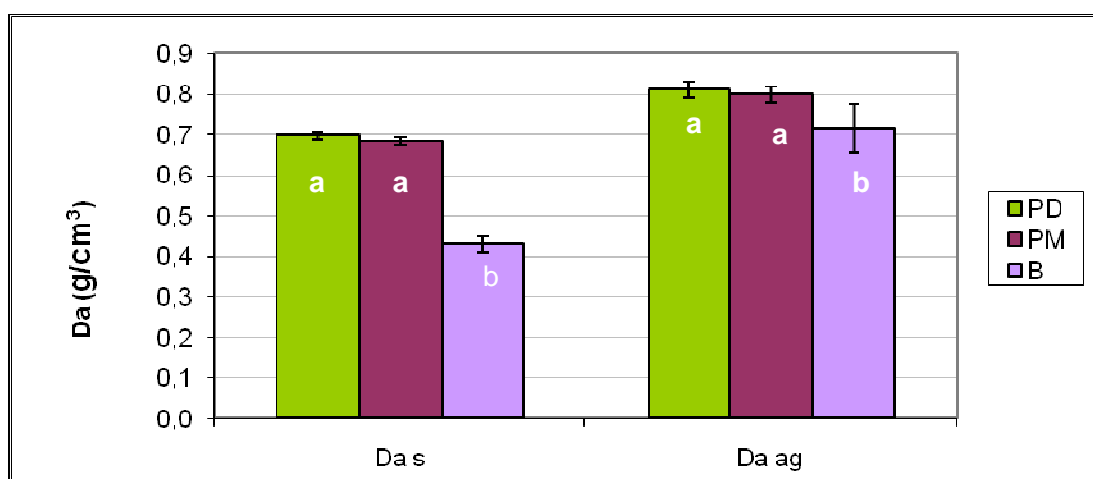


FIGURA 23 Comparación de la densidad aparente de los agregados y del suelo para cada tratamiento. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p \leq 0,001$). Barras indican ± 1 error estándar (D_a s $n=10$; D_a ag $n=8$). Simbología: D_a s= densidad aparente suelo; D_a ag= densidad aparente agregados.

Con respecto a los valores de resistencia de los agregados (R_{Ag}), evaluada a un contenido de humedad correspondiente a -60 hPa de tensión, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. Sin embargo, llama la atención que la tendencia sea $PD > B > PM$ (Figura 24), cuando se hubiese esperado

que los valores menores correspondieran a B. Esto puede deberse al mayor contenido de MO que presenta este tratamiento (B), ya que en este tipo de suelos (Andisol), la MO es el principal agente cementante de los agregados (HUYGENS *et al.*, 2005).

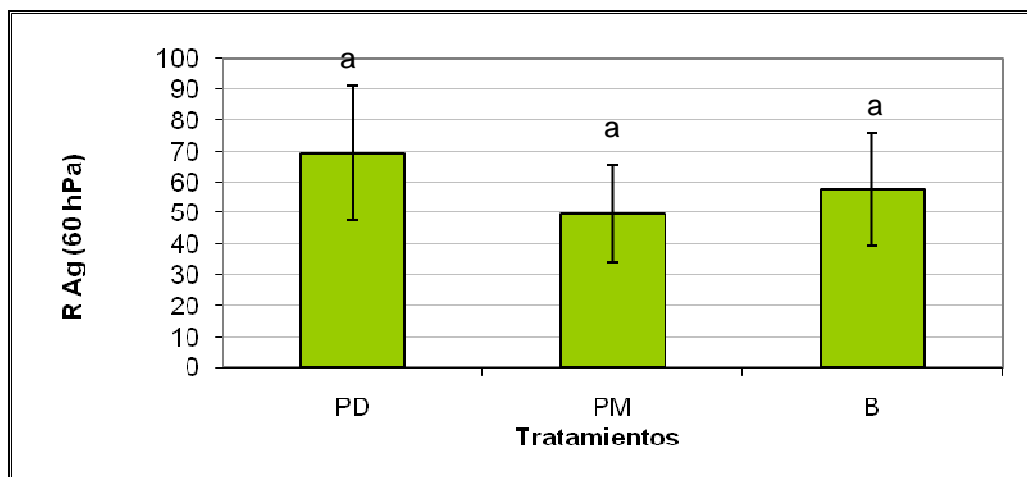


FIGURA 24 Comparación de la resistencia de los agregados (R Ag) por tratamiento. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p \leq 0,001$). Barras indican ± 1 error estándar ($n=10$).

Los agregados de PD son los más resistentes debido a la mayor densidad aparente (por lo tanto mayor número de puntos de contacto). Por otro lado, la mayor resistencia de los agregados de B ($B > PM$) podría atribuirse un mayor contenido de MO, ya que el carbono (C) presente en ella (MO) sirve de fuente de alimento para los microorganismos del suelo que generan agentes cementantes contribuyendo a una mayor estabilidad de los agregados (DENEFF y SIX, 2005; WEI *et al.*, 2006).

En el caso de PM, los valores de resistencia que presentan los agregados podrían deberse a que, gracias al cambio en el manejo de la pradera, los agregados y el suelo en general, ya no se encuentran tan compactados como PD (de hecho presentan una menor densidad aparente, aunque estadísticamente no significativa), esto se ve reflejado en los resultados de CS (Figura 17), donde PM presenta diferencias estadísticamente significativas al compararlo con PD. Pero al mismo tiempo, el historial de uso de este suelo muestra que el contenido de MO ha disminuido debido al constante laboreo y extracción, no permitiendo que los agentes cementantes,

generados por los microorganismos el suelo, influyan sobre la resistencia de los agregados.

4.1.3 Análisis de componentes principales (ACP) para características físicas y químicas de los suelos estudiados (PD, PM y B). Los atributos del suelo fueron analizados a través del ACP. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 25

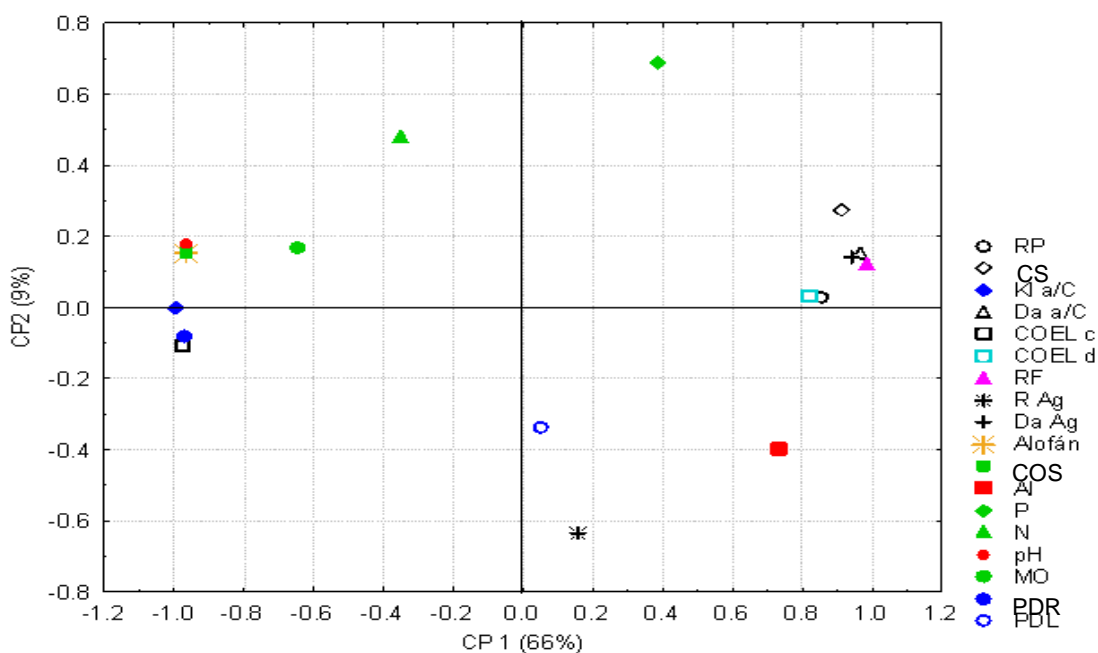


FIGURA 25 Análisis de componentes principales para los aspectos físicos y químicos de los suelos analizados. Simbología: RP= resistencia a la penetración; CS= capacidad de soporte; KI a/C= conductividad de aire antes consolidación; Da a/C= densidad aparente antes consolidación; COEL_c= coeficiente de extensividad lineal de compresión; COEL_d= coeficiente de extensividad lineal de descompresión; RF= resiliencia funcional; R Ag= resistencia agregados; Da Ag= densidad aparente agregados; A lofán= contenido de a lofán; COS= carbono orgánico del suelo; Al= aluminio extractable; P= fósforo Olsen; N= nitrógeno mineral; pH= pH al agua; MO= materia orgánica; PDR =poros de drenaje rápido; PDL= poros de drenaje lento.

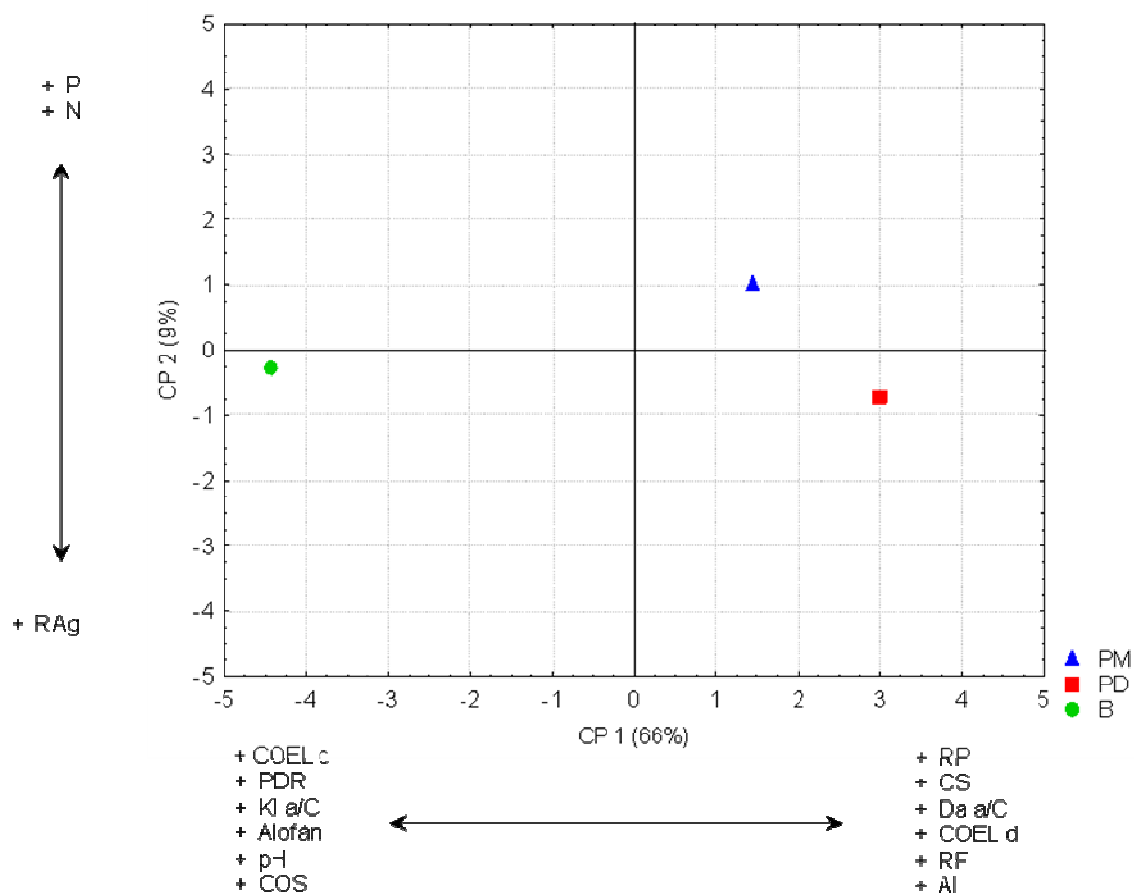


FIGURA 26 Análisis de componentes principales de los suelos es estudio, pradera degradada (PD), pradera mejorada (PM) y bosque (B). Simbología: RP= resistencia a la penetración; CS= capacidad de soporte; KI a/C= conductividad de aire antes consolidación; Da a/C= densidad aparente antes consolidación; COEL_c= coeficiente de extensividad lineal de compresión; COEL_d= coeficiente de extensividad lineal de descompresión; RF= resiliencia funcional; R Ag= resistencia agregados; Da Ag= densidad aparente agregados; A lofán= contenido de a lofán; COS= carbono orgánico del suelo; Al= aluminio extractable; P= fósforo Olsen; N= nitrógeno mineral; pH= pH al agua; MO= materia orgánica; PDR= poros de drenaje rápido; PDL= poros de drenaje lento; PM= pradera mejorada; PD= pradera degradada; B= bosque.

La posición de las variables en la Figura 25 expresa el estado que presentaban los suelos PD, PM y B al momento del muestreo. En el sentido horizontal, se identificaron fuertemente las diferencias entre el bosque y las praderas (Figuras 25 y 26). También las diferencias entre PM y PD en el eje X, evidenciaron los cambios que han ocurrido en PM durante los 5 años en que ha estado bajo pastoreo controlado. El CP1 explica en 66% las diferencias medidas entre PD, PM y B.

En el sector de B (Figuras 25 y 26), las variables se relacionan con condiciones de suelo que favorecen el desarrollo radicular debido a las mejores características físicas, mientras que hacia las praderas la tendencia es al aumento de factores relacionados con la compactación y degradación de los suelos, lo que estaría reflejando su mayor uso y nivel de compactación.

El CP2 explicó 9% de las diferencias que existieron en el sentido vertical de la Figura 25. Principalmente éstas explicaron las diferencias entre los suelos de PD y PM. Se observa que PM (Figuras 25 y 26) presentó un aumento en los aspectos de fertilidad, como fueron el contenido de nitrógeno y fósforo del suelo, mientras que hacia PD aumentó la resistencia a los agregados y los poros de drenaje lento.

Al considerar ambos componentes principales juntos, éstos explicaron el 75% de las diferencias medidas entre PD, PM y B, desde el punto de vista del suelo.

4.2 Análisis de las praderas

Para realizar los análisis de las praderas, las especies presentes en PD y PM fueron sometidas a un análisis de conglomerados, aplicando el criterio de los promedios estandarizados. El análisis se aplicó sobre la composición botánica en base a materia seca. En el árbol generado, se usó el pseudo t^2 para determinar la línea de corte que definió el número de grupos de especies pratenses. De esta forma, las 20 especies pratenses presentes se agruparon en 7 grupos (Figura 27).

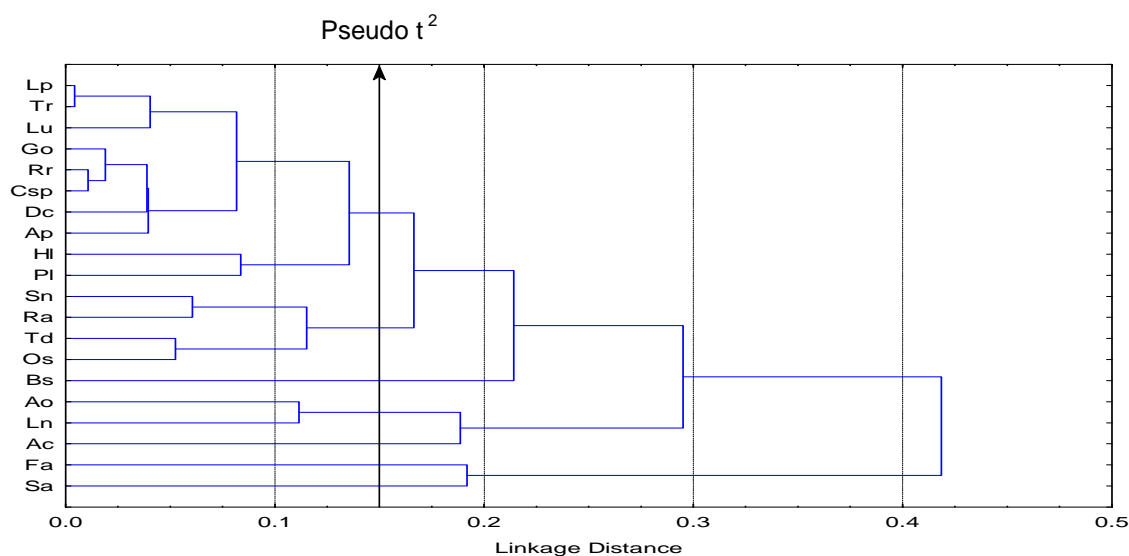


FIGURA 27 Análisis de conglomerado para las especies presentes en las praderas analizadas. Simbología: Lp= *Lolium spp*; Tr= *Trifolium repens*; Lu= *Linum usitatissimum*; Go= *Galega officinalis*; Rr= *Ranunculus repens*; Csp= *Convolvulus spp*; Dc= *Daucus carota*; Ap= *Acaena pinnatifida*; Hl= *Holcus lanatus*; Pl= *Plantago lanceolata*; Sn= *Solanum nigrum*; Ra= *Rumex acetosella*; Td= *Trifolium dubium*; Os= otras especies; Bs= *Bromus stamineus*; Ao= *Anthoxanthum odoratum*; Ln= *Leontodon nudicaulis*; Ac= *Agrostis capillaris*; Fa= *Festuca arundinacea*; Sa= *Achillea millefolium*.

CUADRO 10 Grupos de especies determinados por el análisis de conglomerados.

Grupo I	Grupo II	Grupo III	Grupo IV	Grupo V
<i>Lolium spp</i>	<i>Solanum nigrum</i>	<i>Bromus stamineus</i>	<i>Anthoxanthum odoratum</i>	<i>Agrostis capillaris</i>
<i>Trifolium repens</i>	<i>Rumex acetosella</i>		<i>Leontodon nudicaulis</i>	
<i>Linum usitatissimum</i>	<i>Trifolium dubium</i>			
<i>Galega officinalis</i>	otras especies.			
<i>Ranunculus repens</i>				
<i>Convolvulus spp</i>				
<i>Daucus carota</i>				
<i>Acaena pinnatifida</i>				
<i>Holcus lanatus</i>				
<i>Plantago lanceolata</i>				
Grupo VI		Grupo VII		
<i>Festuca arundinacea</i> .		<i>Achillea millefolium</i>		

Es importante resaltar que como este estudio correspondió a una fotografía de un momento determinado, las praderas y los procesos que en ellas estaban ocurriendo fueron capturados de ese modo. Los procesos en los ecosistemas son dinámicos, y las praderas no son ajenas a ello, por lo que es factible que una pradera que se está mejorando posea especies en común con una que se está degradando, si ambas poseen una condición similar (GASTÓ *et al.*, 1993). La diferencia entre ambas radicaría en la tendencia de sus cambios, lo que es apreciable sólo si se considera el tiempo. Por lo tanto, PM, aún cuando se ha separado de PD en cuanto al estado del suelo, aún puede poseer especies en común con PD. Se esperaría que con el tiempo las diferencias en la composición botánica de ambas praderas y sus rendimientos difirieran cada vez más.

La composición botánica de una pradera es un reflejo del resultado entre la competencia de las especies por recursos, la tolerancia al estrés ambiental y la respuesta a la alteración ecosistémica (GRIME *et al.*, 1989; LÓPEZ y VALENTINE, 2003). Es así que dependiendo de las características del medio en que se desarrolle la pradera, la composición botánica que ésta tenga.

4.2.1 Composición botánica. La composición botánica de las praderas fue analizada a través del ACP. Los resultados obtenidos se presentan en las Figuras 28 y 29.

La posición de las variables en la Figura 28 expresa la condición que presentaban las praderas PD y PM al momento del muestreo. En el sentido horizontal, se identificaron las diferencias entre ambas praderas (Figuras 28 y 29). El CP1 explica en 35% las diferencias medidas entre PD y PM.

En el sector de PM (Figuras 28 y 29), las variables se relacionan con grupos integrados por especies oportunistas - competidoras como *Lolium spp*, *Holcus lanatus* y *Bromus stamineus*, lo que se relaciona con una mejor condición de pradera y mejores características de suelo, mientras que hacia PD se encuentran grupos integrados por especies como *Agrotis capillaris* que poseen un hábito oportunista y tolerante, lo que estaría reflejando una condición menos favorable para especies más nobles.

El CP2 explicó 24% de las diferencias que existieron en el sentido vertical de la Figura 28. Al considerar ambos componentes principales juntos, éstos explicaron el 59% de las diferencias medidas entre PD, PM y B, desde el punto de vista de la composición botánica de las praderas.

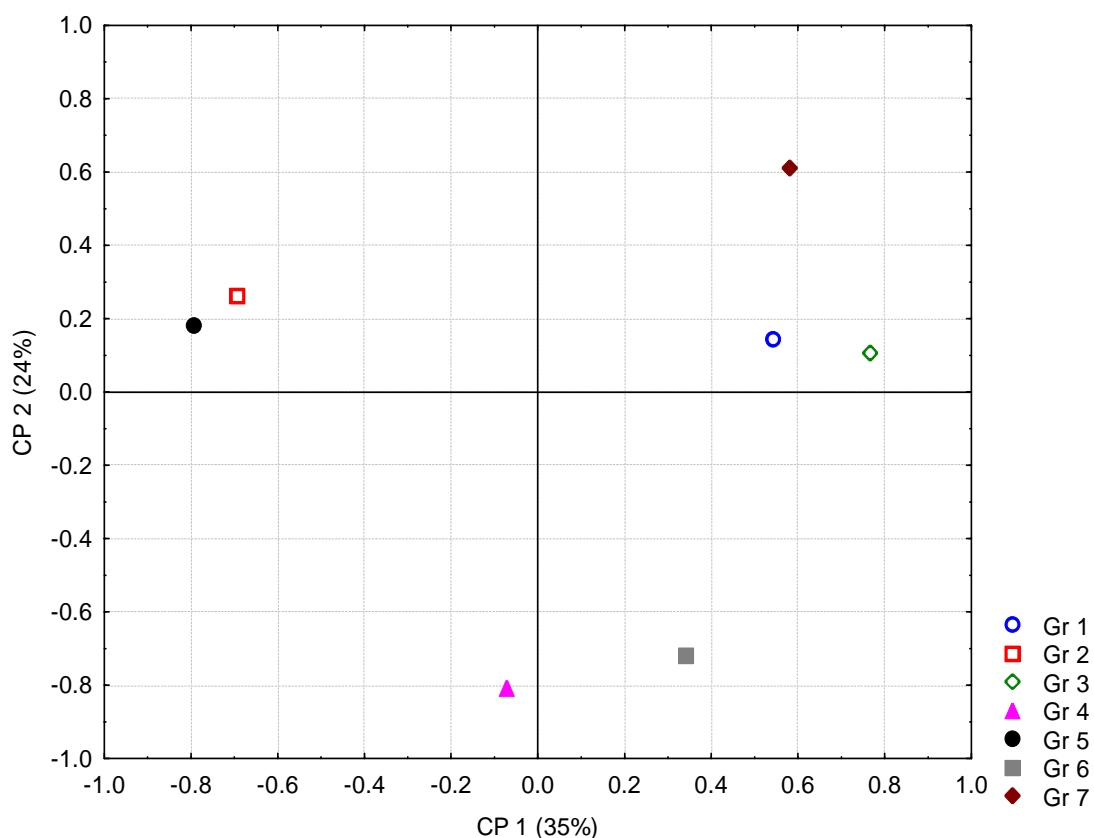


FIGURA 28 Análisis de los componentes principales para los grupos de especies botánicas encontradas. Simbología: Gr 1= grupo I; Gr 2= grupo II; Gr 3= grupo III; Gr 4= grupo IV; Gr 5= grupo V; Gr 6= grupo VI; Gr 7= grupo VII.

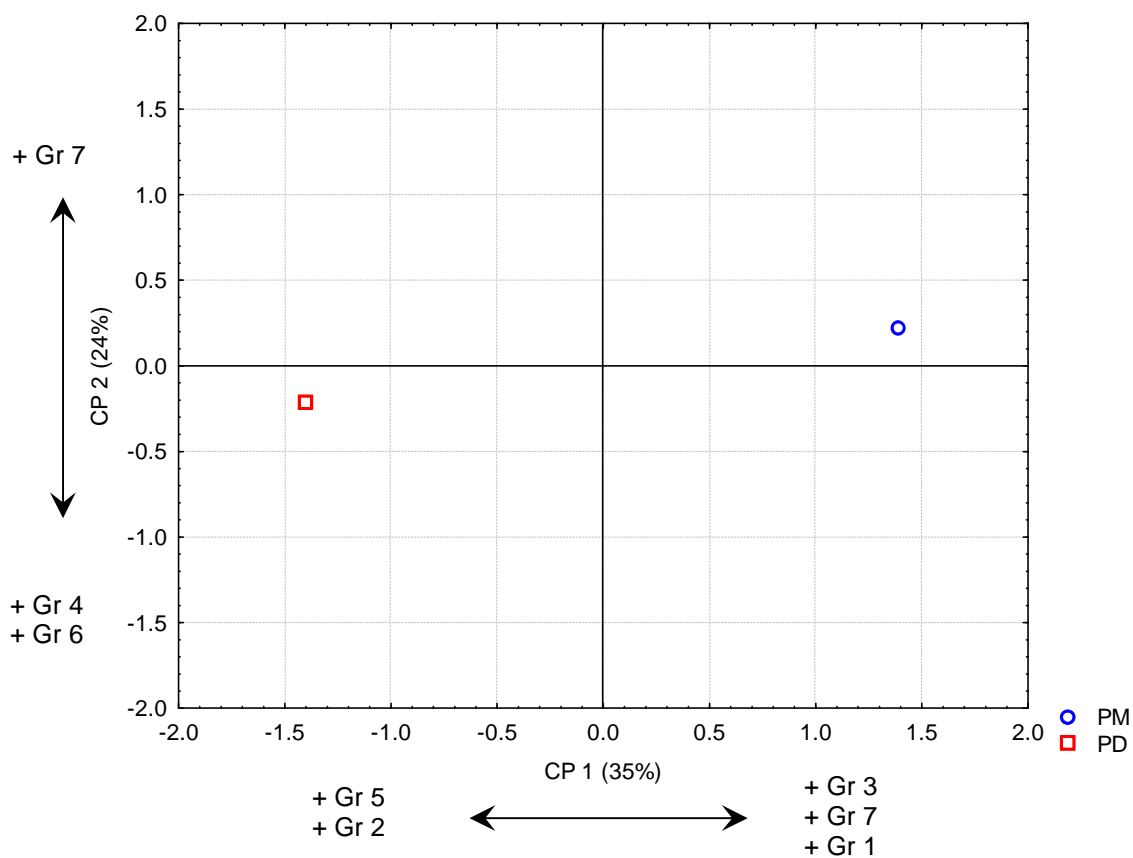


FIGURA 29 Análisis de componentes principales para PD y PM y su relación con los grupos de especies botánicas que las componen.

4.2.2 Relación entre la composición botánica de las praderas y las propiedades físico-químicas de los suelos analizados. Esta relación fue analizada a través del ACP. Los resultados obtenidos se presentan en las Figuras 30 y 31.

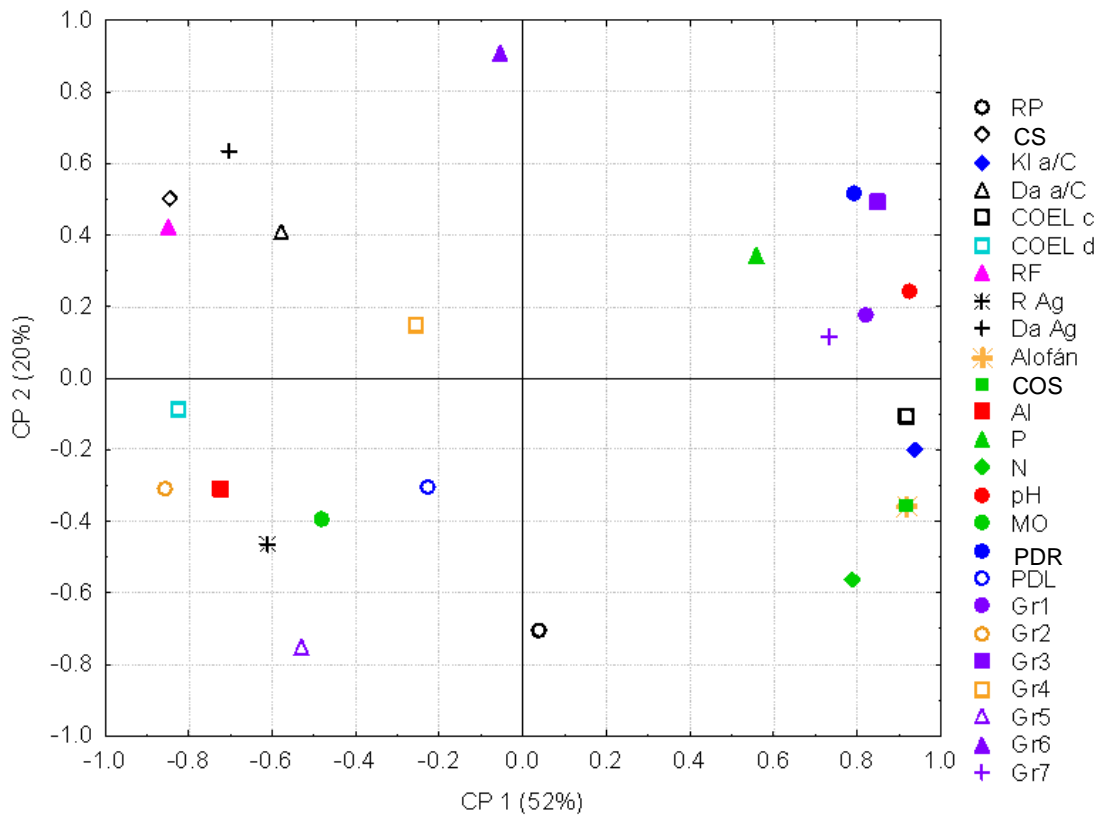


FIGURA 30 Análisis de componentes principales para variables de suelo y pradera. Simbología: RP= resistencia a la penetración; CS= capacidad de soporte; KI a/C= conductividad de aire antes consolidación; Da a/C= densidad aparente antes consolidación; COEL_c= coeficiente de extensividad lineal de compresión; COEL_d= coeficiente de extensividad lineal de descompresión; RF= resiliencia funcional; R Ag= resistencia agregados; Da Ag= densidad aparente agregados; Alofán= contenido de alofán; COS= carbono orgánico del suelo; Al= aluminio extractable; P= fósforo Olsen; N= nitrógeno mineral; pH= pH al agua; MO= materia orgánica; PDR= poros de drenaje rápido; PDL= poros de drenaje lento; Gr 1= grupo I; Gr 2= grupo II; Gr 3= grupo III; Gr 4= grupo IV; Gr 5= grupo V; Gr 6= grupo VI; Gr 7= grupo VII.

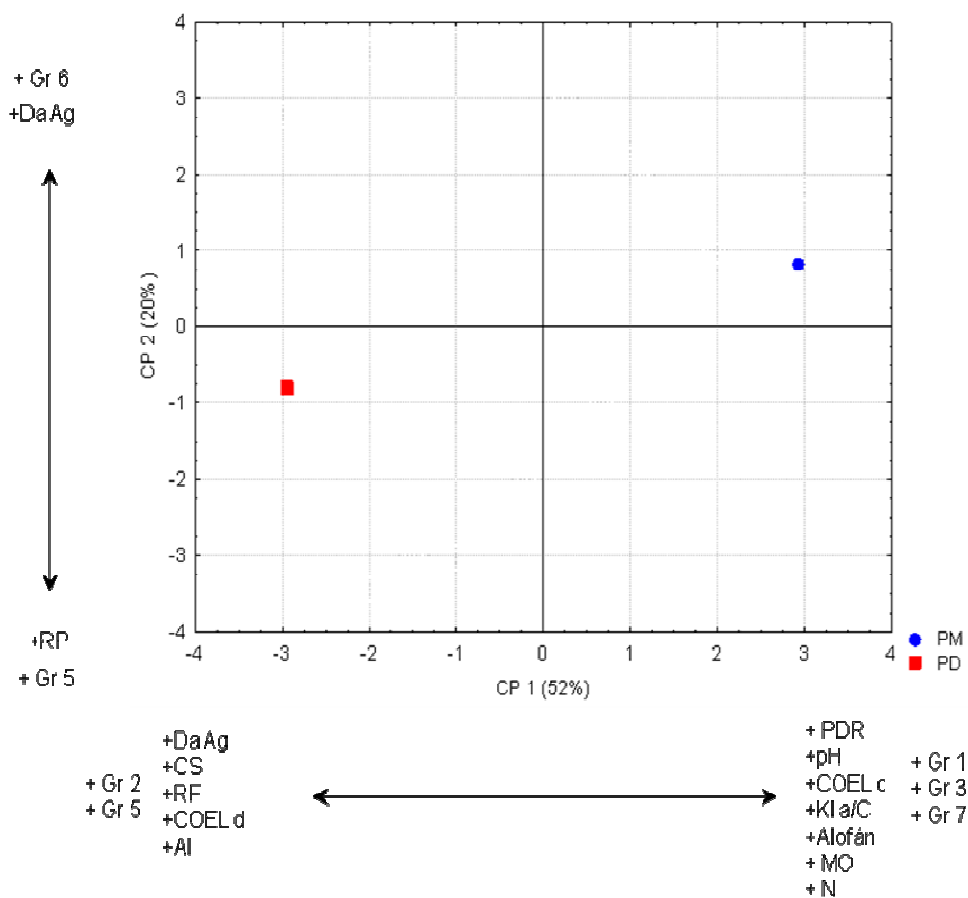


FIGURA 31 Relación entre las variables físicas y químicas del suelo con la composición botánica de las praderas.

La posición de las variables en la Figura 30 expresan las relaciones que se presentaron entre las composiciones botánicas de las praderas PD y PM y las características físico-químicas de los sitios al momento del muestreo. En el sentido horizontal, se identificaron fuertemente las diferencias entre ambas praderas (Figuras 30 y 31). El CP1 explica en 52% las diferencias medidas entre PD y PM.

En el sector de PM (Figuras 30 y 31), las variables se relacionan con grupos integrados por especies oportunistas - competidoras como *Lolium spp*, *Holcus lanatus* y *Bromo stamineus*, también se presentó un aumento en aspectos de fertilidad, como el contenido de nitrógeno, y en aspectos físicos como la porosidad gruesa (PDR) y una mayor conductividad de aire (KI a/C), es decir un suelo con menor densidad aparente,

menos compactado, en el cual las raíces pueden penetrar con facilidad y no existen problemas de drenaje, todo esto se relaciona con una mejor condición de pradera y mejores características de suelo, mientras que hacia PD se encuentran grupos integrados por especies que poseen un hábito oportunista - tolerante como *Agrotis capillaris*, también se relaciona con un aumento en la capacidad de soporte (CS) y la densidad de los agregados (Da Ag), lo que estaría reflejando una condición de suelo y pradera menos favorable para el desarrollo de especies más nobles. Suelos que presentan una mayor capacidad de soporte y con densidades de agregados mayores, son suelos que han sido sometidos a cargas superiores o que tienen una menor capacidad de recuperación, en estos suelos las raíces de las plantas tienen más dificultades para penetrar el suelo y acceder a los nutrientes, a la vez que existen más problemas de drenaje.

El CP2 explicó 20% de las diferencias que existieron en el sentido vertical de la Figura 30. Al considerar ambos componentes principales juntos, éstos explicaron el 72% de las diferencias medidas entre PD y PM, desde el punto de vista de la composición botánica y las características físico-químicas de las praderas.

4.3 Efecto del tiempo sobre la modificación de las propiedades físicas del suelo.

Se ha establecido que las distintas propiedades del suelo varían de forma desigual en el tiempo. La recuperación natural (resiliencia) de suelos degradados mejora sus propiedades físicas (conductividad hidráulica, volumen de macroporos, densidad aparente), sin embargo, en suelos bajo pastoreo, al excluir parcial o totalmente los animales, la recuperación se limita a los primeros 5 a 10 cm del perfil. La magnitud de los cambios va a depender del manejo del pastoreo y de las condiciones climáticas de la zona (DREWRY, 2006). STRUDLEY *et al.* (2008) estudiaron distintos casos de cómo varían las propiedades del suelo al comparar un manejo tradicional o de mayor impacto con un manejo conservacionista, encontrando que, en general, para propiedades relacionadas con la porosidad total del suelo se observa un cambio significativo y estable en alrededor de 10 años, mientras que el efecto en la macroporosidad se observa en 3 a 4 años, presentándose los cambios más evidentes en los primeros 8 cm del suelo. No obstante, este tiempo, varía según las características edafoclimáticas de la zona estudiada (MARTINEZ *et al.*, 2008). ELLIES *et al.* (1997) agregan que la magnitud de este cambio depende de la intensidad de uso de suelo y del tiempo de

utilización de éste. De lo anterior, es posible deducir que, el tiempo transcurrido desde el cambio de manejo en los suelos de las praderas (PD y PM) que en este trabajo se analizan (6 años), no es suficiente para que sea posible distinguir diferencias significativas entre los resultados de las variables analizadas. Sin embargo, destacan las variables de capacidad de soporte (CS) y conductividad de aire (KI) que sí presentan diferencias estadísticamente significativas entre las praderas, lo cual podría deberse a las particularidades de los suelos derivados de cenizas volcánicas (alto contenido de materia orgánica, baja densidad aparente) y a los ciclos de humectación y secado. DÖRNER *et al.* (2009) aseveran que el suelo esta sujeto a constantes modificaciones de su volumen, las que dependen tanto del manejo del suelo (pastoreo, labranza, etc.) como de la ocurrencia de ciclos naturales de humectación y secado. Cabe destacar el hecho de que, al comparar ambas praderas con B, que representa el estado inicial o de referencia en este estudio, se encontraron diferencias estadísticamente en todos los análisis realizados. Por otro lado, ELLIES (1995) indica que las alteraciones de la estructura del suelo no sólo se deben a la acción mecánica del pastoreo o tráfico, sino que también a cambios cualitativos de la materia orgánica. Es así que, la disminución en la porosidad gruesa puede deberse a una acción mecánica, pero la reducción en la estabilidad se debe a cambios en los componentes orgánicos del suelo.

5 CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos por esta investigación se acepta la hipótesis planteada según la cual es posible promover el cambio de estado positivo de un suelo degradado a través de su uso apropiado y con un estilo de agricultura sustentable, permitiendo así su recuperación, expresada a través de atributos físicos y por la progresión de la pradera y sus componentes, ya que, si bien no siempre se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre ambas praderas si se observa la tendencia hacia una mejora en las propiedades físicas del suelo y de las especies forrajeras presentes. Aunque es cierto que no se observó una recuperación estadísticamente significativa en los atributos analizados, según el análisis de varianza (ANOVA), éstas sí se observan en el análisis de componentes principales (ACP). Por otro lado, en todos los casos se presentó una tendencia a la recuperación de la pradera sometida al cambio de manejo, sin embargo, es necesario un lapso de tiempo mayor para hacer de estos cambios una realidad.

La resiliencia mecánica del suelo presentó mayores valores para la pradera mejorada al compararlo con la pradera degradada, mientras que la resiliencia funcional del suelo fue mayor en el caso de la pradera degradada al compararlo con la pradera mejorada, sin embargo, en ninguno de los casos las diferencias fueron estadísticamente significativas.

Al evaluar la progresión de la pradera y sus componentes, se observa una tendencia al aumento de la proporción de especies más nobles (competidoras-oportunistas) hacia la pradera mejorada al mejorar las condiciones físicas del suelo (poros de drenaje rápido y conductividad de aire) y su fertilidad.

Al comparar ambas praderas y relacionarlas con los atributos edáficos y pratenses que se desarrollan en ellas, se estableció una relación entre los atributos del suelo y las especies que componen las praderas así, cuando las características físicas del suelo son más favorables (menor densidad aparente, menor resistencia a la penetración, mayor proporción de macroporos, mayor conductividad de aire) se permite el desarrollo de especies más nobles y demandantes en recursos.

6 BIBLIOGRAFÍA

- ALTIERI, M. 1994. Agricultura sustentable. Editorial Universidad de Talca. Talca. Chile. 91p.
- ANDERSON, J. M. 1994. Functional attributes of biodiversity in land use systems. In: Greenland, D.J. y Szablocs, I. (eds.). Soil Resilience and sustainable land use. Wallingford. England. CAB. pp: 267- 290.
- BERLI, M., KULLI, B., ATTINGER, W. & R. SCHULIN. 2000 Subsoil compaction of agricultural land by heavy construction machinery- Soil mechanical aspects. In: Horn. R, Van den Akker, J.J.H. & J. Arvidsson (Eds). Subsoil compaction, distribution, processes and consequences. Advances in geocology 32. 226-232 pp.
- BLAKE, G.R., and HARTGE, K.H, 1986, Bulk Density, in A. Klute, ed., Methods of Soil Analysis, Part I. Physical and Mineralogical Methods: Agronomy Monograph no. 9 (2nd ed.), pp. 363-375.
- BORGHEI, A.M., TAGHINEJAD, J., MINEAL, S., KARIMI, M. y VARNAMKHASTI, M.G. 2008. Efecto of subsoiling on soil bulk density, penetration resistance and cotton yield in northwest Iran. Int. J. Agri. Biol., 10. pp. 120-123.
- CABRIA, FN, CALANDRONI, M. y MONTERUBBIANESI, G. 2002. Tamaño y estabilidad de agregados y su relación con la conductividad hidráulica saturada en suelos bajo labranza convencional y praderas. Ciencia del Suelo 20. pp. 69-80.
- CANSECO, C., DEMANET, R., BALOCCHI, O., PARGA, J., ANDWANTER, V., ABARZÚA, A., TEUBER, N. y LOPETEGUI, J. 2007. Determinación de la disponibilidad de materia seca de praderas en pastoreo. En Teuber N., Balocchi, O. y Parga, J. Manejo del pastoreo. Fundación para la Innovación Agraria. 129 p.
- CASAGRANDE, A. 1936. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: Proceedings of the 1st International Soil Mechanics and Foundation Engineering Conference, Cambridge, Mass., 22–26 June 1936.

Edited by A. Casagrande. Graduate School of Engineering, Harvard University, Cambridge, Mass. Vol. 3: 60–64.

- CASANOVA, M. 2000. Manejos estimulados y rechazados de uso del suelo. In: Simposio proyecto ley protección del suelo. Boletín N°14. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. Valdivia. 222 p.
- CLARK, L., WHALLEY, W.R. y BARRACLOUGH, P.B. 2003. How do roots penetrate strong soil?. *Plant and soil*. 255. pp. 93-104.
- CLEMENTINO, R. 2005. Discussion of “An oedometer test study on the preconsolidation stress of glaciomarine clays”. *Can. Geotech. J.* Vol. 42: 972-974.
- CRUZ, E. 2008. Operadores de restauración de paisajes degradados. Procesos naturales de organización del paisaje y técnicas de artificialización predial. Estudio de caso de restauración de la precordillera andina de la Araucanía. Proyecto de título. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago. Chile. 224 p.
- CUEVAS, J., DÖRNER, J. y ELLIES, A. 2004. Elementos de física y mecánica para evaluar la sustentabilidad de suelos agrícolas. *R.C. Suelo Nutr. Veg.* 4: 1-13.
- CHAPIN, S., MATSON, P., MOONEY, H. 2002. Principles of terrestrial ecosystem ecology. Editorial Springer. USA. 436 p.
- DAY, P., R. 1965. Particle fractionation and particle-size analysis. En: Black, C. A. *et al.* (Eds.), *Methods of soil analysis, Part I. Agronomy 9, ASA and SSSA.* Madison, Wi. USA. Pp.545 – 567.
- DEC, D., DÖRNER, J., SAEZ, C., PENG, X. y HORN, R. 2009. Shrinkage Behaviour of a Volcanic Soil as Function of Land Use and Scale. *ISTRO 18th Triennial Conference proceeding*, June 15-19. Izmir, Turkey.
- DEMANET, R. y ROMERO, O. 1988. La pradera de la precordillera andina de la Región de la Araucanía. En Ruiz I. *Praderas para Chile.* Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Santiago. Chile. 723 p.
- DENEFF, K. y SIX, J. 2005. Clay mineralogy determines the importance of biological versus abiotic processes for macroaggregate formation and stabilization. *European Journal of Soil Science.* Vol 56. pp. 469-479.

- DEXTER, A. y KROESBERGEN, B. 1985. Methodology for Determination of Tensile Strength of Soil Aggregates. *J. Agric. Engng. Res.* 31: 139-147
- DEXTER, A.R. 2004. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density and organica matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120. pp 201-214.
- DÖRNER, J., SCHROE, V., DEC, D. y HORN, R. 2009. Effect of Land Use on Physical Properties of a Volcanic Soil in South Chile. *ISTRO 18th Triennial Conference proceeding*, June 15-19. Izmir, Turkey.
- DÖRNER, J. y DEC, D. 2007. La permeabilidad del aire y conductividad hidráulica saturada como herramienta para la caracterización funcional de los poros del suelo. *Journal of soil science nutrition* 7 (2). pp. 1-13.
- DÖRNER, J., DEC, D., PENG, X. y HORN, R. 2009. Efecto del cambio de uso en la estabilidad de la estructura y la función de los poros en un Andisol (Typic Hapludand) del sur de Chile. *Rev. Cienc. Suelo Nutr.* Vol 9 (3). pp. 190-209.
- DÖRNER, J. y HORN, R. 2006. Anisotropy of pore fuctions in structured Stagnic Luvisol in the Weichselian maraine region in N Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169. pp. 213-220.
- DREWRY, J.J. 2006. Natural recovery of soil physical properties from treading damage of pastoral soils in New Zeland and Autralia: A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment.* Vol 114. pp. 159-169.
- ELLIES, A. 1988. Mechanical consolidation in volcanic ash soils. *Catena supplement* 11: 87-92.
- ELLIES, A., MAC DONALD, R y RAMIREZ, C. 1993. Variación en la resistencia del suelo por efecto de su uso. *Turrialba* 43 (1):77-82.
- ELLIES, A. 1995. Efecto del manejo sobre las propiedades físicas de suelos trumaos y rojo arcillosos. *Bosque. Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Chile.* Vol 16 N°2. pp. 101-109.
- ELLIES, A. y CONTRERAS, C. 1997. Modificaciones estructurales de un palehumult sometido a distintos manejos. *Agricultura Técnica.* Vol 57 n°1. pp. 15-21.

- ELLIES, A., GREZ, R y RAMIREZ, C. 1997. La conductividad hidráulica en fase saturada como herramienta para el diagnóstico de la estructura del suelo. *Agro Sur (Chile)* 25 (1): 51 – 56.
- ELLIES, A. 2000. La degradación física del suelo. En: Simposio proyecto ley protección del suelo. Boletín N°14. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. Valdivia. 222 p.
- ELLIES, A., SMITH, R., CUEVAS, J., DÖRNER, J. y PRÖSCHLE, A. 2000. Efecto de la humedad y frecuencia del tránsito sobre la distribución de tensiones de distintos suelos. *Agro sur*. Vol 28 n 2. 12p.
- FERRERO, A., USOWICZ, B. y LIPIEC, J. 2005. Spatial distribution of bulk density and water content of soil and their influence on penetration resistance in hillslope vineyard. *Soil and Tillage research*. Vol 84, n 2. pp. 127-138.
- FORSYTHE, W. 1974. Física de suelos: manual de laboratorio. San José, Costa Rica. IICA. 212p.
- GASTÓ, J. 1979. Ecología, El hombre y la transformación de la naturaleza. Editorial Universitaria. Santiago. Chile. 573p.
- GASTÓ, J., COSIO, F. y PANARIO. 1993. Clasificación de ecorregiones y determinación de Sitio y Condición. Manual de aplicación a municipios y predios rurales. Ediciones Red de Pastizales (REEPAN). Quito, Ecuador. 120p.
- GASTÓ, J., GUERRERO y VICENTE. 2002. "Bases ecológicas de los estilos de agricultura y del uso múltiple". En: Gastó, J., P. Rodrigo e I. Aránguiz. Ordenación Territorial, Desarrollo de Predios y Comunas Rurales. LOM Ediciones. Santiago, Chile. 620p.
- GREENWOOD, K. L. y MCKENZIE, B. M. 2001. Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. Vol 41, pp. 1231-1250.
- GREGORY, A.S., WHALLEY, W.R., WATTS, C.W, BIRD, N.R.A., HALLETT, P.D. y WHITMORE, A.P. 2006. Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. *Soil and Tillage Research*. Vol 89, pp. 45-57.

- GRIME, J., HODSON, J. y HUNT, R. 1989. Comparative plant ecology a functional approach to common british species. Unit of comparative plant ecology (NERC), Department of plant science, University of Sheffield (England). 742p.
- HAIR, J., BLACK, W., BABIN, B., ANDERSON, R. y TATHAM, R. 2006. Multivariate data analysis. Pearson education international, sixth edition. USA. 899 p.
- HARTGE, K. y HORN, R. 1991. Introduction to soil physics. Enke. Stuttgart. Germany. 303 p.
- HOPKINS, A. 2000. Grass its production and utilization, third edition. Blackwell Science. Devon, UK. 440 p.
- HORN, R. 1988. Compressibility of arable land, in Drescher, J., Horn, R. and Boodt, M. (Eds.). Impact of water and external forces on soil structure. Catena Supplement 11. pp. 47-75.
- HORN, R. 1995. Aggregate strength of differently structured soils and its alteration with external stress application. p. 177-182.
- HUYGENS, D., BOECKX, P., VAN CLEEMPUT, O., OYARZÚN, C. y GODOY, R. 2005. Agrégate and soil organic carbon dynamics in South Chilean Andisols. Biogeoscience. 2: 159-174.
- IREN-CORFO-UACH. 1978. Suelos de la provincia de Valdivia. Santiago, Chile. 178 p.
- INIA. 2006. Boletín 151: Acidez de los suelos y efectos del encalado. (on line). www.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR33824.pdf. (10 Sept. 2009).
- JENKINSON, D. S., POWLSON, D. S. 1976. The effects of biocidal treatment on metabolism in soil. V. A method for measurin soil biomass. Soil Biol. Biochem. 8. pp. 209-213.
- KUAN, H.L., HALLETT, P.D., GRIFFITHS, B.S., GREGORY, A.S. WATTS, A.W. y WITHMORE, A.P. 2007. The biological and physical stability and resilience of a selection of scottish soils to stresses. European journal of Soil Science. Vol 58. pp. 811-821.
- LAL, R. 1994. Sustainable land use systems and soil resilience. In: Greenland, D.J. y Szablocs, I. (eds.). Soil Resilience an sustainable land use. Wallinford. England. CAB. pp: 41-67.

- LÓPEZ, I. y 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*. Vol 31. pp: 60-76.
- LÓPEZ, I. 1989. Caracterización de sitios, pastizales y determinación de condición y capacidad sustentadora. Estancia Baño Nuevo. Estepa fría Coyhaique. Tesis de Lic. en Agr. Universidad Católica de Valparaíso. Valparaíso. Chile. 230 p.
- LUZIO, W.L. y CASANOVA, M.P. 2006. Avances en el conocimiento de los suelos de Chile. Universidad de Chile. 393p.
- MARABOLI, A. 2008. Proposición de factores de equivalencia de concentraciones de nutrientes entre profundidades de muestreo en suelos volcánicos. Tesis Lic. Agr. Valdivia, Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias. 91p.
- MARTINEZ, E; FUENTES, J, SILVA, P y VALLE, S; ACEVEDO, E. 2008. Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in a Mediterranean environment of Chile. *Soil and Tillage Research*. 99: 232–244.
- MIZOTA, C. y VAN REEUWIJK, L. 1989. Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic material in diverse climatic region. Wageningen, The Netherlands. ISRIC. 194p
- MONTALDO, P. 2004. Antecedentes históricos y anecdóticos de la agricultura chilena. Universidad Austral de Chile. Valdivia. Chile. 287 p.
- NAVA, R., ARMIJO, R. y GASTÓ, J. 1996. El ecosistema, la unidad de la naturaleza y el hombre, segunda edición. Editorial Trillas. México.
- NAVARRO, J.L. 2007. Variación del contenido de materia orgánica de suelos volcánicos sometidos a distintos manejos agrícolas. Proyecto de título. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias. Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos. 93 p.
- NSABIMANA, D. y HAYNES, R. J. 2004. Size, activity and catabolic Diversity of the soil microbial biomass as affected by land use. *Applied Soil Ecology*. vol 26. pp. 81- 92.
- OPAZO, R. 1910. Desarrollo agrícola de los territorios que constituían la antigua frontera. Conferencia dada durante la exposición internacional de agricultura. Imprenta Santiago. Santiago. Chile.

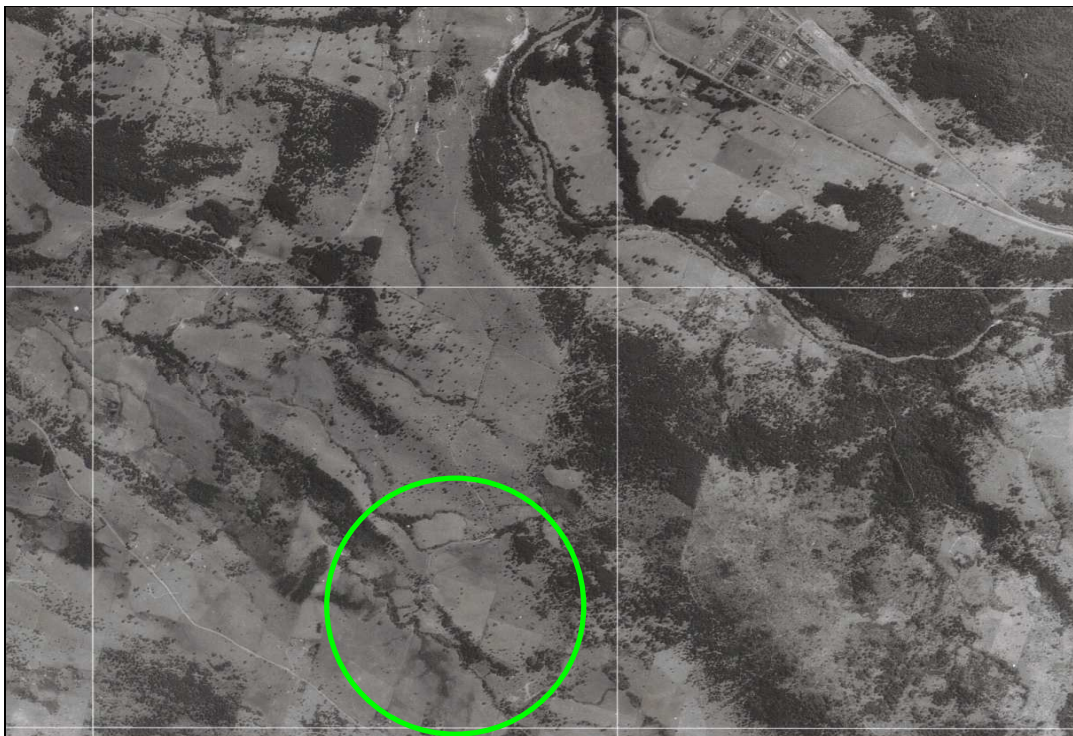
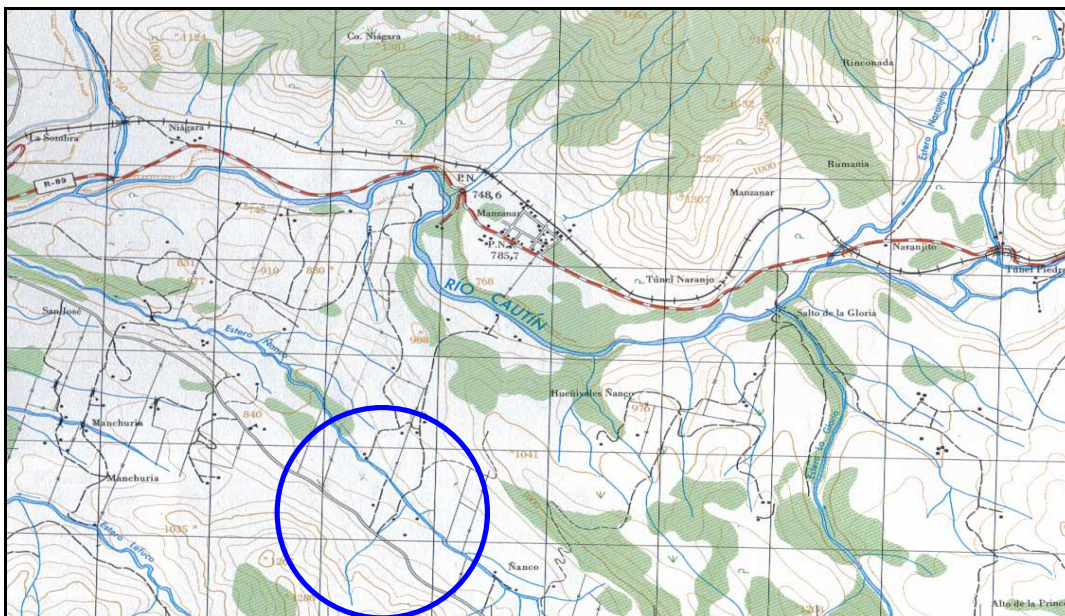
- PAYAHUALA, M. 2009. Efecto de la aplicación de tres estrategias de mejoramiento de praderas sobre una pradera degradada y su impacto en el estado estructural del suelo. Proyecto de título. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias. Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos. 108 p.
- PEREZ, C., ARMESTO, J. y RUTHSATZ, B. 1991. Descomposición de hojas, biomasa de raíces y características de los suelos en bosques mixtos de coníferas y especies laurifolias en el Parque Nacional Chiloé, Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* vol 64. pp. 479-490.
- RAMIREZ, C. 2002. Valoración económica de la degradación del Valle Ventisqueros. Proyecto de título. Pontificia Universidad Católica de Chile. Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal. Departamento de zootecnia. 115 pp.
- RICO, R., DEL CASTILLO, H. 1978. La ingeniería de suelos en vías terrestre, carreteras, ferrocarriles y aeropistas. Limusa. México. 163 p.
- RICHARD, G., COUSIN, I., SILLON, J.F., BRUAND, A. y GUÉRIF, J. 2001. *European journal of science*. Vol 52. pp 49-58.
- ROJAS, C. 2009. Interpretación de la disponibilidad de fósforo en los suelos de Chile. (On Line). <http://www.inia.cl/medios/biblioteca/serieactas/NR33852.pdf>. (5 ago. 2009).
- SADZAWKA, A., CARRASCO, M., GREZ, R., MORA, M., FLORES, H. Y NEAMAN, A. 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Centro de Investigación Regional La Platina. Serie actas INIA. 34 (1). Santiago. Chile. 165 p.
- SANTIBAÑEZ, F. y URIBE, J. 1993. Atlas agroclimático de Chile. Regiones sexta, séptima, octava y novena. Ministerio de Agricultura, Fondo de Investigación Agropecuaria. Corporación de fomento a la producción. Universidad de Chile. Santiago. Chile.
- SEGUEL, O., ELLIES, A., MACDONALD, R. y RAMIREZ, C. 2002. Propiedades mecánicas en suelos sometidos a distintos usos. *R.C. Suelo Nutr. Veg.* 2 (2) pp. 54-61.
- SHARPENSEEL, H. W. Y BECKER- HEIDMANN, P. 1994. Sustainable land use in the light of resilience/elasticity to soil organic matter fluctuations. In: Greenland, D.J. y

- Szablocs, I. (eds.). Soil Resilience an sustainable land use. Wallingford. England. CAB. pp: 249-264.
- SOIL SURVEY STAFF. 1990. Keys to soil taxonomy. 4^a edición. Virginia, USA. Virginia Polytechnic Institute. 422p.
- SOMBROEK, W. G. 1994. The work of FAO's land and water division. In: Greenland, D.J. y Szablocs, I. (eds.). Soil Resilience an sustainable land use. Wallingford. England. CAB. pp: 521- 534.
- STRUDLEY, M; GREEN, T y ASCOUGH, J. 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: state of the science. Soil and tillage research. 99: 4 – 48.
- SZABLOCS, I. 1994. The concept of soil resilience. In: Greenland, D.J. y Szablocs, I. (eds.). Soil Resilience an sustainable land use. Wallingford. England. CAB. pp: 33-39.
- TABOADA, M. 2007. Efectos del pisoteo y pastoreo animal sobre suelos en siembra directa. 4°simposio de ganadería en siembra direct a. Argentina. 13 p.
- TORRES, A. 1996. Regeneración de praderas. En: Praderas para Chile. RUIZ, I. INIA, Santiago de Chile.733 p. (188-198p.)
- TOSSO, J. 1985. Suelos volcánicos de Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA. Primera edición. Santiago. Chile. 723 p.
- VAN DER PLOEG, J.D. 1992. Styles of farming: an introductory note on concepts and methodology. En: Haan. H. de, and J.D. van der Ploeg (eds), "Endogenous regional development in Europe: theory, method and practice." Proceedings of the I CERES/CAMAR seminar, Universidade de Tras-os-Montes, Vila Real, Portugal. November 4–5, 1991. pp. 1–27.
- VARNERO, M. 2002. Acondicionamiento orgánico para la rehabilitación de ecosistemas con riesgos de degradación. En: Avances en restauración ambiental con énfasis en recuperación ecológica. Publicaciones misceláneas forestales N°4. Santiago. Chile. 111 p.
- VERA, L. 2008. Expansión de la frontera homínida en el paisaje cultural de la cordillera de Los Andes de la Araucanía. Tesis doctoral en ciencias de recursos naturales. Universidad de la Frontera. Temuco. Chile. 373p.

- VERNIORY, G. 2001. Diez años en Araucanía 1889-1899. Pehuén. Santiago. Chile. 490 p.
- WALKLEY, A y BLACK, I. A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil O. M. and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci. 37, 29- 38.
- WARKENTIN, B. P. 2000. Clay surface changes on soil compaction. In: Horn. R, Van den Akker, J.J.H. & J. Arvidsson (Eds). Subsoil compaction, distribution, processes and consequences. Advances in geoecology 32. 64-72 pp.
- WEI, CH., GAO, M., SHAO, J., XIE, D. y PAN, G. 2006. Soil aggregate and its response to land management practices. China Particuology. Vol 4 n° 5. pp. 211-219.
- ZHANG, B., HORN, R. y HALLETT, P.D. 2005. Mechanical resilience of degraded soil amended with organic matter. Soil Sci. Soc. Am. J. Vol 69. pp.864-871.

7 ANEXOS

Anexo 1 Localización de Hueñivales en el mapa (IGM) y en la ortofoto



Anexo 2 Delimitación Hueñivales en fotografía aérea

Anexo 3 Coeficientes de varianza para análisis estadísticos ACP.

- Componente principal para la relación entre variables del suelo del bosque (B), pradera mejorada (PM) y pradera degradada (PD).

	CP1	CP2	CP3	CP4
1	1,91278	0,66191	-0,23781	0,71269
1	1,25315	1,39872	-0,10676	-1,67621
1	1,17555	0,98106	-0,82422	-0,92699
2	4,38478	-0,69603	1,22613	1,52925
2	2,39505	-1,24975	0,21700	-0,55904
2	2,18520	-0,23174	-0,70687	0,14985
3	-4,17896	-2,02515	0,99522	-1,21393
3	-4,89070	1,78145	1,55813	0,81418
3	-4,23684	-0,62047	-2,12081	1,17021
1	1,44716	1,01390	-0,38960	-0,63017
2	2,98834	-0,72584	0,24542	0,37336
3	-4,43550	-0,28806	0,14418	0,25682

1= Pradera mejorada (PM)

2= Pradera degradada (PD)

3= Bosque (B)

Var	CP1	CP2	CP3	CP4
penet	0,858005	0,025235	0,100218	-0,441263
CSCasa	0,915623	0,273507	0,143811	0,211234
CdAireaC	-0,993439	-0,002123	0,011811	-0,069404
DaaC	0,969411	0,152536	0,016126	-0,130406
coleaC	-0,973189	-0,111274	0,024717	-0,108847
coledC	0,823171	0,029691	-0,505317	0,130739
Resil	0,988171	0,119702	0,022344	0,035189
Resist	0,160742	-0,635879	0,567873	-0,407023
DapAg	0,943932	0,140842	0,111943	0,244770
Alof	-0,960925	0,151648	-0,109693	-0,168639
SOC	-0,962613	0,150698	-0,106194	-0,163534
Al	0,737390	-0,400915	-0,444195	-0,211152
P	0,385911	0,685816	0,470221	-0,225778
N	-0,348081	0,480384	-0,476570	-0,518309
pH	-0,961734	0,178220	0,093602	0,026638
MO	-0,640915	0,166676	0,074873	0,563655
CA	-0,968866	-0,083916	0,084040	0,053283
POL	0,052853	-0,339092	-0,162226	0,192344
%	66%	9%	7%	7%
% Acum		75%	82%	89%

Componente principal	Eigenvalue	% variance total	% variance acumulado
1	11,96028	66,44598	66,4460
2	1,63961	9,10893	75,5549
3	1,33918	7,43991	82,9948
4	1,29455	7,19196	90,1868
5	1,15721	6,42895	96,6157
6	0,35825	1,99028	98,6060
7	0,14427	0,80148	99,4075
8	0,10665	0,59250	100,0000

- Componente principal para la relación de las variables de suelo y la composición botánica de las praderas.

Var	CP1	CP2	CP3	CP4
1	1,66485	2,63931	-1,71819	1,99205
1	4,00415	-0,38133	-0,39985	-1,85281
1	3,15731	0,15718	1,39695	-0,47783
2	-5,51235	2,09859	0,03961	-1,50780
2	-1,35646	-1,04970	2,66750	1,52058
2	-1,95750	-3,46406	-1,98603	0,32581
1	2,94210	0,80505	-0,24036	-0,11286
2	-2,94210	-0,80505	0,24036	0,11286

1= Pradera mejorada (PM)

2= Pradera degradada (PD)

Componente principal	Eigenvalue	% variance total	% variance acumulado
1	12,96625	51,86501	51,8650
2	4,92835	19,71339	71,5784
3	3,22499	12,89996	84,4784
4	2,46425	9,85701	94,3354
5	1,41616	5,66463	100,0000

Var	CP1	CP2	CP3	CP4
penet	0,039947	-0,706774	0,665818	-0,123942
CSCasa	-0,842865	0,500354	-0,052770	-0,021055
CdAireaC	0,940259	-0,204875	0,198248	0,088671
DaaC	-0,574886	0,404892	0,636325	-0,068481
coleaC	0,921017	-0,110651	0,053084	0,141209
coledC	-0,823827	-0,088806	0,165609	0,336211
Resil	-0,845164	0,421833	-0,320436	-0,014027
Resist	-0,609126	-0,467917	0,429824	0,086255
DapAg	-0,701417	0,631376	-0,302861	-0,020355
Alof	0,920229	-0,360459	0,036156	0,133584
SOC	0,921176	-0,359258	0,036509	0,129908
Al	-0,722152	-0,311135	0,247018	-0,410341
P	0,560029	0,341031	-0,553834	-0,307580
N	0,789344	-0,566581	-0,185976	0,038668
pH	0,925823	0,239733	0,276030	0,080450
MO	-0,481022	-0,395609	-0,584268	0,217201
CA	0,792774	0,512222	-0,066040	0,320015
POL	-0,224134	-0,306704	-0,488373	0,783511
Gr1	0,822726	0,176384	-0,513215	-0,004668
Gr2	-0,854652	-0,310293	-0,243463	-0,333712
Gr3	0,849346	0,492583	0,027608	0,098602
Gr4	-0,252001	0,148448	0,568154	0,768404
Gr5	-0,528408	-0,755442	-0,323692	0,203049
Gr6	-0,052402	0,904429	0,281315	0,296464
Gr7	0,735093	0,112294	0,172441	-0,620521