

UCH-FC  
B. Ambiente  
H 96%  
C. 1



UNIVERSIDAD DE CHILE -FACULTAD DE CIENCIAS -ESCUELA DE PREGRADO

**“CARACTERIZACIÓN DE LOS NIVELES DE  
DEGRADACIÓN EXISTENTES EN EL PISO VEGETACIONAL  
ANDINO SUPERIOR EN EL VALLE DE RÍO YESO Y EL  
MORADO, REGIÓN METROPOLITANA, CON FINES DE  
RESTAURACIÓN ECOLÓGICA”**

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Biólogo con mención en Medio Ambiente.

**CRISTIAN ANDRÉS HURTADO CABEZAS**

Dr. Jorge Pérez Quezada.  
Director del Seminario de Título

Dr. Horacio Bown Itveen.  
Co-Director del Seminario de Título

Diciembre de 2013

Santiago - Chile



## INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por el candidato

**CRISTIAN ANDRÉS HURTADO CABEZAS**

### “CARACTERIZACIÓN DE LOS NIVELES DE DEGRADACIÓN EXISTENTES EN EL PISO VEGETACIONAL ANDINO SUPERIOR EN EL VALLE DEL YESO Y EL MORADO, REGIÓN METROPOLITANA, CON FINES DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA”

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Biólogo con mención en Medio Ambiente.

*Dr. Jorge Pérez Quezada*  
**Director Seminario de Título**

Firma manuscrita en tinta negra sobre una línea horizontal.

*Dr. Horacio Bown Itveen*  
**Co-Director**

Firma manuscrita en tinta negra sobre una línea horizontal.

**Comisión de Evaluación**

*Dr. Patricio Moreno M.*  
**Presidente Comisión**

Firma manuscrita en tinta negra sobre una línea horizontal.

*Dr. Ramiro Bustamante A.*  
**Evaluador**

Firma manuscrita en tinta azul sobre una línea horizontal.

Santiago de Chile, diciembre de 2013.

## Biografía



Cristián Andrés Hurtado Cabezas nació el 15 de septiembre de 1986 en la ciudad de Santiago, Chile.

Desde pequeño, y gracias al estímulo de su madre, que le enseñó a leer desde los cinco años, empezó a aprender muchas cosas. Muy pronto se dio cuenta que la ciencia era su pasión, y aprendió mucho, de manera autodidacta, leyendo libros de dinosaurios, de naturaleza, atlas, y otros. Gracias a eso, empezó a experimentar con todo lo que le cautivaba, mirando, tocando, experimentando e incluso en un par de ocasiones, causando un par de explosiones que sólo causaron daños materiales menores. Complementó

esta pasión por la naturaleza desde pequeño, con el fútbol de barrio, andar en bicicleta y compartir con sus amigos.

Estudió en el Instituto Nacional y gracias a sus profesores de biología se dio cuenta de que el camino que deseaba seguir era la ciencia. Sabiendo esto, entró a la universidad buscando aprender aún más de la naturaleza. Al entrar a Biología Ambiental en la Universidad de Chile aprendió de manera mucho más tangible la problemática ambiental que existe en Chile y el mundo. Fue eso lo que determinó el camino que siguió durante su carrera, ya enfocada en la conservación y restauración del medio ambiente. Fue gracias a eso que se integró al Laboratorio de Ecología de Ecosistemas de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile.

Mientras no está ayudando a salvar el planeta o estudiando la naturaleza, se dedica a sus hobbies, una microempresa de fabricación de hidromiel, el ciclismo, y a hacer clases de biología.

*A mi familia*

## Agradecimientos

A mis padres Luis y Cecilia y a mi hermana Verónica por toda la paciencia y el apoyo que me han dado. Sin ellos esta tesis no habría salido a la luz.

A Paola Lambertini e Iván Reyes, mis compañeros de proyecto, con los cuales trabajé codo a codo para sacar adelante esta memoria.

A los integrantes del LECS, en especial a Felipe Ávila, Javiera Ulloa, Ariel Valdés, Bryan Casanova por la ayuda para analizar los datos y generar mapas.

A Carol Berríos, Juan Pablo Pino, Benjamín Castro, Nicolás Baeza, Miguel Cozano, Vivianne Claramunt, Andrés Salvo, Carola Ortiz y a todos los que me ayudaron en terreno.

A Mauricio Bosshard por su invaluable ayuda en el análisis estadístico. A Josefina Cabezas por su ayuda con bases de datos de clima.

Al laboratorio de Suelos del Dr. Oscar Seguel, a Hugo, y a Orlando Macari, por su ayuda para procesar las muestras de suelo.

Al laboratorio de botánica del Sr. Luis Faúndez por la ayuda para identificar las especies colectadas.

A Valle del Yeso, por permitirnos recolectar muestras en su terreno.

A CONAF por permitirnos hacer el trabajo en terreno dentro del Monumento Nacional El Morado, y a todo el equipo de guardaparques que nos brindaron ayuda y apoyo.

A mis amistades que me brindaron su apoyo y ayuda en los momentos de mayor estrés, en especial a Yanneth Villalobos y Catherine Elgueta por estar ahí cuando más necesité ayuda.

A mis tutores Dr. Jorge Pérez y Dr. Horacio Bown, por su apoyo, consejos, críticas, dedicación, apoyo y todas las enseñanzas entregadas para mi formación como profesional.

A Dr. Patricio Moreno y Dr. Ramiro Bustamante por sus correcciones y observaciones a mi trabajo.

Esta tesis fue financiada por el Proyecto 022/2012 Fondo de Investigación del Bosque Nativo CONAF titulado "Guía para la regeneración y recuperación de bosque y matorral de ecosistemas de montaña en la Región Metropolitana" a cargo del Prof. Jorge Pérez, con el respaldo del Laboratorio de Ecología de Ecosistemas.

## Índice de contenidos

Resumen.....	xii
Abstract .....	xiii
1. Introducción.....	1
1.1 Restauración Ecológica.....	1
1.2 Biodiversidad y conservación.....	2
1.3 Ecosistemas andinos .....	3
1.4 Degradación de ecosistemas .....	4
1.5 Hipótesis .....	8
2. Objetivos.....	9
3. Materiales y Métodos.....	10
3.2 Área de estudio .....	10
3.5 Análisis estadístico.....	18
3.6 Directrices para restauración ecológica .....	19
4. Resultados.....	20
4.1 Descripción general de los estados de degradación: .....	20
4.2 Análisis de las variables bióticas y abióticas .....	24
4.3 Variables que inciden en el umbral de degradación.....	31
4.4 Relación entre la degradación y la distancia a los impactos antrópicos.....	32
4.5 Análisis de componentes principales .....	33
5. Directrices para restauración ecológica .....	36
5.1 Diagnósticos y objetivos de restauración.....	36
5.1 Recomendaciones para la restauración .....	37
6. Discusión .....	40

6.1 Generalidades.....	40
6.3 Diferencias en las variables de suelo .....	43
6.4 Diferencias entre variables de vegetación.....	46
6.5 Diferencias entre variables de diversidad .....	47
6.6 Diferencias entre variables de procesos .....	48
6.7 Regresión lineal y PCA.....	50
7. Conclusiones.....	52
8. Bibliografía .....	54
9. Anexos.....	58

## Índice de Tablas

TABLA 1: UBICACIÓN DE LAS PARCELAS EN LOS DISTINTOS ESTADOS DE DEGRADACIÓN..	13
TABLA 2. NOMBRE CIENTÍFICO, FAMILIA, FORMA DE CRECIMIENTO, ORIGEN GEOGRÁFICO Y ENDEMISMO DE CADA UNA DE LAS ESPECIES ENCONTRADAS EN LOS DISTINTOS ESTADOS DE DEGRADACIÓN .....	22
TABLA 3: CARACTERIZACIÓN DE VEGETACIÓN, SUELOS Y PROCESOS A LO LARGO DE UN GRADIENTE DE PERTURBACIONES EN EL PISO ANDINO SUPERIOR. ....	25
TABLA 4: DESCRIPCIÓN CUANTITATIVA DE CADA CALICATA EN LOS DISTINTOS ESTADOS DE DEGRADACIÓN.. ....	28

## Índice de Figuras

FIGURA 1: MODELO HIPOTÉTICO DE DEGRADACIÓN DE ECOSISTEMAS.....	6
FIGURA 2: MAPA DEL ÁREA DE ESTUDIO INDICANDO LA LOCALIZACIÓN DE LOS CUATRO ESTADOS DE DEGRADACIÓN .....	11
FIGURA 3: ABUNDANCIA ABSOLUTA DE LAS ESPECIES ENCONTRADAS EN LOS DISTINTOS ESTADOS DE DEGRADACIÓN. ....	23
FIGURA 4: ÍNDICES CSII Y HAI CONSIDERANDO ESTADO 1 COMO COMUNIDAD DE REFERENCIA.....	30
FIGURA 5: VARIABLES QUE CAMBIAN SIGNIFICATIVAMENTE EN CADA UNO DE LOS UMBRALES DE DEGRADACIÓN .....	31
FIGURA 6: RELACIÓN ENTRE ÍNDICE DE DEGRADACIÓN Y DISTANCIA AL CAMINO.....	32
FIGURA 7: RELACIÓN ENTRE ÍNDICE DE DEGRADACIÓN Y DISTANCIA AL CORRAL DE GANADO.....	33
FIGURA 8: ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES UTILIZANDO LAS 37 VARIABLES DE ESTE ESTUDIO. ....	35



## Abreviaturas

ANOVA:	Analysis of Variance
CONAF:	Corporación Nacional Forestal
CSII:	Community Structure Integrity Index
DA:	Densidad aparente
DAff:	Densidad aparente fracción fina
HAI:	Higher Abundance Index
USDA:	United States Department of Agriculture
CC:	Capacidad de campo
PMP:	Punto de marchitez permanente
MN:	Monumento Nacional

## Glosario

Alóctono: se define como una especie que se encuentra en un lugar distinto a su lugar de origen.

Endémica: se define como una especie propia y exclusiva de una región determinada.

Nativa: se define como una especie propia pero no exclusiva de una región determinada.

Pedogénesis: proceso de formación de un suelo.

Piso vegetal: se define como espacios caracterizados por un conjunto de comunidades vegetales con una fisionomía y unas especies dominantes asociadas a un piso bioclimático específico

## Resumen

Los ecosistemas de montaña proveen de agua para más de la mitad de la población humana. Debido a la fragilidad de estos ecosistemas, las actividades humanas, principalmente ganadería, minería y turismo han provocado pérdida de biodiversidad, productividad y funcionalidad ecológica. El piso vegetacional andino superior está compuesto por una formación de matorral bajo mediterráneo andino dominado por *Laretia acaulis* y *Berberis empetrifolia*. El objetivo de este estudio fue comparar variables bióticas y abióticas en cuatro niveles de degradación, en el Valle del Yeso y El Morado. Durante la estación de verano de 2013 se localizaron tres parcelas en laderas de exposición suroeste para cada uno de los cuatro estados de degradación. Se recolectaron muestras de vegetación, de suelo y de procesos para analizar 37 variables en total. Los resultados mostraron una disminución significativa en veinte de ellas, y un aumento significativo en porcentaje de arcilla, CC y PMP al aumentar el estado de degradación. 14 de estas variables no presentaron diferencias significativas. Adicionalmente se observó que el porcentaje de arena fue significativamente mayor al comparar los dos estados menos degradados con los dos estados más degradados. Se observó que hay una correlación entre el aumento de la degradación y la cercanía al camino y el punto de origen del forrajeo de ganado. A partir de estos resultados se generaron directrices para la restauración para cada uno de los cuatro estados de degradación.

## Abstract

Mountain ecosystems provide water resources for more than half of the human population. Due to the fragility of these ecosystems, human activities, primarily livestock, mining and tourism have caused loss of biodiversity, productivity and ecological functionality. The Upper Andean vegetation belt is composed by a formation of andean mediterranean low scrub dominated by *Laretia acaulis* and *Berberis empetrifolia*. The aim of this study was to compare biotic and abiotic variables in four levels of degradation, in Valle del Yeso and El Morado. During the summer season of 2013 three plots were located in southwest aspects for each of the four levels of degradation. Vegetation, soil and processes measurements were collected to analyze 37 variables in total. The results showed a significant decrease in 20 variables and a significant increase in percentage of clay, CC and PMP as degradation increased. 14 of these variables were not significantly different. Additionally it was observed that the percentage of sand was significantly higher, comparing the two least degraded conditions with the two most degraded levels. It was noted that there is a correlation between increased degradation and proximity to road and point of origin of livestock foraging. From these results were generated guidelines for restoration for each of the four levels of degradation.

# 1. Introducción

## 1.1 Restauración Ecológica

La restauración ecológica consiste en iniciar o acelerar el proceso de recuperación de un ecosistema con respecto a su salud, integridad y sustentabilidad. Por lo general, los ecosistemas que necesitan restaurarse han sido degradados, dañados, transformados o completamente destruidos por la acción directa o indirecta de la acción antrópica, hasta el punto de ser incapaces de recuperarse a su estado previo a la perturbación (Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group, 2004).

Existen variadas aproximaciones filosóficas a la problemática de la restauración ambiental, que difieren en su planificación económica, selección de sitios y especies, escala espacial y temporal, funciones ecosistémicas y requerimientos de mantención, entre otros (Whisenant, 1999). Existen dos aproximaciones principales para la restauración de ecosistemas: la aproximación agronómica y la aproximación ecológica. La aproximación agronómica, que se centra en recuperar los componentes del ecosistema donde sus resultados se alcanzan más rápido y tienen un costo mayor; y la aproximación ecológica, cuyas estrategias consisten en modificar y mejorar las condiciones de suelo y microambiente con procesos naturales, que ayuden al ecosistema recuperarse naturalmente. Este método necesita una planificación temporal mayor, pero sus beneficios son más duraderos y el costo de aplicación es menor (Whisenant, 1999). Dependiendo de las herramientas disponibles y los objetivos de restauración, y los

recursos disponibles, se puede utilizar una aproximación agronómica, ecológica, o una combinación de ambas. Debido a las grandes limitaciones y fragilidades de los ecosistemas de altura, es que en este estudio se privilegiará una aproximación ecológica de restauración.

## **1.2 Biodiversidad y conservación**

Mantener la biodiversidad en los distintos ecosistemas es una prioridad para el país (CONAMA, 2003), debido a que éstos nos brindan servicios ecosistémicos directos, que comprenden los recursos naturales como alimentos y materias primas, e indirectos, que comprenden el control de la erosión, regulación del ciclo del agua, polinización y dispersión de semillas por parte de animales, entre otros. Además existen otros beneficios más difíciles de valorar como son la belleza escénica y el bienestar psicológico y emocional que nos brindan (Fredericksen *y col*, 2011).

La actividad humana ha provocado la alteración de los ecosistemas, disminuyendo la capacidad que tienen éstos para proveernos de servicios ecosistémicos. A nivel país se ha detectado que el 78% de los suelos de aptitud silvoagropecuaria están erosionados (CONAMA, 2003), además de verificarse una creciente desertificación del territorio chileno y escasez de recursos hídricos, así como disminución del bosque nativo, todo lo cual da cuenta del uso no sustentable de los recursos de nuestro país. En Chile existe actualmente una estrategia nacional de biodiversidad, que busca mejorar la gestión sustentable del patrimonio natural, con el objetivo de resguardar su capacidad vital y

garantizar el acceso a sus beneficios para el bienestar de las generaciones actuales y futuras (CONAMA, 2003)

La Región Metropolitana es una de las regiones con mayor impacto antrópico en el país, debido en parte a que posee una alta densidad poblacional. Los principales impactos que afectan a los ecosistemas en esta región corresponden a cambios en el uso de suelo, incendios, desertificación, sobreexplotación de recursos e introducción de especies exóticas (CONAMA, 2005). Cabe destacar que la Región Metropolitana es parte del hotspot de Chile central de biodiversidad, caracterizado por un alto grado de endemismo (Arroyo, 2002; Myers, 2000)

### **1.3 Ecosistemas andinos**

La mayoría de las especies endémicas se encuentran en la zona cordillerana, que posee una gran importancia para los habitantes de la región, ya que las plantas son utilizadas como fuente de alimento para el ganado durante los meses de verano (Fredericksen *y col*, 2011). Además, gran parte de los recursos hídricos que proveen a la población provienen de la zona cordillerana, que alimentan los ríos Maipo y Mapocho (Niemeyer, 1980). En esta zona es posible reconocer distintos pisos vegetacionales, dependiendo de las especies que los componen. Este estudio se centra en el piso andino superior, que se encuentra entre los 2800-3300 m.s.n.m. donde las especies dominantes corresponden a *Adesmia schneideri* (Phil.), *Laretia acaulis* (Cav.) Gillies & Hook.,

*Adesmia obovata* (Clos.), *Nassauvia pyramidalis* (Meyen) y *Anarthrophyllum gayanum* (A. Gray) B.D. Jacks. (Teillier y col, 2011).

El piso andino superior se caracteriza por ser una comunidad de matorral donde los arbustos pocas veces superan los 50 cm altura y donde existe una frecuente presencia de arbustos en cojín, además de un estrato de hierbas perennes, principalmente de gramíneas. La cobertura de la vegetación varía entre el 10 y 30% (Teillier y col, 2011). Cabe destacar que existen escasos antecedentes sobre la dinámica que existe en las comunidades del piso andino superior y su respuesta a la perturbación antrópica.

Con respecto a la ecología del sitio de estudio, existen diversos estudios que indican que podría existir un efecto nodriza entre algunas especies, donde plantas en cojín podrían facilitar el establecimiento de otro tipo de plantas (Badano, 2006; Cavieres y col, 1998; Cavieres y col, 2012). El conocimiento recopilado con respecto a la ecología de los ecosistemas a restaurar es crucial para el desarrollo de adecuados planes de restauración y manejo.

#### **1.4 Degradación de ecosistemas**

La degradación de los ecosistemas es producida principalmente por la acción antrópica. Whisenant (1999) propuso un modelo hipotético de degradación de ecosistemas basado en funcionalidad y umbrales biológicos y físicos; planteando cinco estados de degradación, desde el menos degradado (0) hasta el más degradado (4) (Figura 1). La degradación vegetal se separa en tres grupos principales: Estados 0-1,

donde la recuperación necesita solamente medidas que mejoren el manejo o disminuyan el daño. El estado 2, que requiere manipulación de la vegetación, y los estados 3 y 4 que requieren adicionalmente a la manipulación de la vegetación, la manipulación del ambiente físico. En la medida que aumenta la degradación de los ecosistemas, el sitio pierde control sobre sus recursos, disminuyendo la eficiencia en el uso y captura de los mismos, por lo cual los procesos primarios pierden funcionalidad, y se pueden sobrepasar umbrales más allá de los cuales el ecosistema no será capaz de recuperarse. Los distintos estados de degradación se identifican al analizar cambios en la diversidad, biomasa, relaciones interespecíficas, productividad primaria y secundaria, erosión, y cambios en los procesos ecosistémicos primarios. (Whisenant, 1999)

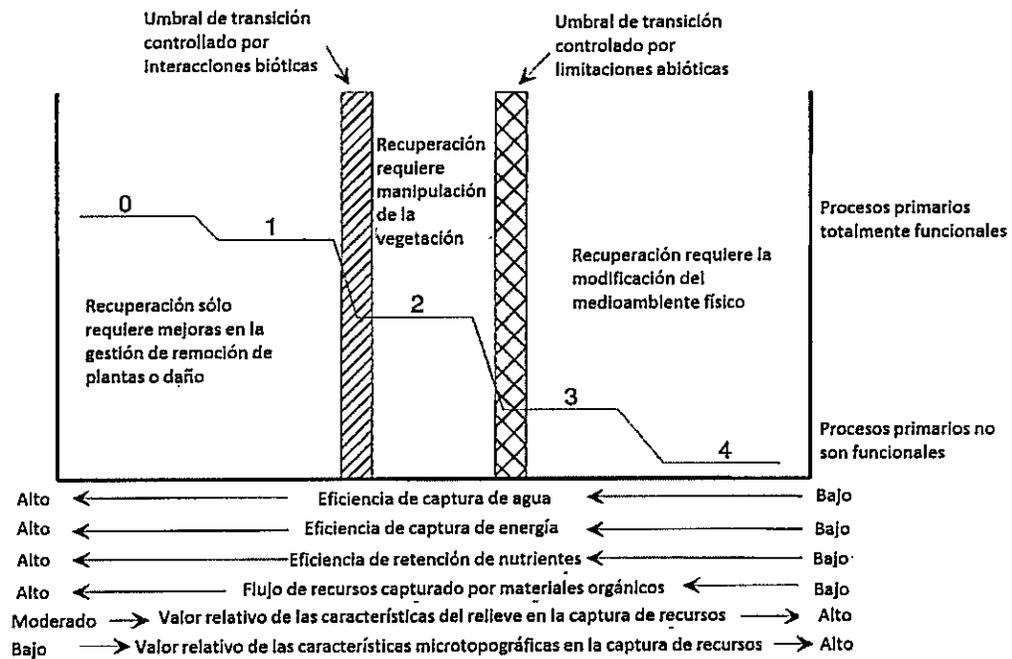


Figura 1: Modelo hipotético de degradación de ecosistemas. El eje de las ordenadas representa funcionalidad mientras que el eje de las abscisas representa eficiencia en el uso y captura de recursos. (Whisenant, 1999)

En el piso andino superior, los principales impactos antrópicos que existen en la zona corresponden a la actividad minera, la ganadería y el turismo. Entre éstos, la actividad ganadera es uno de los principales impactos que afectan el piso vegetacional Andino Superior. Acá se desarrolla la ganadería de transhumancia, donde el ganado se moviliza desde las zonas bajas hacia las zonas altas en el período estival, conocidas como veranadas. El mal manejo de los sitios de pastoreo puede provocar la degradación del ecosistema, afectando con esto, la biodiversidad y los procesos ecosistémicos (Fredericksen y col, 2011).

La actividad minera se encuentra acotada principalmente a las zonas de extracción y a los caminos. En la zona cordillerana del cajón del Maipo destaca la minería no

metálica, y sus principales impactos consisten en contaminación producto del material particulado, contaminación de las aguas y contaminación acústica (CONAMA, 2005).

La zona cordillerana de la Región Metropolitana también se ve afectada por el turismo, una actividad más acotada espacialmente que la ganadería, pero que produce una mayor diversidad de impactos, tales como contaminación, erosión, deforestación y modificación de hábitats (Fredericksen *y col.*, 2011)

Se ha observado que la cobertura vegetal está correlacionada con la distancia a las ciudades y caminos (Santos *y col.* 2002), ya que a menor distancia de los caminos se reduce la cobertura vegetal. Además los caminos influyen en la fragmentación del hábitat (Reed *y col.* 1996)

Con respecto al forrajeo por parte de ganado, se ha observado cambios en cobertura de especies vegetales en un gradiente de forrajeo, en los cuales se observan cambios significativos en la composición florística de la comunidad, disminuyendo la cobertura de especies herbáceas y arbustivas al acercarse al origen de la fuente donde se encontraba el ganado (Beeskow *y col.* 1995; Sasaki *y col.* 2008).

## 1.5 Hipótesis

H1: Existe una correlación negativa entre cercanía a los caminos y estado de degradación.

H2: Existe una correlación negativa entre forrajeo y degradación, por lo tanto, parcelas más degradadas se encontrarán más cerca de los corrales de ganado.

## 2. Objetivos

### General:

- Caracterizar los estados de degradación del piso andino superior en el Valle del Yeso, Región Metropolitana, con el fin de contribuir a proponer medidas para su restauración

### Específicos:

- Comparar las características bióticas y abióticas de cada uno de los estados de degradación
- Identificar las variables de mayor relevancia para identificar los umbrales de transición entre estados.
- Proponer medidas de restauración para cada uno de los distintos estados de degradación
- Relacionar estado de degradación con distancia a los caminos y corrales de ganado.

### 3. Materiales y Métodos

#### 3.1 Determinación de estados de degradación

Los estados de degradación se determinaron mediante el modelo hipotético de degradación gradual de paisajes (Whisenant, 1999). Se analizaron mapas de la provincia cordillera, región Metropolitana, correspondientes al proyecto Santiago Andino (Fredericksen y col, 2011) utilizando el software ArcGIS y Google Earth para determinar *a priori* los lugares más probables de los distintos estados de degradación. En terreno éstos se determinaron mediante la observación a nivel de paisaje utilizando el modelo conceptual de degradación gradual que describe los síntomas de degradación, proporcionando un marco para la evaluación inicial del daño al ecosistema. (Whisenant, 1999).

#### 3.2 Área de estudio

El área de estudio corresponde al piso Andino Superior de la comuna de San José de Maipo, Región Metropolitana. En el sector de Valle del Yeso ( $33^{\circ}36'39''\text{S}$   $69^{\circ}58'46''\text{O}$ ) se analizaron los Estados 2, 3 y 4 (entre 2770 y 2920 m.s.n.m.) mientras que el Estado 1 se analizó en El Monumento Nacional El Morado ( $33^{\circ}49'22''\text{S}$   $70^{\circ}3'47''\text{O}$ ) entre 2400 a 2440 m.s.n.m. El estado 0 no está contemplado en este estudio debido a que no se encontraron sitios sin intervención antrópica en la Región Metropolitana (Figura 2).

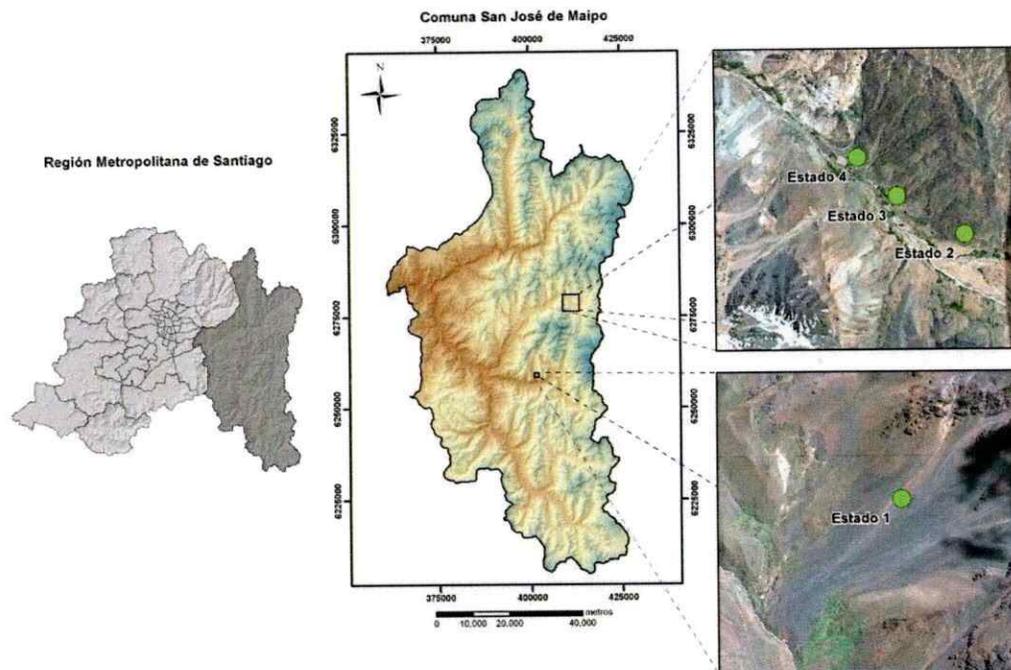


Figura 2: mapa del área de estudio indicando la localización de los cuatro estados de degradación

### 3.2.1 Clima

El clima de la zona de estudio corresponde al clima templado cálido de montaña con estación seca de 4 a 5 meses que se extiende entre los meses de Octubre a Febrero. Corresponde a las zonas cordilleranas más altas de la Región, por sobre los 2000 msnm donde son más frecuentes las temperaturas inferiores a 0°C durante los meses más fríos del año, lo que provoca que las precipitaciones invernales sean preferentemente en la forma de nieve.

El Valle del Yeso tiene una temperatura promedio anual de 2,6 °C, 489 mm de precipitación anual. Mientras que para el MN El Morado la temperatura anual es de 8,7 °C y las precipitaciones de 622 mm anuales. Estos datos fueron obtenidos por

interpolación espacial de datos climáticos obtenidos a partir de la base de datos worldclim entre los años 1950 y 2000 (Hijmans y col., 2005).

Las bajas temperaturas en general y la nieve que cae en invierno permiten la existencia de algunos glaciares, como los de Marmolejo, Los Piuquenes y El Plomo (Dirección meteorológica de Chile, 2013).

### 3.2.2 Formación vegetacional

La formación vegetacional corresponde a matorral bajo mediterráneo andino dominado por la planta en cojín *Laretia acaulis* y el subarbusto *Berberis empetrifolia* (Lam.) (Luebert & Pliscoff, 2006, Fredericksen y col, 2011). Además es frecuente encontrar herbáceas como *Oxalis compacta* (Gillies ex Hook. & Arn.), *Poa holciformis* (J. Presl), *Bromus setifolius* (J. Presl) y *Hordeum comosum* (J. Presl).

### 3.2.3 Edafología

En general, los suelos de esta zona son esqueléticos, y poseen una abundante pedregosidad, principalmente del tipo angular. Ello debido a que los procesos pedogénicos no han tenido la intensidad suficiente para originar suelos que posean una clara diferenciación de horizontes. Los suelos están compuestos principalmente por arena originada a partir de rocas andesíticas y basálticas. Estos suelos serían de clase VIII de capacidad de uso, lo que corresponde a suelos de preservación sin intervención. Este tipo de suelo puede considerarse como Entisols (Luzio y col, 2010)

### 3.3 Recolección y análisis de muestras

#### 3.3.1 Variables de vegetación

Se elaboró un listado florístico para cada uno de los estados de degradación durante el período de verano (diciembre-enero de 2013) recolectando muestras de vegetación para la elaboración de un herbario. Para cada una de las muestras recolectadas se anotó la ubicación, fecha, nombre del recolector y estado en el cual fue colectada la muestra.

Durante el mes de enero de 2013 se establecieron tres parcelas de 4×4 m para cada uno de los estados de degradación encontrados en la zona de estudio (Tabla 1). En cada una de ellas se establecieron cinco transectos paralelos a la pendiente espaciados por 1 m. En cada transecto se utilizó el método de intercepto de puntos cada 0,2 m totalizando 100 puntos por parcela. En cada punto se identificó especie, altura y espesor.

Tabla 1: Ubicación de las parcelas en los distintos estados de degradación, indicando latitud, longitud, exposición, pendiente y altitud.

Estado	Parcela	Latitud	Longitud	Altitud	Exposición (grados)	pendiente (grados)
1	1	-33.809414°	-70.067643°	2409	225	27
1	2	-33.808682°	-70.064529°	2426	225	27
1	3	-33.808682°	-70.064529°	2444	225	27
2	1	-33.630899°	-69.947938°	2907	200	28
2	2	-33.632868°	-69.940004°	2926	200	28
2	3	-33.632868°	-69.940004°	2938	200	28
3	1	-33.628488°	-69.952600°	2817	240	25
3	2	-33.628488°	-69.952600°	2799	240	25
3	3	-33.808682°	-70.064529°	2805	240	25
4	1	-33.623321°	-69.958922°	2768	240	32
4	2	-33.623438°	-69.958768°	2771	240	32
4	3	-33.623817°	-69.958364°	2771	240	32

En el laboratorio, se realizó la identificación florística basado en claves taxonómicas y consulta experta. Se determinó cada una de las especies indicando el género, la especie, el tipo de hábito (arbustivo o herbáceo) y si corresponde a una especie endémica, nativa o alóctona (Zuloaga, 2008).

Se determinó la biomasa de hojarasca por metro cuadrado de suelo para cada una de las parcelas, utilizando cuadrantes de 0,5 x 0,5 m y recolectando la biomasa de hojarasca sobre el suelo. Este material se secó a 70°C por 48 horas y se determinó el peso seco de la muestra.

A partir de la abundancia de cada una de las especies, se comparó la composición y abundancia de las especies utilizando el Estado 1 como estado de referencia. Además con estos datos se determinó altura, cobertura y fitovolumen total, arbustivo y herbáceo.

Con la información obtenida por el método de intercepto de puntos y cuadrantes se determinó para cada una de las parcelas la riqueza total, de herbáceas y arbustivas, y los índices de HAI y CSII (Jaunatre *et al.*, 2013) para determinar la diversidad alfa se utilizó el índice de Shannon:

$$H' = - \sum_{i=1}^s p_i \log_2 p_i$$

Donde S corresponde al número de especies y  $p_i$  corresponde a la proporción de los individuos de una especie con respecto al total de individuos.

Para determinar el CSII (Community Structure Integrity Index) se utilizó la siguiente fórmula:

$$CSII = \frac{\sum_{i=1}^S (n_i - \Delta_{i,j})}{\sum_{i=1}^S n_{i,j}} \quad j=1 \dots K$$

La fórmula corresponde al promedio de las sumatorias para cada uno de los estados de la cobertura de cada una de las especies menos la diferencia entre el estado de referencia y el estado evaluado dividido por la sumatoria de la cobertura de las especies en el estado de referencia, donde S corresponde al número total de especies en todas las comunidades, K es el número total de comunidades de referencia, la barra superior corresponde al promedio aritmético de todas las comunidades de referencia y n corresponde a la abundancia de cada una de las especies. En este estudio, cada una de las 12 parcelas estudiadas corresponde a una comunidad, siendo las 3 parcelas del Estado 1 las comunidades de referencia, o RC.

El CSII normalizado se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$CSII_{norm} = \frac{CSII}{CSII_{RC}}$$

Donde  $CSII_{RC}$  corresponde al CSII de la comunidad de referencia, por lo tanto el  $CSII_{norm}$  promedio de las comunidades de referencia es igual a 1.

Por último, se calculará el HAI (Higher Abundance Index) que mide el promedio de la proporción de especies que son más altas en comparación a la comunidad comparado con la comunidad de referencia, y se define por:

$$HAI = \frac{\sum_{i=1}^S (\Delta^+_{i,j})}{\sum_{i=1}^S n_{iAC}} \quad j=1 \dots K$$

El cual corresponde al promedio de la sumatoria de la cobertura de especies por sobre la cobertura en las comunidades de referencia dividido por la cobertura total de

especies. AC (assessed community) corresponde a la parcela evaluada. La barra superior se refiere al promedio aritmético entre las comunidades de referencia. El HAI considera especies que tengan una abundancia mayor a las comunidades de referencia.

### *3.3.2 Variables de suelo*

Se realizó una calicata de aproximadamente  $1 \times 1 \times 1 \text{ m}$  ( $1 \text{ m}^3$ ) en cada una de los estados de degradación para describir el suelo utilizando las guías de clasificación de suelos del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) y la guía de clases prácticas de Edafología (Casanova, 2004; USDA, 2004). De cada horizonte del suelo se tomaron muestras de 1 kg para el análisis de propiedades físicas y químicas, además de coleccionar volúmenes de suelo conocido mediante cilindros metálicos para determinar la densidad aparente. En el estado 1, ubicado en el Monumento Nacional El Morado, no se realizó una calicata debido a su condición de Área Silvestre Protegida del Estado, pero sí se tomaron muestras con barreno a 10, 20 y 30 cm de profundidad.

Se tomaron 50 g a partir de cada una de las muestras de suelo extraídas en intervalos de 10 cm de profundidad y a continuación fueron tamizadas a 2 mm. Posteriormente se utilizó el método de Buyoucos (Casanova, 2004; USDA, 2004) para obtener el porcentaje de limo, arena y arcilla, determinando la clase textural de cada una de las muestras. Adicionalmente se tomaron muestras de 50 g que se enviaron a un laboratorio externo para determinar el porcentaje de carbono y nitrógeno total utilizando

el método de análisis de gases a combustión completa en el Laboratorio de Suelos de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

Las muestras de densidad aparente fueron pesadas en húmedo y luego en seco después de ser colocadas en un horno de aire forzado a 105°C durante 24 horas hasta alcanzar peso constante. Las muestras fueron pasadas por un tamiz de 2 mm, pesando el material fino y el grueso para determinar densidad aparente de la fracción fina, pedregosidad y porosidad.

Se determinó la capacidad de retención de agua utilizando el método de olla a presión de Richards (Richards, 1948; Oszust, 2010) utilizando olla a presión a 33 kPa y 1500 kPa para obtener la capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) respectivamente.

### *3.3.3 Variables de procesos*

En cada una de las parcelas se utilizaron cuadrantes de 0,5 m x 0,5 m para determinación de la biomasa de hojarasca sobre el suelo. Se tomaron cuatro mediciones: dos sin cobertura y dos bajo cobertura vegetal para mayor representatividad del sitio. En cada uno de estos cuadrantes se determinó el porcentaje de cobertura de pedregosidad, hojarasca y herbáceas, y se determinó la profundidad de la hojarasca. Se recolectó en cada uno de los cuadrantes la biomasa de hojarasca, colocándolas en bolsas de papel separadas.

Durante el mes de abril de 2013 se recolectaron 5 muestras por parcela de productividad de biomasa arbustiva anual sobre el nivel del suelo, utilizando cinco cuadrantes de 0,35 m x 0,35 m, ubicados uno en el centro y los otros cuatro equidistantes

entre el centro de la parcela y cada uno de los vértices. A partir de las muestras arbustivas recolectadas en los cuadrantes se determinó la biomasa arbustiva seca para determinar la productividad anual de arbustos en  $\text{g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ .

Se utilizó un infiltrómetro de minidiscos (Decagon, WA, EE.UU.) para medir la velocidad de infiltración de agua en  $\text{cm s}^{-1}$  para cada una de las parcelas (una medición bajo cobertura y una sin cobertura). Se recolectaron muestras de suelo de 0,25 kg para determinación del contenido gravimétrico de agua en el suelo, y a partir de estos datos, obtener la velocidad de infiltración.

Se utilizó una cámara analizadora de gases (EGM-4, PP-System, Hitchin, UK) para medir la respiración del suelo en  $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$ , realizando una medición bajo cobertura y una sin cobertura. Se midió la temperatura a nivel de suelo a través de un termómetro infrarrojo de amplio rango (modelo 42530, Extech Instruments, Nashua, NH, EE.UU.).

### **3.5 Análisis estadístico**

Se realizaron ANOVAs de una y dos vías para determinar diferencias significativas entre estados y cobertura, utilizando el programa R (versión 3.01). Se realizó un test de Shapiro-Wilks para determinar la normalidad de los datos y el test de Tukey cuando se encontraron diferencias significativas entre los distintos tratamientos.

Para poder analizar el efecto de la degradación con respecto a la distancia de los impactos antrópicos en la zona, se utilizaron las variables vegetacionales para

determinar el estado de degradación del ecosistema. Cada una de las 18 variables se normalizó y posteriormente se promediaron, para obtener un índice que se relacione con la calidad de la vegetación en el ecosistema. Mientras más alto sea este índice (más cercano a 1) mejor será la calidad del ecosistema.

Se construyó un gráfico de dispersión entre el índice calculado y la distancia al camino, y al corral de cabras respectivamente, determinando  $r^2$  para determinar si existe correlación entre la degradación y la distancia al camino y al corral respectivamente.

Se realizó un análisis de componentes principales para determinar que variables o combinación lineal de variables mejor explican las diferencias entre estados de degradación.

### **3.6 Directrices para restauración ecológica**

Para realizar recomendaciones para restauración ecológica, se determinaron los impactos en el ecosistema mediante revisión bibliográfica y observación en terreno. A partir de esta información, se proponen medidas de restauración para el piso andino superior.

Las medidas de restauración para el sitio se basaron en la metodología diseñada por "The SER International Primer on Ecological Restoration" (Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group. 2004.) que indica los pasos necesarios para lograr un adecuado proceso de restauración ecológica. En este trabajo se busca principalmente restaurar los procesos y estructura del ecosistema (Fig. 1).

## 4. Resultados

### 4.1 Descripción general de los estados de degradación:

Se puede observar diferencias en la composición florística entre los distintos estados de degradación. En general, se puede observar una disminución en la riqueza y cobertura de especies, además de una disminución en las especies arbustivas y un aumento en la cobertura relativa de herbáceas (Figura 3).

El estado 1 se encuentra ubicado en el Monumento Nacional El Morado, alejado de la zona que normalmente recorren los turistas, por lo tanto el impacto antrópico de esta zona es muy bajo. Este sitio se encuentra entre los 2400-2450 m.s.n.m. Se caracteriza por una mayor abundancia de especies herbáceas como *Poa holciformis*, *Laretia acaulis* y las arbustivas *Chuquiraga oppositifolia* (D.Don) y *Haplopappus anthylloides* (Meyen & Walp.) (Tabla 2, Figura 3, Anexo 1).

El estado 2 corresponde al sitio menos intervenido del Valle del Yeso. En esta zona, podemos encontrar surcos entre la cobertura vegetal que muestra el paso de ganado por la zona, sin embargo no se observó forrajeo en el sitio de estudio. Esta zona se encuentra alejada del sendero dentro del parque y de la entrada al mismo, por lo tanto, la presión antrópica del sitio es mucho menor a la encontrada en los otros sitios de estudio. Este sitio se ubica entre los 2900-2950 m.s.n.m. (Tabla 2, Figura 3, Anexo 1).

En el Estado 3 pueden observarse surcos erosivos, indicio de que el ganado caprino y ovino ha pastado en la zona. Se observa que algunas especies herbáceas y arbustivas han sufrido forrajeo por parte del ganado. Esta zona se encuentra alejada a más de 100 metros del camino, y la ganadería es la que más explica la degradación. Esta zona se ubica entre los 2830-2850 m.s.n.m. Se caracteriza por una gran abundancia de *Adesmia gracilis* (Meyen ex Vogel), *Senecio davilae* (Phil.), y *Poa holciformis*. (Tabla 2, Figura 3, Anexo 1).

Por último, en el estado 4 podemos encontrar un alto nivel de intervención antrópica, ya que cercano a la zona de estudio se encuentra el camino por donde circulan camiones que transportan yeso. La vegetación en el sitio se encuentra altamente forrajada, y durante la toma de muestras en el sitio, se observó la presencia de ganado caprino. Solamente se encontraron especies herbáceas. Los sitios se ubican entre 2750-2800 m.s.n.m. La especie dominante es *Poa holciformis*. (Tabla 2, Figura 3, Anexo 1).

**Tabla 2. Nombre científico, familia, forma de crecimiento, origen geográfico y endemismo de cada una de las especies encontradas en los distintos estados de degradación (Instituto de Botánica Darwinion, 2014)**

Nombre científico	Estado				familia	Hábito	origen geográfico	Endemismo
	1	2	3	4				
<i>Acaena splendens</i>	x				Rosaceae	hierba perenne	nativa	
<i>Adesmia gracilis</i>		x	x		Fabaceae	arbusto perenne	endémica	Ch/Arg
<i>Astragalus cruckshanksii</i>	x				Fabaceae	hierba perenne	endémica	Ch/Arg
<i>Bromus sp.</i>	x				Poaceae	Herbácea	Indeterminado	
<i>Chuquiraga oppositifolia</i>	x		x		Asteraceae	arbusto perenne	endémica	Ch/Arg
<i>Cistanthe picta</i>			x	x	Montiaceae	hierba perenne	endémica	Ch/Arg
<i>Diplolepis nummulariifolia</i>	x				Apocynaceae	subarbusto perenne	endémica	Ch/Arg
<i>Haplopappus anthyllodes</i>	x				Asteraceae	arbusto perenne	endémica	Ch/Arg
<i>Hypochaeris sp.</i>				x	Asteraceae	Herbácea	Indeterminado	
<i>Laretia acaulis</i>	x				Apiaceae	hierba o subarbusto perenne	endémica	Ch/Arg
<i>Nicoraepoa andina</i>	x				Poaceae	hierba perenne	endémica	Ch/Arg
<i>Perezia carthamoides</i>	x				Asteraceae	hierba perenne	endémica	Ch/Arg
<i>Phacelia secunda</i>		x			Boraginaceae	hierba o subarbusto perenne	nativa	
<i>Plantago firma</i>	x				Plantaginaceae	hierba anual	endémica	Ch
<i>Poa holciformis</i>	x	x	x	x	Poaceae	hierba perenne	endémica	Ch/Arg
<i>Quinchamalium chilense</i>	x				Schoepfiaceae	hierba perenne	nativa	
<i>Senecio davilae</i>	x	x	x		Asteraceae	subarbusto perenne	endémica	Ch
<i>Senecio sp.</i>		x	x		Asteraceae	herbácea/subarbusto	indeterminado	

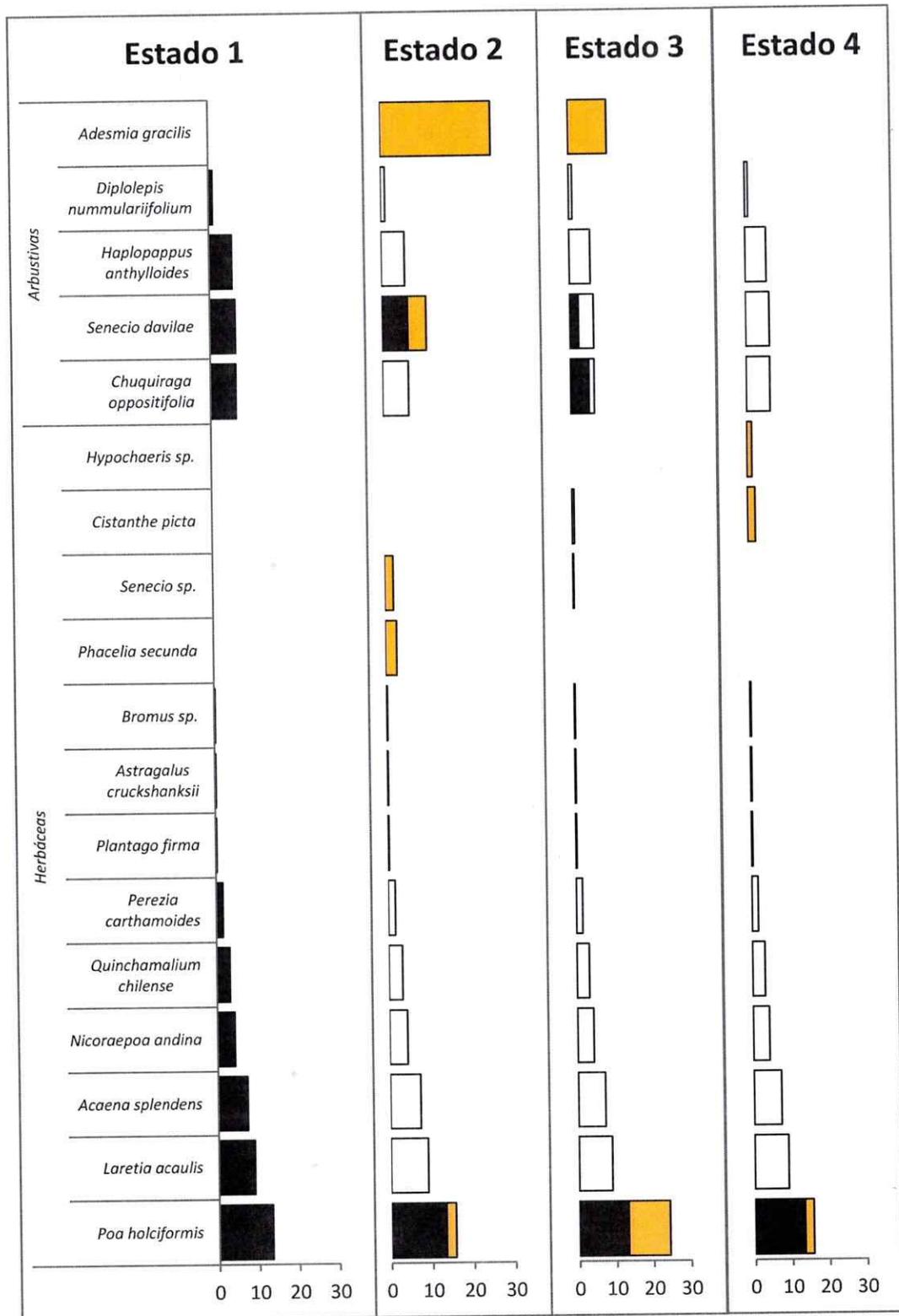


Figura 3: Abundancia absoluta de las especies encontradas en los distintos estados de degradación. Eje x corresponde a la cobertura absoluta de la especies, eje y corresponde a las especies encontradas en las parcelas. Negro corresponde a las coberturas de cada especie, blanco <sup>23</sup> corresponde a la cobertura perdida comparada con el estado 1, amarillo a la cobertura que aumentó en comparación con el estado 1.

#### 4.2 Análisis de las variables bióticas y abióticas

De las 37 variables analizadas en este estudio, se encontraron diferencias significativas entre los distintos estados de degradación en 21 de ellas. Al comparar las mediciones con y sin cobertura, solamente se encontraron diferencias significativas en la biomasa de hojarasca (Tabla 3).

Con respecto a las variables físicas de suelo, se observaron diferencias significativas entre los estados de degradación para las variables de porcentaje de arena, arcilla y densidad aparente y densidad aparente de la fracción fina.

Entre las variables hídricas de suelo, se encontraron diferencias significativas para el porcentaje de porosidad entre los estados. En las variables químicas del suelo, hay diferencias significativas entre estados para las variables de porcentaje de C y porcentaje de N.

Con respecto a las variables de vegetación, se encontraron diferencias significativas en las variables de cobertura total, arbustiva y herbácea, altura promedio total y arbustiva, y fitovolumen total y arbustivo entre los estados de degradación.

En relación a los índices de diversidad, se encontraron diferencias significativas entre los estados para la riqueza, riqueza arbustiva y herbácea, índice de Shannon y Shannon de herbáceas, y para el CSII.

**Tabla 3: Caracterización de vegetación, suelos y procesos a lo largo de un gradiente de perturbaciones en el piso andino superior. Valores se presentan como promedios ( $\pm 1$  error estándar,  $n=3$ ). Letras distintas representan diferencias significativas. \*, \*\*, \*\*\* Representan valores de  $p < 0.05$ , 0.01 y 0.001 respectivamente.**

Variable	Unidades	Estado de Degradación				ANOVA			
		E1	E2	E3	E4	E	C	C×E	
<i>Suelo</i>									
Clase Textural		<i>areno francosa</i>	<i>areno francosa</i>	<i>franco arenosa</i>	<i>franco arenosa</i>	-	-	-	
<i>Físicas</i>									
Arcilla	(%)	5.3 $\pm$ 0.31 b	6.67 $\pm$ 0.32 b	18.33 $\pm$ 2.08 a	17.25 $\pm$ 1.29 a	***	ns	ns	↑
Limo	(%)	10.83 $\pm$ 0.94	12.24 $\pm$ 1.12	17.26 $\pm$ 3.45	17.53 $\pm$ 1.16	ns	ns	ns	↔
Arena	(%)	83.87 $\pm$ 0.84 a	81.08 $\pm$ 1.18 a	64.41 $\pm$ 4.09 b	65.22 $\pm$ 1.78 b	***	ns	ns	↓
Pedregosidad	(%)	46.55 $\pm$ 5.18	55.43 $\pm$ 3.39	42.05 $\pm$ 3.92	43.21 $\pm$ 4.20	ns	ns	ns	↔
Densidad aparente	(g cm <sup>-3</sup> )	1.333 $\pm$ 0.033 a	1.268 $\pm$ 0.024 a	1.054 $\pm$ 0.027 b	1.154 $\pm$ 0.059 ab	***	ns	ns	↔
DA fracción fina	(g cm <sup>-3</sup> )	0.912 $\pm$ 0.04 a	0.753 $\pm$ 0.046 b	0.726 $\pm$ 0.026 b	0.8 $\pm$ 0.036 ab	*	ns	ns	↔
<i>Hídricas</i>									
HA	(mm)	8.36 $\pm$ 0.33	9.62 $\pm$ 0.50	8.86 $\pm$ 0.74	8.05 $\pm$ 0.10	ns	ns	ns	↔
CC	(%)	18.23 $\pm$ 1.35 b	18.73 $\pm$ 0.47 ab	18.08 $\pm$ 0.81 b	22.15 $\pm$ 0.68 a	*	ns	ns	↑
PMP	(%)	9.87 $\pm$ 1.48 b	9.11 $\pm$ 0.61 b	9.22 $\pm$ 0.57 b	14.10 $\pm$ 0.62 a	**	ns	ns	↑
Porosidad	(%)	49.69 $\pm$ 1.25 b	52.14 $\pm$ 0.9 b	60.23 $\pm$ 1.02 a	56.46 $\pm$ ab	***	ns	ns	↔
<i>Químicas</i>									
C	(%)	1.82 $\pm$ 0.27 b	3.11 $\pm$ 0.36 a	2.07 $\pm$ 0.41 ab	1.42 $\pm$ 0.17 b	*	ns	ns	↔
N	(%)	0.132 $\pm$ 0.018 b	0.271 $\pm$ 0.029 a	0.163 $\pm$ 0.022 b	0.123 $\pm$ 0.015 b	***	ns	ns	↔
C/N	-	13.82 $\pm$ 0.36	11.51 $\pm$ 0.1	12.39 $\pm$ 1.68	11.67 $\pm$ 0.29	ns	ns	ns	↔
<i>Vegetación</i>									
Cobertura hojarasca	(%)	8.25 $\pm$ 3.93	8.75 $\pm$ 2.86	7.83 $\pm$ 1.9	5.5 $\pm$ 1.17	ns	ns	ns	↔
Profundidad hojarasca	(cm)	0.20 $\pm$ 0.02	0.72 $\pm$ 0.09	0.65 $\pm$ 0.22	0.83 $\pm$ 0.40	ns	ns	ns	↔
Biomasa hojarasca	(g m <sup>-2</sup> )	10.8 $\pm$ 4.64	18.6 $\pm$ 3.51	15.21 $\pm$ 5.3	16.44 $\pm$ 5.78	ns	**	ns	↔
Cobertura total	(%)	46.33 $\pm$ 8.01 a	50.33 $\pm$ 5.81 a	37.67 $\pm$ 3.93 ab	18.33 $\pm$ 3.84 b	*	-	-	↓
Altura promedio	(m)	0.0353 $\pm$ 0.0031 b	0.0659 $\pm$ 0.005 a	0.0433 $\pm$ 0.004 b	0.0133 $\pm$ 0.0021 c	***	-	-	↓
Fitovolumen total	(m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> )	0.0149 $\pm$ 0.002 bc	0.0522 $\pm$ 0.0063 a	0.024 $\pm$ 0.0029 b	0.0053 $\pm$ 0.0013 c	***	-	-	↓
Cobertura arbustiva (I)	(%)	19.33 $\pm$ 4.06 b	37.33 $\pm$ 6.64 a	17.67 $\pm$ 1.76 b	0	*	-	-	↓
Altura arbustiva	(m)	0.032 $\pm$ 0.007 b	0.121 $\pm$ 0.021 a	0.072 $\pm$ 0.016 ab	0	*	-	-	↓

Variable	Unidades	Estado de Degradación				ANOVA			
		E1	E2	E3	E4	E	C	C×E	
Fitovolumen arbustivo	(m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> )	0.0057±0.0012 b	0.0429±0.0053 a	0.0123±0.0016 b	0	***	-	-	↓
Cobertura herbáceas	(%)	10.0±2.9 b	29.58±4.38 a	20.5±3.25 ab	4.92±2.13 b	***	ns	ns	↓
Altura herbáceas	(cm)	2.42±0.62	4.34±1.48	4.18±1.09	2.68±0.26	ns	ns	ns	↔
Fitovolumen herbáceas	(m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> )	0.008±0.001	0.0081±0.0023	0.0108±0.0035	0.0053±0.0012	ns	-	-	↔
<i>Índices de biodiversidad</i>									
Riqueza total	(n° especies)	13	5	6	3	-	-	-	
Riqueza	(n° especies)	10±1.15 a	4.33±0.33 b	3.67±0.67 b	2±0 b	***	-	-	↓
Riqueza arbustiva	(n° especies)	3.33±0.33 a	2±0 b	1.67±0.33 b	0	*	-	-	↓
Riqueza herbácea	(n° especies)	6.67±0.88 a	2.33±0.33 b	2±0.58 b	2±0 b	***	-	-	↓
Índice de Shannon	-	2.12±0.5 a	1.44±0.08 ab	1.08±0.11 ab	0.57±0.05 b	*	-	-	↓
Shannon arbustivas	-	0.75±0.13	0.83±0.04	0.52±0.07	0	ns	-	-	↓
Shannon herbáceas (1)	-	1.38±0.37 a	0.62±0.05 b	0.56±0.05 b	0.57±0.05 b	*	-	-	↓
CSII	-	0.492±0.035 a	0.066±0.016 b	0.059±0.03 b	0.085±0 b	***	-	-	↓
CSII normalizado	-	1±0.07 a	0.133±0.033 b	0.12±0.06 b	0.173±0.086 b	***	-	-	↓
HAI	-	0.79±0.28	0.89±0.27	0.59±0.07	0.19±0.05	ns	-	-	↔
<i>Procesos</i>									
Respiración	(μmol CO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	0.013±0.013	0.072±0.027	0.053±0.041	0.118±0.044	ns	ns	ns	↔
Infiltración	(cm s <sup>-1</sup> )	0.0058±0.0037	0.0034±0.0021	0.0023±0.0005	0.0020±0.0010	ns	ns	ns	↔
Productividad arbustiva	(g m <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup> )	53.24±26.84	78.68±20.94	24.78±2.91	0	ns	ns	ns	↓

El estado 1 seleccionado en el sitio de El Morado posee variables relacionadas con fitovolumen y altura significativamente inferiores a las variables encontradas en el estado 2 del Valle del Yeso. También se observa una riqueza y diversidad de especies mayor que en el resto de los sitios. El estado 2 se caracteriza por ser el estado que posee mayor fitovolumen, cobertura y altura de la vegetación mayores que el resto de los estados. El estado 3 se caracteriza por una mayor porosidad del suelo que el resto de los

estados, y por último el estado 4 se observa una mayor CC y PMP que en el resto de los estados.

Las variables analizadas fueron organizadas para indicar si aumentan, disminuyen, o no hay diferencias claras entre los distintos estados de degradación (Tabla 3).

#### *4.2.1 Variables de suelo*

Con respecto a las variables de suelo, se observa que tanto el porcentaje de arcilla, CC y PMP aumentan cuando aumenta el estado de degradación, ya que éstas son mayores en el estado 4. Las variables de porcentaje arena, densidad aparente, densidad aparente fracción fina, porcentaje Carbono y porcentaje Nitrógeno disminuyen al aumentar el estado de degradación. No se observa una tendencia clara con respecto a la degradación en el resto de las variables.

Se describieron cuantitativa (Tabla 4, Anexo 3) y cualitativamente (Anexo 2) las calicatas realizadas en los estados 2, 3 y 4. Se observa que la densidad aparente, densidad aparente fracción fina, porcentaje de carbono y porcentaje de nitrógeno disminuyen al aumentar la profundidad de cada calicata (Anexo 3).

**Tabla 4: Descripción cuantitativa de cada calicata en los distintos estados de degradación. \* indica ausencia de datos debido a que no se permite realizar calicatas en el MN El Morado.**

Estado de degradación	Estado 1	Estado 2	Estado 3	Estado 4
profundidad calicata (cms)*	-	65	70	70
clase textural	areno francoso	franco arenoso	franco arenoso	franco arenoso
% arcilla	5.73	6.80	16.89	17.04
% limo	10.93	9.65	16.72	17.39
% arena	83.33	75.22	66.38	65.57
% N	0.11	0.18	0.11	0.03
% C	1.46	1.91	1.05	0.41
C/N	12.82	9.77	9.89	13.70
densidad aparente	*	1.07	0.99	0.92
DA fracción fina	*	0.72	0.71	0.57
% pedregosidad	*	42.36	36.98	48.86
% porosidad	*	51.16	62.78	65.31
CC	*	17.87	18.50	23.84
PMP	*	10.47	11.49	13.65
HA	*	7.39	7.02	10.20

#### 4.2.2 Variables de vegetación

Las variables de vegetación muestran una tendencia a la disminución para las variables de cobertura total, altura promedio, fitovolumen total, cobertura arbustiva, altura arbustiva, fitovolumen arbustivo y cobertura herbácea. El resto de las variables no presentan una tendencia con respecto al aumento de la degradación. Cabe destacar que se encontraron especies arbustivas en los estados 1, 2 y 3. En el estado 4 sólo se encontraron especies herbáceas

#### *4.2.3 Variables de diversidad*

En las variables de diversidad, riqueza, riqueza arbustiva, riqueza herbácea, índice de Shannon, índice de Shannon arbustivo, CSII y CSII normalizado disminuyen al aumentar el estado de degradación. El resto de las variables no presentaron una tendencia con respecto a la degradación o no presentaron diferencias significativas (Tabla 3).

Además de considerar el estado 1 como estado de referencia, se compararon los estados 2, 3 y 4 considerando al estado 2 como la comunidad de referencia. Al realizar este análisis, se observó que tanto el CSII y HAI disminuyen al aumentar la degradación (Figura 4).

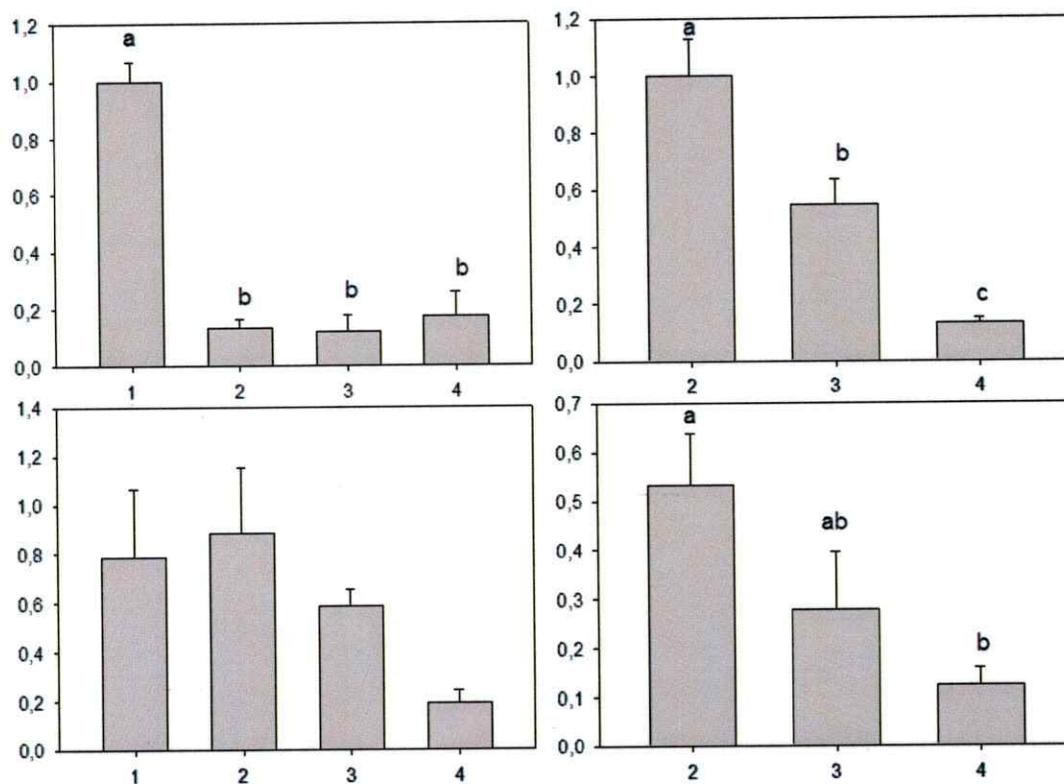


Figura 4: Índices CSII y HAI considerando estado 1 como comunidad de referencia (gráficos de la izquierda) y CSII y HAI considerando estado 2 como estado de referencia (gráficos de la derecha). Eje y indica valor del índice, eje x indica estado de degradación

#### 4.2.4 Variables de procesos

En el caso de las variables de procesos, se encontró que la biomasa arbustiva disminuye al aumentar la degradación, ya que no se encontró biomasa arbustiva en el estado 4. Las otras variables no mostraron diferencias significativas entre los estados de degradación.

### 4.3 Variables que inciden en el umbral de degradación

A partir de los resultados presentados en la Tabla 3, se determinó qué variables tenían un cambio significativo en el umbral controlado por interacciones bióticas (estados 1 y 2), el umbral controlado por limitaciones abióticas (estados 2 y 3) y el umbral entre los estados 3 y 4. Se encontraron 6, 3 y 11 variables representativas para cada uno de los umbrales de degradación respectivamente (Figura 5).

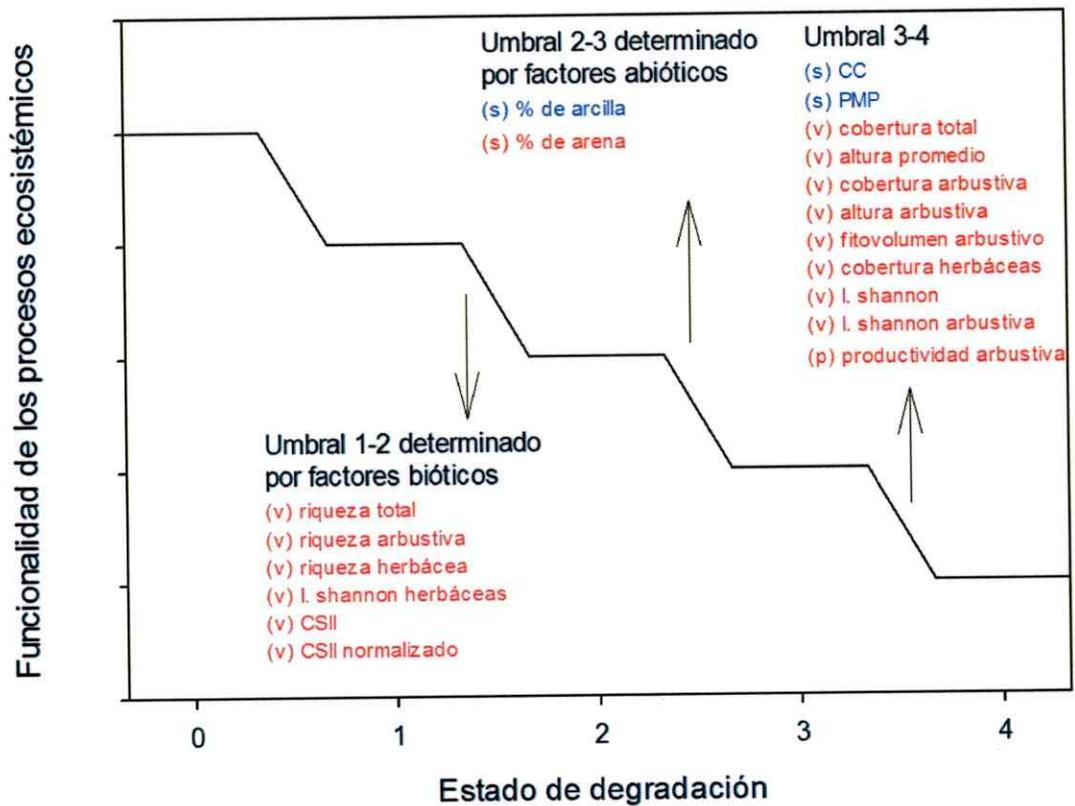


Figura 5: Variables que cambian significativamente en cada uno de los umbrales de degradación, para las variables vegetacionales (v), de suelo (s) y de procesos (p). En rojo las variables que disminuyen con la degradación y en azul las que aumentan.

#### 4.4 Relación entre la degradación y la distancia a los impactos antrópicos

Se observó una correlación entre la distancia al camino y el estado de degradación de las parcelas. (Fig. 6) Es importante destacar que el estado 1, se dejó fuera de este análisis debido a que dentro del Monumento Nacional El Morado no existen caminos por donde pasen vehículos, por lo tanto sólo se consideraron los estados 2, 3 y 4 ubicados en el Valle del Yeso. A mayor distancia del camino se observa menos degradación en el ecosistema.

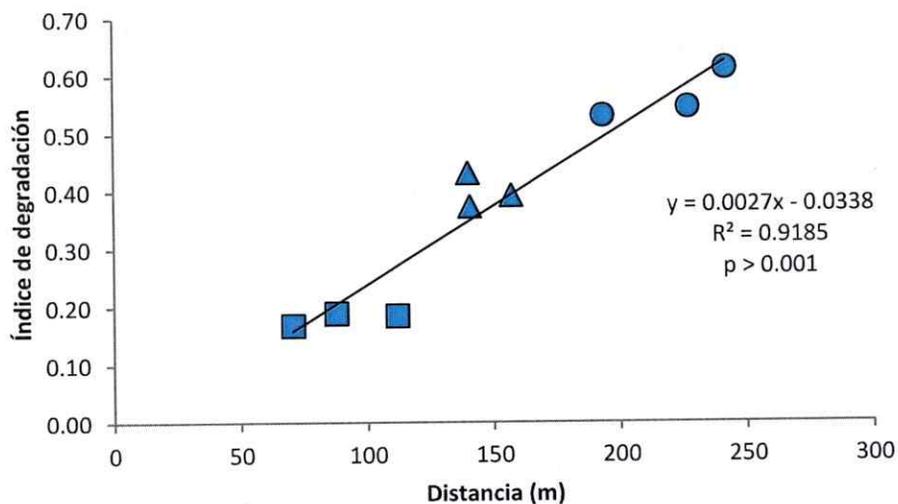


Figura 6: relación entre índice de degradación y distancia al camino. El eje y corresponde al índice de degradación y el eje x a la distancia al camino. Cuadrado corresponde a las parcelas del estado 4, triángulo al estado 3, y círculo al estado 2.

Se observó una correlación entre la distancia al corral de cabras y el estado de degradación. (Fig. 7) La presencia de ganado sólo se observó en el Valle del Yeso, por

lo tanto se consideraron los estados 2, 3 y 4. Se observa un aumento en la degradación al disminuir la distancia con el punto de origen del ganado.

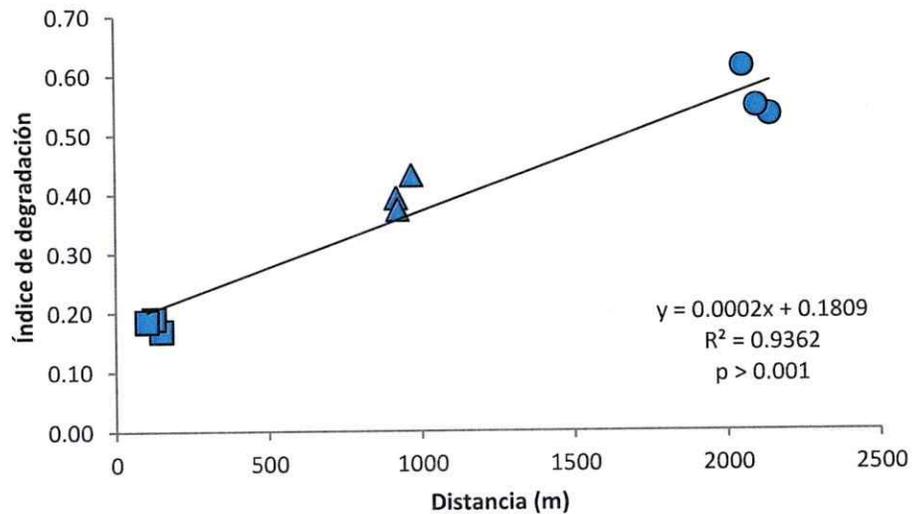


Figura 7: relación entre índice de degradación y distancia al corral de ganado. El eje vertical corresponde al índice de degradación, y el eje x representa la distancia al corral. Rojo corresponde a las parcelas del estado 4, amarillo al estado 3 y verde al estado 2.

Según los datos obtenidos, tanto la hipótesis 1 como la hipótesis 2 se confirman para los estados 2, 3 y 4.

#### 4.5 Análisis de componentes principales

Se observa que las parcelas son muy parecidas dentro de cada estado, además las parcelas se ordenan por nivel de degradación a lo largo del componente 1, pero no del componente 2. Sin embargo, las parcelas 2, 3 y 4 si se ordenan a lo largo del componente 2 (Figura 8). Las parcelas del estado 1 y el estado 3 están explicadas por las mismas variables, pero de forma inversa (csii, csii normalizado, daff, riqueza,

shannon y cobertura de herbáceas, y riqueza total). El estado 2 se relaciona con las variables de fitovolumen, y altura principalmente, y por último el estado 4 se relaciona de manera inversa con el índice hai, y las variables arbustivas (riqueza, shannon, y biomasa)

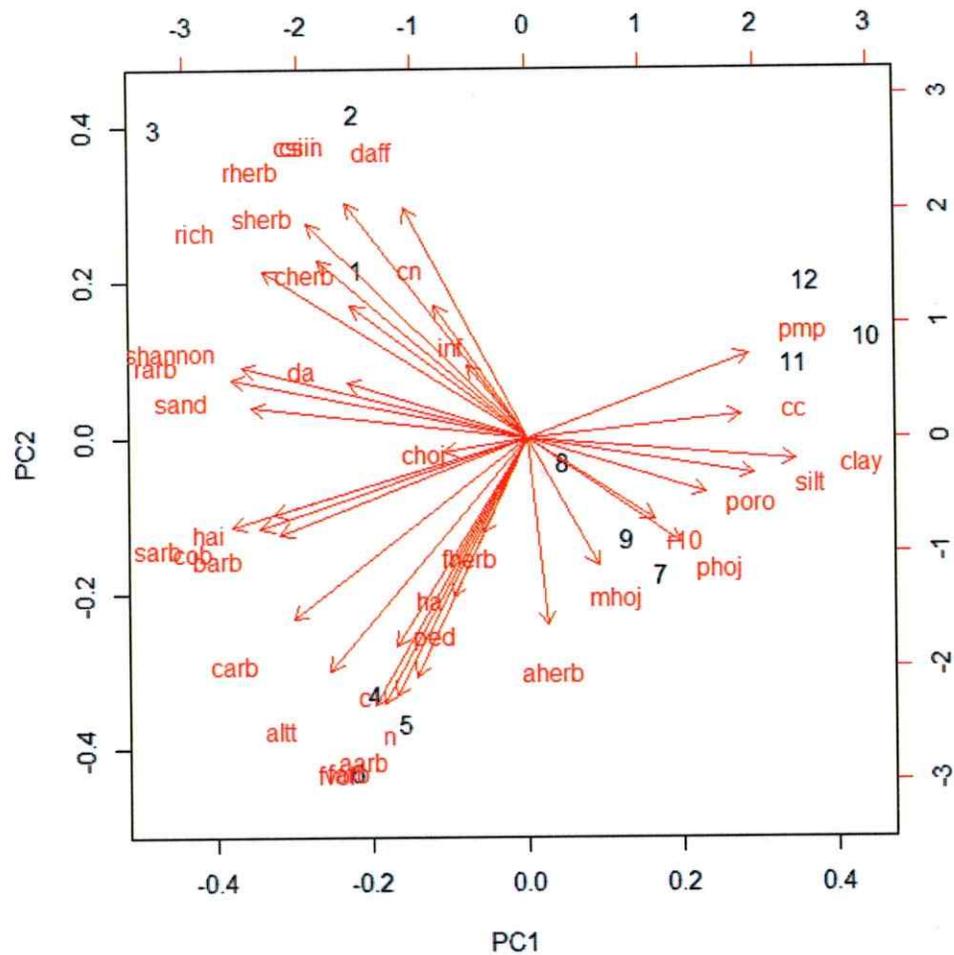


Figura 8: Análisis de componentes principales utilizando las 37 variables de este estudio. El eje 1 explica el 36,51% de la varianza, mientras que el eje 2 explica el 23,88% de la varianza. Los dos ejes principales explican el 60,39% de la varianza. Los números corresponden a las parcelas (1,2 y 3 estado 1, 4,5 y 6; estado 2, 7,8 y 9 estado 3, y 10, 11 y 12 al estado 4) cobhoj: cobertura de hojarasca, profhoj: profundidad de hojarasca, mhoj: biomasa de hojarasca, cobertura: cobertura total, palturat: promedio altura vegetación, fitovol: fitovolumen, cobarb: cobertura arbustiva, altarb: altura arbustiva, fitoarb: fitovolumen arbustivo, cobherb: cobertura herbáceas, altherb: altura herbáceas, fitoherb: fitovolumen herbáceas, rich: riqueza total, richarb: riqueza arbustivas, richerb: riqueza herbáceas, shannon: índice de shannon, shanarb: índice de shannon arbustivo, shanherb: índice de shannon herbáceas.

## 5. Directrices para restauración ecológica

### 5.1 Diagnósticos y objetivos de restauración

Los principales impactos que ha tenido la zona de estudio corresponde principalmente a la actividad turística, el forrajeo del ganado, y en menor medida la actividad de extracción minera, la que consiste principalmente en la extracción de yeso que se encuentra a pocos kilómetros en el sector de Valle del Yeso (Fredericksen *et al.* 2011).

Con respecto al forrajeo del ganado, es el impacto más fuerte que existe en la zona. En el estado 1 de degradación la actividad ganadera ha desaparecido en los últimos 40 años desde la creación del MN El Morado (Infante, 2012). En el estado 2 se observa que algunas de las especies, principalmente herbáceas, presentan signos de forrajeo. Ya en el estado 3 el efecto del forrajeo es más notorio, se observan surcos de erosión producto del ganado al pisotear el suelo, y se observa que tanto herbáceas como arbustivas presentan signos de forrajeo. Por último, en el estado 4 se observa la pérdida de las especies arbustivas, y la totalidad de las plantas herbáceas poseen signos de forrajeo.

El tránsito y la actividad turística produce impactos en los ecosistemas (Fredericksen *et al.* 2011). El camino por donde circulan personas y vehículos genera ruido y levantamiento de partículas que afectan al ecosistema, mientras más cerca estén del camino, mayor es el efecto que producen en los ecosistemas, sean estos positivos o

negativos (Grez *et al.* 2006) A pesar de que los efectos del turismo no fueron cuantificados en este estudio, es necesario incluirlos en discusiones futuras.

El último impacto que tiene esta zona es la actividad minera, donde los camiones que transportan el material circulan a unos cuantos kilómetros de la zona de estudio y no se observaron efectos debido a esta actividad.

En el estado 1, que posee menor degradación, los objetivos consisten en evitar la pérdida de especies producto de los impactos anteriormente mencionados, y de evitar el establecimiento de especies alóctonas. Para el estado 2 se observa una gran pérdida de riqueza y diversidad de especies. Para este sitio se mantienen los objetivos del estado 1, y además se busca alcanzar un nuevo objetivo que corresponde a recuperar la riqueza de especies nativas que se han perdido. En el estado 3 observamos que existen notorios efectos de forrajeo por parte del ganado. Junto con las medidas anteriores, para el estado 3 se busca recuperar la cobertura y biomasa vegetal que se ha perdido debido al impacto del ganado. Por último, en el estado 4 los efectos de la actividad ganadera son mucho más notorios, ya que prácticamente ha desaparecido la cobertura arbustiva. En este sitio se busca recuperar la cobertura arbustiva y total, a partir de la reintroducción de especies nativas y permitir la recuperación del ecosistema.

### **5.1 Recomendaciones para la restauración**

Para cumplir con los objetivos de restauración en el estado 1, el plan de restauración consiste en mantener la zona con una intervención humana mínima. Se recomienda crear senderos que permitan el paso de los turistas y minimizar el daño.

Estos caminos deben ser constantemente mantenidos para evitar la acumulación de partículas de polvo y material que afecte de manera negativa a las especies cercanas al camino. Para evitar la aparición de especies introducidas, es necesario evitar en las veranadas la presencia de ganado proveniente de otras zonas de Chile que pudieran contaminar la zona con propágulos de especies alóctonas.

En el estado 2, se recomienda evitar que el ganado ingrese a las zonas que se desea restaurar. De no ser posible esto, se recomienda no superar la capacidad de carga del ecosistema, para evitar que la productividad de éste disminuya y siga degradándose. Es importante destacar que se encontraron más especies de flora nativa fuera de las parcelas estudiadas. Es necesario proteger esos individuos para permitir la dispersión de semillas y que recuperen una abundancia similar a la observada en el estado 1, entendiendo que posiblemente existan diferencias en la composición florística debido a la gran distancia que existe entre el estado de referencia de El Morado, y los sitios de Valle del Yeso. Al excluir el ganado de la zona permitiría que de manera natural se recuperara la diversidad de especies. Los riesgos más importantes que podrían comprometer los objetivos de restauración son derrumbes y deslizamientos de rocas, los cuales son parte del sistema natural y no es necesario generar medidas para evitarlos.

Para el estado 3, además de aplicar las medidas explicadas anteriormente, que también deben aplicarse, es necesario recuperar la biomasa vegetacional. Para lograr esto se requiere la exclusión total del ganado y otras especies invasoras, como conejos y liebres, por lo tanto se necesitarán mallas especiales que permitan que se cumpla este

objetivo. Esto permitiría al sistema aumentar la productividad vegetacional y permitir que aumente la cobertura y biomasa vegetacional.

Por último, para cumplir los objetivos en el estado 4 se busca recuperar la riqueza de especies, y para eso se requiere reintroducir al sitio las especies que han desaparecido (Figura 3). Para eso es necesario permitir a los vectores dispersores de semillas cumplir su función. Si los vectores son insuficientes para recuperar el sistema, se haría necesaria la introducción de semillas al sitio para permitir el regreso de otras especies, evitando plantarlas en el suelo desnudo y aprovechando las zonas con cobertura vegetal que permitirían un ambiente más húmedo y con menos efecto del viento, lo cual ayudaría al establecimiento de las plántulas.

## 6. Discusión

### 6.1 Generalidades

Debido a la imposibilidad de encontrar sitios con poca degradación en el Valle del yeso (estados 0 y 1) se seleccionó un sitio con bajo nivel de degradación en el MN El Morado. Debido a su carácter de Monumento Nacional, el nivel de degradación es relativamente bajo en comparación con los otros sitios estudiados. En el valle del Yeso encontramos los estado 2, 3 y 4 de degradación, desde los lugares más alejados del ganado para el estado 2 hasta los lugares donde estaban más cercana a las actividades ganaderas, que pasó a ser el estado 4.

La cobertura encontrada en los estados 1 y 2 de degradación (46-50%) (Tabla 3) supera la cobertura encontrada en literatura, que varía entre 10-30% (Teillier y *col*, 2012) además las especies dominantes encontradas en la zona de estudio difieren de la encontrada en la literatura (Figura 3), lo que podría explicarse por el pequeño tamaño de las parcelas, lo que no permitió reflejar de manera completa la diversidad del sector. Es importante destacar que existen diferencias de especies entre los distintos cajones de la Región Metropolitana (Teillier y *col*, 2012). Debido a diferencias en tipo de suelo, relieve, viento y humedad, entre otros, podrían también explicar las diferencias que existen entre nuestros resultados y la literatura. Por último, la intervención antrópica explicaría por qué muchas de las especies dominantes disminuyen o desaparecen en los sitios estudiados.

También se puede observar que las especies *P. secunda*, *Senecio sp.*, *C. picta* y *Hypochaeris sp.*, solamente se encontraron en los sitios ubicados en el valle del Yeso (estados 2, 3 y 4) (Figura 3). Esto podría explicarse debido a diferencias que normalmente se encuentran en las distintas cuencas. A pesar que en la zona central hay muchas especies nativas, varias de ellas sólo se encuentran de manera local en algunas zonas (Teillier y col, 2011)

La zona andina es una zona caracterizada por una gran heterogeneidad. Esto se explica por diferencias macro y microtopográficas, ya que variables como la exposición, pedregosidad o pendiente influyen en la composición florística. Es sabido que variables como la temperatura y humedad varían dependiendo de la exposición de un ecosistema lo que provocaría diferencias en la composición florística del lugar (Arzac y col, 2011)

Es importante destacar que en el estado 3 la composición arbustiva fue muy variable en las parcelas analizadas. Esto podría deberse al tamaño de las parcelas, que posiblemente no fueron de tamaño suficiente para muestrear la heterogeneidad de la vegetación de manera adecuada.

## 6.2 Diferencias en la composición florística entre los estados de degradación

### 6.2.1 Especies indicadoras de degradación

Existen diferencias entre las especies encontradas en los sitios de El Morado, y Valle del Yeso. *Laretia acaulis*, según la literatura, crece principalmente en laderas de exposición sur (Teillier y col, 2011), mientras que *Acaena splendens* crece en sitios con pastoreo (Teillier y col, 2011). *Quinchamalium chilense* crece entre los arbustos o laderas abiertas, y se encuentra de manera muy frecuente en la zona del Cajón del Maipo. *Haplopappus anthylloides* es muy abundante en el área.

La principal especie indicadora de degradación es *L. acaulis*, la cual disminuye su abundancia al aumentar la presión antrópica (Figura 3). Esta especie es muy importante como indicador, ya que se ha encontrado que esta especie podría servir como planta nodriza para permitir que semillas de otras especies florezcan en sus parches (Cavieres y col, 1998). Esto se pudo constatar en terreno, donde algunas especies crecían dentro de los parches de *L. acaulis*, los cuales permiten una mayor retención de humedad en los meses más secos y además una menor oscilación de temperaturas comparado con el entorno descubierto inmediato.

Otras especies como *A. splendens*, *Q. chilense* y *H. anthylloides* redujeron su abundancia con respecto al estado 1. Al desaparecer estas especies o encontrarse en una abundancia muy baja, serían indicadores de aumento en la degradación (Figura 3).

También se puede observar que la especie *Senecio davilae* se encontró en todos los estados, con excepción del estado 4. Al aumentar el estado de degradación la

abundancia de esta especie disminuye. Cabe destacar que las especies *L. acaulis*, *Q. chilense* y *S. davilae* son especies indeseadas por el ganado (Fredericksen y col, 2011), por lo que la pérdida de abundancia no sería producto del forrajeo, y podría explicarse por el daño que producen las actividades humanas en el ecosistema. El ganado y la actividad turística producto de vehículos y caminantes, al pisotear el suelo, puede dañar la vegetación, además de que la erosión y compactación del suelo podría impedir el asentamiento de semillas (Fredericksen y col, 2011). Es importante destacar que en la antigüedad *Laretia acaulis* se utilizaba como combustible, lo que puede explicar por qué en algunas zonas es tan escasa y en otras es más abundante.

*Adesmia gracilis* es una especie deseable para el ganado, y podemos observar que no se encuentra en el estado 1. Esto podría explicarse debido a que el ganado funcionaría como un agente dispersor para esta especie, lo que facilitaría su dispersión en el valle de El Plomo. Además la ausencia de esta especie podría explicarse por diferencias en la composición de especies en las distintas cuencas, las cuales ya han sido descritas en la literatura (Fredericksen y col, 2011)

### **6.3 Diferencias en las variables de suelo**

No se pudo evaluar diferencias significativas entre calicatas de los distintos estados de degradación, puesto que solamente se realizó una calicata para los estados 2, 3 y 4 (tabla 4). Sin embargo los resultados obtenidos muestran diferencias entre los distintos estados de degradación similares a las observadas en las parcelas analizadas (tabla 3). Además estas variables disminuyen al aumentar la profundidad del suelo lo cual coincide con lo encontrado en la literatura (Zhijing y col, 2013), mientras que las

variables hídricas y físicas encontradas en las calicatas se explicarían por las diferencias en la formación de suelo en los distintos estados de degradación.

Las características de cada suelo dependen de muchos factores, entre ellos el clima, los organismos vivos, el relieve, el material parental y el tiempo. Las diferencias en la textura del suelo podrían explicarse por los factores que afectan la pedogénesis, que corresponden al clima, los organismos vivos, el relieve, el material parental y el tiempo (Luzio *y col*, 2010). Por lo tanto, las diferencias encontradas en este estudio para las variables de suelo se deberían principalmente a las diferencias en los procesos de pedogénesis, que debido a la degradación.

Con respecto a la pedregosidad, se esperaría un aumento en la pedregosidad al aumentar la degradación, ya que las actividades ganaderas y turísticas provocarían erosión del terreno, destruyendo la cobertura vegetal y dejando el suelo desnudo (Fredericksen *y col*, 2011). Sin embargo no se observaron diferencias significativas en la pedregosidad del suelo entre los distintos estados, lo que podría explicarse por la alta heterogeneidad del suelo en los ecosistemas cordilleranos (Tabla 3).

Para las variables de densidad aparente y densidad aparente fracción fina, se esperaba un aumento en las variables, al aumentar la degradación. El efecto del paso de ganado y actividades turísticas compactarían el suelo (Fredericksen *y col*, 2011) provocando un aumento en la densidad aparente. Sin embargo, se observó el efecto contrario, donde la densidad es significativamente más alta en los estados menos degradados. Al existir una cobertura vegetal baja, la importancia de las características microtopográficas es mayor (Whisenant, 1999), por lo tanto es posible que las características propias del sitio de estudio expliquen las diferencias de los

resultados esperados para pedregosidad y densidades más que la erosión y la compactación del suelo (Tabla 3).

Debido al aumento de la compactación del suelo por la actividad ganadera al aumentar la degradación (Fredericksen *y col*, 2011), se esperaría una disminución en la porosidad del suelo al aumentar la degradación, Se esperaba una disminución en la porosidad del suelo debido al pisoteo por parte del ganado, lo cual no concuerda con los resultados esperados. Esto podría deberse a que la importancia de las características topográficas de cada sitio de estudio cobra mayor relevancia que la compactación del suelo que podría producirse por las actividades antrópicas.

El contenido de carbono y nitrógeno en el suelo tiene directa relación con el flujo de nutrientes en el ecosistema, y disminuyen al aumentar la degradación en los ecosistemas (Li *y col*, 2013, Xue *y col*, 2013) Además en presencia de pastoreo el carbono total en el suelo es menor (Li *y col*, 2007). Por lo tanto los resultados obtenidos concuerdan con la literatura.

Se observa que el estado 1 posee menor porcentaje de carbono y nitrógeno (tabla 3), lo cual podría explicarse por las diferencias en la formación de suelo. En el resto de los estados, ambas variables disminuyen al aumentar la degradación.

Con respecto a la relación C/N no hubo diferencia significativa entre los estados (tabla 3), lo que indica que al disminuir el porcentaje de carbono, el nitrógeno también lo hace manteniendo una proporción similar, y no sería un buen indicador para evaluar la degradación.

#### 6.4 Diferencias entre variables de vegetación

Las variables de cobertura, profundidad y biomasa de hojarasca no presentaron diferencias significativas entre los estados, por lo que no serían buenos indicadores para estimar la degradación de un ecosistema. Cabe destacar que se encontraron diferencias significativas entre coberturas para la biomasa de hojarasca (figura 3). Debido a nuestra metodología, para cada estado se recolectaron muestras con y sin cobertura por igual (2 muestras con y sin cobertura por cada parcela). Por lo tanto en los estados de mayor degradación las muestras con cobertura podrían estar sobrerrepresentadas en comparación con los estados menos degradados, lo que incidiría en los resultados en los distintos estados.

El pastoreo tiene un gran efecto en la biomasa de los productores (Carilla y col, 2011), que está relacionada con las variables de cobertura, altura y fitovolumen. El estado 1 no se comportó como se esperaba, ya que los resultados fueron significativamente menores que en el estado 2 (figura 3). Para el resto de los estados, las variables disminuyeron al aumentar la degradación. Se encontró el mismo patrón para las variables arbustivas. Por lo tanto estas variables serían buenos indicadores de degradación.

Para las variables de cobertura, altura y fitovolumen herbáceo, solamente se encontraron diferencias significativas en la cobertura herbácea (figura 3). Se observa una disminución de la cobertura herbácea al aumentar el nivel de degradación, con excepción del estado 1, que no es comparable a los estados 2, 3 y 4. Solamente la variable de cobertura herbácea serviría para identificar degradación en los ecosistemas.

## 6.5 Diferencias entre variables de diversidad

Con respecto a las variables de riqueza total, arbustiva y herbácea, se observan diferencias significativas entre los estados (Figura 3). Se sabe que la actividad humana y la degradación de los ecosistemas afecta la biodiversidad de especies (Rojas y col, 2011). Se observa que todos los estados se comportaron como se esperaba, ya que las variables disminuyeron al aumentar la degradación.

Se observó una disminución de la riqueza de especies al aumentar la degradación (Figura 3), lo que coincide con los resultados esperados. En ambientes degradados se ha observado diferencias significativas de riqueza de especies nativas en comparación con ambientes menos degradados (Arroyo y col, 2000). Sin embargo hay que destacar que existen diferencias muy grandes entre el estado 1 y el resto de los estados de degradación, lo que podría ser explicado porque el estado 1 se encontraba dentro de un Monumento Nacional, el cual posee un impacto antrópico menor al de los otros sitios.

El forrajeo por parte del ganado también podría explicar la disminución de la riqueza de especies en los ambientes más degradados (Prakash y col, 2002), lo cual concuerda con los resultados obtenidos en este trabajo (Figura 3).

La biodiversidad (que en este estudio se analizó utilizando el índice de Shannon), disminuye al aumentar la degradación en un ecosistema (Prakash y col, 2002), lo cual concuerda con los resultados obtenidos.

Se analizaron las variables de CSII y CSII normalizado. El CSII (Community Structure Integrity Index) es un índice que mide la proporción media de la abundancia

de especies en las comunidades de referencia representadas en la comunidad evaluada (Jaunatre *y col*, 2013). Los resultados obtenidos concuerdan con la literatura (Figura 3). Sin embargo, al ser tan diferentes las comunidades de El Morado y Valle del Yeso, no se pudo comparar de manera adecuada los estados 2, 3 y 4 entre sí. Para solucionar este problema, se evaluó de manera adicional solamente las comunidades ubicadas en el Valle del Yeso, considerando el Estado 2 como el estado de referencia, y los resultados obtenidos concuerdan con los resultados esperados. El CSII y el CSII normalizado son excelentes indicadores para evaluar la degradación de ecosistemas en el piso andino superior (figura 4).

Para el HAI (Higher Abundance Index) mide el promedio de la proporción de la abundancia de especies en las comunidades evaluadas (estados 2, 3 y 4) cuya proporción es mayor que las comunidades de referencia (Jaunatre *y col*, 2013). El HAI debiera aumentar al aumentar la degradación, por la llegada de especies invasoras al sistema degradado. Sin embargo en el piso andino superior no se encontraron especies invasoras en las parcelas, lo que explicaría que el HAI no aumentara según lo indicado en la literatura. Al realizar el mismo análisis solamente considerando los sitios del Valle del Yeso, se encontró el mismo tipo de resultado que no concuerda con la literatura.

## **6.6 Diferencias entre variables de procesos**

La respiración del suelo está directamente relacionada con la actividad de las raíces y microorganismos del suelo, y por lo tanto con los flujos de carbono en el

ecosistema (Moriyama *y col*, 2013). Según la literatura, la respiración disminuye al aumentar la degradación, como también hay diferencias significativas en sitios con y sin cobertura en ecosistemas cordilleranos (Rey *y col*, 2011). Los resultados indican que no hay diferencias significativas entre coberturas y en los distintos estados de degradación, contrario a lo observado en la literatura (Figura 3). No se encontraron diferencias significativas debido a la alta desviación estándar de los resultados obtenidos en los estados. Como la productividad de estos ecosistemas es muy baja, el método utilizado podría no haber sido suficientemente sensible para medir estas diferencias.

La textura del suelo, densidad aparente, porosidad, materia orgánica y la estructura del suelo afectan la velocidad de infiltración de agua (Zeng *y col*, 2013, Petersen *y col*, 2008). Se esperaba que esta variable disminuyera al aumentar la degradación, lo cual no concuerda con los resultados obtenidos. Esto podría explicarse por las diferencias en las características del suelo nombradas anteriormente. Se encontró una alta desviación estándar en los resultados obtenidos en cada estado de degradación. Posiblemente sea necesario utilizar distintos métodos de medición de infiltración para obtener resultados más significativos.

La productividad de un ecosistema disminuye al aumentar la degradación (Bai *y col*, 2008; Erb *y col*, 2009), lo que concuerda con los resultados obtenidos. El estado 4 no posee productividad arbustiva debido a su ausencia en las parcelas.

## 6.7 Regresión lineal y PCA

Se encontró una relación inversa entre el nivel de degradación y la distancia a caminos y a cabreras. Los resultados obtenidos concuerdan con la información recopilada en la literatura. Es importante destacar que el camino principal existente en el sitio de estudio es un camino de tierra que se encuentra en la parte baja del valle, corriendo de forma paralela al río que baja por el valle. Es probable que la relación entre la distancia al camino y la degradación también tenga que ver con la distancia al río, ya que el ganado suele concentrarse cerca de los cuerpos de agua. En estudios en Argentina se ha encontrado un aumento de la degradación en las cercanías de los cuerpos de agua (Beeskow et al. 1995). Por lo tanto, debido a que el camino es de tierra y con poco flujo vehicular, es posible que el agua que corre paralela al camino sea un factor determinante en la degradación que ocurre en las veranadas.

Se ha observado que en presencia de pastoreo intensivo de ganado, existe una mayor cantidad de especies herbáceas anuales en desmedro de las especies arbustivas (Beeskow et al. 1995), lo que concuerda con nuestros resultados, donde las especies arbustivas desaparecen en el estado 4.

En el análisis de componentes principales se observa que cada estado está relacionado con algunas de las variables analizadas. Es importante destacar que las variables del estado 1 están relacionadas negativamente con el estado 3, lo que puede explicarse por la disminución en la riqueza y diversidad de especies en este estado. También se observa que para el estado 4, las variables arbustivas (riqueza, cobertura,

diversidad) se relacionan negativamente con el estado 4, ya que este pierde la totalidad de las especies arbustivas. El PCA complementa la información obtenida de los datos obtenidos para cada uno de los estados de degradación.

## 7. Conclusiones

Se caracterizaron un total de 37 variables, encontrándose en varias de ellas diferencias significativas en los distintos estados de degradación del piso andino superior en la Región Metropolitana. Las variables que mejor permiten identificar degradación del ecosistema son las variables vegetacionales, relacionadas con cobertura, altura, fitovolumen, riqueza y diversidad. Las variables de suelo no resultaron ser un buen indicador de degradación, debido a que existe una gran heterogeneidad entre los tipos de suelo de la zona cordillerana, además de los distintos procesos geológicos que ha sufrido la zona a lo largo del tiempo. Por lo tanto las diferencias en variables de suelo podrían explicarse por las características edáficas de la zona de estudio, más que la degradación del ecosistema.

Es importante destacar que el modelo propuesto por Whisenant es difícil de aplicar en el piso andino superior. Se recomienda cambiar los 5 estados de degradación propuestos por Whisenant por 3 estados de degradación: bajo, medio y alto.

Las variables que mejor identifican el umbral 1-2, que depende de las variables bióticas, corresponden principalmente a las variables de biodiversidad, como riqueza, Shannon herbáceas y el CSIL. Las variables que mejor identifican al umbral 2-3, correspondiente al umbral determinado por variables abióticas, corresponde al porcentaje de arcilla y porcentaje de arena. Las variables que mejor identifican el umbral 3-4 corresponden a variables vegetacionales arbustivas, como cobertura, altura, fitovolumen y productividad, además la CC y el PMP al llegar a este umbral.

Existe una relación entre el estado de degradación y la distancia a los impactos antrópicos en la zona, lo que es consistente con la literatura.

Es importante destacar que el estado 1 de degradación es muy diferente al resto de los estados, y las variables analizadas no son totalmente comparables. Este estudio permite comparar estados de degradación ubicados en zonas cercanas, que posean el mismo clima y mismo tipo de suelo, pero si las variables bióticas y abióticas del sistema son demasiado diferentes, no se comportan como lo esperado.

Es necesario realizar más estudios respecto a la dinámica ecológica del piso andino superior. El contar con mayor conocimiento, permitiría apoyar de mejor forma la toma de decisiones en el ámbito de la restauración. El conocimiento respecto a interacciones entre especies, permitiría identificar y trabajar con taxa que puedan funcionar como nodrizas para la recolonización de otras especies, y la interacción entre organismos autótrofos y heterótrofos en los distintos estados de degradación permitiría apoyar el proceso de restauración, de forma más precisa y con mejores resultados. Es importante también considerar el efecto que el cambio climático tendría sobre los diversos ecosistemas e incluirlo en los planes de restauración.

La inclusión de variables económicas y sociales permitiría además, completar el modelo conceptual para el desarrollo de planes de restauración y manejo que puedan utilizarse en distintas zonas del país.

## 8. Bibliografía

Arroyo, MTK; Marticorena, C; Matthei, O; Muñoz; M. y Pliscoff, P. 2002. Analysis of the contribution and efficiency of the Santuario de la Naturaleza Yerba Loca, 33° S in protecting the regional vascular plant flora (Metropolitan and Fifth regions of Chile) *Revista Chilena de Historia Natural* 75: 767-792.

Arzac, A. 2011. Distribución de formas de vida de plantas en el límite superior del ecotono bosque páramo en los andes tropicales. *Ecotrópicos* 24(1):26-46 2011

Badano, E y Cavieres, L. 2006. Impacts of ecosystem engineers on community attributes: effects of cushion plants at different elevations of the Chilean Andes. *Biodiversity Research* 12: 388-396.

Bai, ZG; Dent DL. y Schaepman, ME. 2008. Global assessment of land degradation and improvement. Identification by remote sensing. Report 2008/01, FAO/ISRIC

Beeskow, A; Elissalde, N; Rostagno, C. (1995) Ecosystem changes associated with grazing intensity on the Punta Ninfas rangelands of Patagonia, Argentina. *Journal of Range Management Archives*. 48: 517-522.

Carilla, J; Aragón, R. y Gurvich, D. 2011. Fire and grazing differentially affect aerial biomass and species composition in Andean grasslands. *Acta Oecologica* 37: 337-345.

Casanova, M., Vera, W. Luzio, W. y Salazar, O. 2004. Edafología, Guía de Clases Prácticas. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Ingeniería y Suelos. Santiago, Chile. 75 p.

Cavieres, L. y Sierra-Almeida, A. 2012. Facilitative interactions do not wane with warming at high elevations in the Andes. *Oecologia* 170(2):575-84

Cavieres, L.A., A.P.G. Peñaloza, C. Papic y M. Tambutti. 1998. Efecto nodriza del cojín *Laretia acaulis* (Umbelliferae) en la zona alto-andina de Chile central. *Revista Chilena de Historia Natural* 71: 337-347.

Chandra, PK; Sanjay, KS y Gopal SR. 2002. Effects of sheep and goat grazing on the species diversity in the alpine meadows of Western Himalaya. *Environmentalist* 22: 183-189.

CONAMA, 2003. Estrategia Nacional de Biodiversidad. 166 pp.

CONAMA, 2005. Estrategia para la Conservación de la Biodiversidad en la Región Metropolitana de Santiago. 92 pp.

Erb, K.; Krausmann, F; Gaube, V; Gingrich, S; Bondeau, A; Fischer-Kowalski, M y Haberl, H. 2009. Analyzing the global human appropriation of net primary production — processes, trajectories, implications. An introduction. *Ecological Economics* 69: 250–259.

Fredericksen, N; Pérez, J. y Contreras, X. (eds.) 2011. Manual de buenas prácticas para uso sustentable de ecosistemas de montaña. Santiago de Chile, Editorial Universidad de Chile. 122pp.

Infante, N. 2012. Monumento Natural El Morado, Andes Centrales Chilenos. Análisis del medio biofísico, paisaje y propuestas para su gestión. Editorial Académica Española, 300 pp.

Instituto de Botánica Darwinion [en línea], 2014. "Catálogo de las Plantas Vasculares del Conosur". <<http://www2.darwin.edu.ar/Proyectos/FloraArgentina/FA.asp>> [consulta: 21 mayo 2014)

Hijmans, RJ; Cameron, SE; Parra, JL; Jones, PG; Jarvis, A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25: 1965-1978.

Jaunatre, R; buisson, E; Muller, I; Morlon, H; Mesléard, F y Dutoit, T. 2013. New synthetic indicators to assess community resilience and restoration success. *Ecological Indicators* 29: 468-477.

Li, X; Feng-min, L; Singh, B; Zed, R. y Zheng-van, Z. 2007. Soil management changes organic carbon pools in alpine pastureland soils. *Soil&TillageResearch* 93: 186-196.

Li, Y; Dong, S-K; Wang, X. y Wu, Y. 2013. Soil carbon and nitrogen pools and their relationship to plant and soil dynamics of degraded and artificially restored grasslands of the Qinghai–Tibetan Plateau. *Geoderma* 213: 178-184.

Luebert, F. y Pliscoff, P. Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. Santiago de Chile: Editorial Universitaria, 2006. 296 pp.

Luzio, W. Casanova, M. Seguel, O. 2010. Suelos de Chile. Luzio W. (Editor). Universidad de Chile. 346 pp.

Milton, S. J., W. R. J. Dean, M. A. du Plessis & W. R. Siegfried. (1994). A conceptual model of arid rangeland degradation. *BioScience*, 44, 70–76.

Moreno, C. 2001. Métodos para medir la biodiversidad. Vol. 1. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Oficina Regional de Ciencia y Tecnología para América Latina y el Caribe de UNESCO y Sociedad Entomológica Aragonesa. Serie Manuales y Tesis SEA. 84 pp.

Moriyama, A; Yonemura, S; Kawashima, S; Du, M. y Tang, S. 2013. Environmental indicators estimating the potential soil respiration rate in alpine zone. *Ecological Indicators* 32: 245-252.

Myers N, RA Mittermeier, CG Mittermeier, GDA Fonseca & J Kent. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priority. *Nature* 403: 853-858.

Niemeyer, Hans. 1982. Las hoyas hidrográficas de Chile, Región Metropolitana. Dirección General de Aguas, Santiago. 18pp.

Oszust, J; Wilson, M.G. y Sasal, M.C. 2010. Obtención del punto de marchitez permanente para el cálculo de agua útil para trigo y soja en suelos molisol y vertisol. Actualización Técnica N° 1 – Cultivos de Invierno 67-70.

Petersen, C; Trautner, A. y Hansen, S. 2008. Spatio-temporal variation of anisotropy of saturated hydraulic conductivity in a tilled sandy loam soil. *Soil Tillage Research* 100 (1-2), 108-113.

Reed, R. A; Johnsonbarnard, J. & Baker, W. L., 1996, Contribution of roads to forest fragmentation in the Rocky Mountains. *Conser. Biol.*, 10: 1098-1106.

Rey, A; Pegoraro, E; Ovonarte, C; Were, A; Escribano, P. y Raimundo, J. 2011. Impact of land degradation on soil respiration in a steppe (*Stipa tenacissima L.*) semi-arid ecosystem in the SE of Spain. *Soil Biology & Biochemistry* 43: 393-403.

Richards L.A., 1948. Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soil. *Soil Science* 66(2):105-110

Rojas, I. Becerra, P. Gálvez, N. Laker, J. Bonacic, C. Hester, A. Relationship between fragmentation, degradation and native and exotic species richness in an Andean temperate forest of Chile. *Gayana Botanica* 68: 163-175.

Santos, A. M. & Tabarelli, M. Distance from roads and cities as a predictor of habitat loss and fragmentation in the caatinga vegetation of Brazil. *Braz. J. Biol.* 62, pp. 897-905.

Sasaki, T; Okayasu T; Jamsran U. & Takeuchi K. (2008) Threshold changes in vegetation along a grazing gradient in Mongolian rangelands. *Journal of Ecology*, 96, 145-154

Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group. 2004. The SER International Primer on Ecological Restoration. [www.ser.org](http://www.ser.org) & Tucson: Society for Ecological Restoration International.

Teillier, S., A. Marticorena & H. Niemeyer. 2011. Flora Andina de Santiago: Guía para la Identificación de las especies de las cuencas del Maipo y del Mapocho. Imprenta Puntografix. 478 pp.

USDA, 2004. Soil Survey Laboratory Methods Manual. 700 pp.

Whisenant, S. G. 1999. Repairing Damaged Wildlands. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Xue, Z; Cheng, M; An, S. 2013. Soil nitrogen distributions for different land uses and landscape positions in a small watershed on Loess Plateau, China. *Ecological Engineering* 60: 204-213.

Zeng, C; Zhang, F; Wang, Q; Chen, Y. y Joswjak, D. 2013. Impact of alpine meadow degradation on soil hydraulic properties over the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology* 478. 148-156.

Zuloaga, F. O; Morrone O. & Belgrano, M. (eds). 2008. Catálogo de las Plantas Vasculares del Cono Sur (Argentina, Sur de Brasil, Chile, Paraguay y Uruguay). Pteridophyta, Gymnospermae, Monocotyledoneae. Monograph in Systematic Botany from Missouri Botanical Garden 107(1); i-xcvi, 1-983.

## 9. Anexos

- Anexo 1      Fotografías de los cuatro estados de degradación.
- Anexo 2      Descripción cualitativa de las calicatas para los estados de degradación  
2, 3 y 4.
- Anexo 3      Descripción cuantitativa de las calicatas para los estados de degradación  
2, 3 y 4.

## Anexo 1

Estado 1



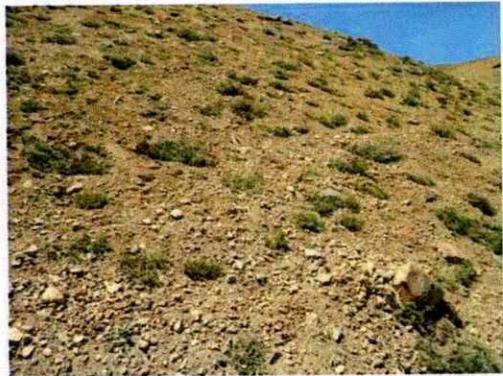
Estado 2



Estado 3



Estado 4



## Anexo 2

Calicata Estado 2	Calicata Estado 3	Calicata Estado 4
<p><b>Horizonte 1: 5-27 cms</b>            Color: 5YR 3/2 DarkReddish Brown en seco / en húmedo 5YR 2,5/1 Black.            Textura: Gravosa, franco limosa            Estructura de forma amorfa, grado débil y de tamaño pequeño. Se observa que hay relación mayor de fragmentos finos que en el horizonte anterior, pero una menor proporción de fragmentos gruesos. Raíces: muy finas, abundantes            Poros: Muy finos, pocos. Pedregosidad: Grava fina 75%, forma plana prismoidal. Grava media 10%</p>	<p><b>Horizonte 1: 5-18 cms</b>            Color: 104R 4/3 Brown (pardo) en seco / 104R 3/3 Dark Brown húmedo. Textura franco arcillosa. Estructura no posee (granular) Raíces muy finas abundantes, finas comunes, no hay raíces medias. Poros no son observables. Grava media de forma cúbica (&lt;5%) Gravoso. Grava fina de forma cúbica (&lt;5%). No adhesivo moderadamente plástico.</p>	<p><b>Horizonte Indeterminado: 0-15 cms</b>            Horizonte superficial sobre el suelo, de roca suelta, material transportado, el cual principalmente es grava que puede provenir de un afloramiento rocoso en la superficie de la meseta.</p>
<p><b>Horizonte 2: 27-45 cms</b>            Color 5YR 3/2 Dark Reddish Brown en seco. 5YR 2,5/1 Black Húmedo            Textura: Gravosa y arenosa. Estructura: Grado débil. Forma amorfa (casi sin estructura) tamaño muy pequeño            Raíces: muy finas abundantes. Finas pocas. Medias pocas. Poros: muy finos abundantes Pedregosidad: Grava fina 25% Forma angular cúbica. Grava fina 5%. Forma angular cúbica Grava media &lt;5% forma angular cúbica. Presencia de materia orgánica en descomposición (nódulos)</p>	<p><b>Horizonte 2: 18-39 cms.</b>            Color: 104R ¼ Dark Yellowish Brown en seco / 10YR 3/3 Dark Brown húmedo. Textura Arcillo limosa. Estructura: bloques subangulares, grado moderado, tamaño medio. Raíces muy finas comunes, finas pocas. Poros finos comunes, vesiculares. Grava media 2% forma cúbica gravosa, grava gruesa &lt;2% cúbica gravosa. Ligeramente adhesivo, moderadamente plástico.</p>	<p><b>Horizonte CG 15-70 cms</b>            Profundidad horizonte CG 15-70 cm. (7,54R 4/6 Strong Brown) en seco; (104R 6/4 Light brown - 104R 5/4 Yellowish Brown) en húmedo.            Textura Franco Arcillosa. Estructura de bloques angulares agregados débiles de tamaño medio. Raíces muy finas pocas, finas muy pocas, medias pocas. Poros: muy finos pocos, tubulares finos pocos, finos pocos. Clase textural gujarrosa, con fragmentos gruesos de forma cúbica entre 7.5-25mm.</p>
<p><b>Horizonte 3: 45-65 cms</b>            Color: 10 YR 2/2 Verydark Brown en seco / 10YR 2/1 Black en húmedo. Textura: Franco limosa. Estructura: Amorfa, tamaño medio, grado débil            Raíces: muy finas pocas. finas comunes. Medias. Poros: Gruesos comunes / Finos pocos. Pedregosidad: Forma esférica., grava media 5% / grava fina &lt;10%</p>	<p><b>Horizonte 3: 39-59 cms.</b>            Color 10YR 4/3 brown en seco / 10YR 3/3 Dark Brown en húmedo Textura Arcillo limosa. Estructura bloques subangulares tamaño fino, grado moderado. Raíces muy finas comunes. Poros muy finos comunes, finos pocos, muy finos abundantes en forma dendrítica tubular. Grava fina 5% aplanada prismoidal, grava media 2% aplanada, prismoidal y cúbica. Se observan nódulos abundantes en calcita. Moderadamente adhesivo, muy plástico.</p>	
	<p><b>Horizonte 4: 59-70 cms.</b>            Color: 10yR ¼ Darkyellowish Brown en seco / 10YR 3/3 Darkbrown en húmedo. Textura franco arcillo limosa. Estructura bloques subangulares grado débil tamaño muy fino. Raíces muy finas muy pocas. Grava media 15% gujarro apalanado 2%. Gravosa no plástico.</p>	

Descripción cualitativa de calicata en los distintos estados de degradación

### Anexo 3

Estado	1			2			3				4	
	0-10	10-20	20-30	5-27	27-45	45-65	5-18	18-39	39-59	59-70	0-15	15-70
profundidad	0-10	10-20	20-30	5-27	27-45	45-65	5-18	18-39	39-59	59-70	0-15	15-70
arcilla (%)	5.4	5.4	6.4	6.4	8.4	7.4	9.4	17.4	20.4	18.4	19.4	16.4
limo (%)	12.6	8.6	11.6	10.6	12.6	8.6	11.6	18.6	17.6	17.6	16.6	17.6
arena (%)	82.0	86.0	82.0	83.0	79.0	84.0	79.0	64.0	62.0	64.0	64.0	66.0
clase textural	AF	AF	AF	AF	AF	AF	FA	FA	Farc	FA	FA	FA
pedregosidad (%)	-	-	-	35.3	57.3	45.5	42.0	31.4	37.2	41.2	41.4	50.9
densidad aparente	-	-	-	1.256	1.130	1.135	1.042	0.944	0.958	1.053	0.921	0.919
densidad aparente ff	-	-	-	0.974	0.632	0.765	0.723	0.707	0.687	0.739	0.629	0.549
porosidad (%)	-	-	-	52.6	57.4	57.2	60.7	64.4	63.8	60.3	65.2	65.3
HA (%)	-	-	-	20,6	16,8	16,3	14,0	17,7	19,3	23,0	24,0	23,7
PMP	-	-	-	14,5	8,4	8,5	8,5	11,3	12,3	13,8	13,8	13,4
CC	-	-	-	6,0	8,4	7,8	5,5	6,4	7,0	9,2	10,2	10,2
Carbono (%)	1.965	1.333	1.074	2.271	2.674	1.404	1.321	1.115	0.982	0.758	0.380	0.424
Nitrógeno (%)	0.139	0.107	0.091	0.207	0.242	0.140	0.135	0.116	0.098	0.074	0.028	0.031
C/N	14.16	12.48	11.83	10.98	11.05	10.03	9.81	9.66	10.00	10.25	13.58	13.74

Descripción cuantitativa por horizontes de calicata (estados 2, 3 y 4) y de barreno (estado 1) para los distintos estados de degradación. AF: areno francoso; FA: franco arenoso; Farc: franco arcilloso.